



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

*IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA CON PARÁMETROS MAGNÉTICOS EN LA  
EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE ELEMENTOS PESADOS EN RESIDUOS MINEROS.  
EJEMPLOS EN EL DISTRITO MINERO TLALPUJAHUA-EL ORO, MICHOACÁN, Y EL DISTRITO  
DE GUANAJUATO, GUANAJUATO*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
*INGENIERO GEOFÍSICO*

PRESENTA

DORIS ARLETTE DÍAZ AGÜERO

DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. MARÍA DEL SOL HERNÁNDEZ BERNAL

CO-DIRECTOR DE TESIS:  
DR. JUAN JULIO MORALES CONTRERAS



CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F.  
MÉXICO, 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1. Introducción.....	2
1.1. Descripción del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua (DMOT).....	2
1.2 Descripción del Distrito Minero de Guanajuato (DMG).....	11
1.3 Normatividad.....	17
1.4 Antecedentes que motivaron la elección del tema.....	19
1.5 Objetivos del trabajo.....	20
1.6 Hipótesis presentada.....	21
CAPÍTULO II.....	22
2. Marco Teórico.....	22
2.1 Jales Mineros.....	22
2.2 Propiedades y Parámetros magnéticos de materiales geológicos.....	22
2.3 Mineralogía magnética.....	33
2.4 Caracterización Química de jales mineros en México.....	35
2.5 Propiedades químicas y físicas.....	35
CAPÍTULO III.....	39
3. Metodología de Trabajo.....	39
3.1. Muestreo.....	39
3.1.1. DMOT.....	39
3.1.2. Tlalpujahua (2° muestreo).....	40
3.1.3. Guanajuato.....	41
3.2. Fluorescencia de Rayos X (FRX).....	43
3.3. Susceptibilidad Magnética.....	48
3.4. Medición de Propiedades Físicoquímicas.....	49

CAPÍTULO IV.....	52
4. Resultados.....	52
4.1 Análisis Multivariado.....	52
4.2 Tablas de datos y tendencias.....	56
4.3 DMOT_JALES.....	57
4.4 DMOT_SUELOS.....	62
4.5 DMG_JALES.....	64
4.6 DMG_SOCAVONES.....	66
4.7 DMG_TERRAZA ALTA.....	68
4.8 DMG_BURRONES.....	68
4.9 Resumen de relaciones de $\chi$ con los jales, suelos y socavones (DMOT y DMG) .....	70
4.10 Gráficos 3D.....	70
4.11 Curvas de histéresis y termomagnéticas.....	81
4.12 Mapas.....	86
CAPÍTULO V.....	91
5. DISCUSIÓN.....	91
CAPÍTULO VI.....	103
6. CONCLUSIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	104
ANEXOS.....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Etapas y métodos de explotación de Au y Ag empleados en el DMOT a lo largo de su historia productiva. Datos compilados de Uribe-Salas, 2008 y del Archivo del Museo Mina del Siglo XIX, Dos Estrellas (Corona-Chávez et al., 2010) .....	5
<b>Figura 1.2</b> Regiones mineras de elementos metálicos del Estado de Michoacán. (Panorama minero del Estado de Michoacán, septiembre del 2011) .....	8
<b>Figura 1.3</b> Distritos Mineros más importantes de elementos metálicos del Estado de Michoacán. (Panorama minero del Estado de Michoacán, septiembre del 2011). .....	8
<b>Figura 1.4</b> Regiones mineras de elementos metálicos del Estado de México (Panorama Minero del Estado de México de la Secretaría de Economía, septiembre del 2011). .....	9
<b>Figura 1.5</b> Distritos mineros más importantes de elementos metálicos del Estado de México (Panorama Minero del Estado de México de la Secretaría de Economía, septiembre del 2011). .....	10
<b>Figura 1.6</b> Bosquejo geológico del Distrito Minero de Guanajuato. (Ramos-Arroyo y Martínez-Arredondo, <i>Modelo conceptual de la evolución de geoquímica de los residuos mineros “La Valenciana”, Guanajuato, México</i> ). .....	13
<b>Figura 1.7</b> Regiones mineras de elementos metálicos del Estado de Guanajuato (Panorama Minero del Estado de Guanajuato, septiembre del 2011). .....	14
<b>Figura 1.8</b> Distritos mineros de elementos metálicos más importantes del Estado de Guanajuato. (Panorama Minero del Distrito Minero de Guanajuato, septiembre del 2011). ...	15
<b>Figura 1.9</b> Vista panorámica de algunas de las presas de jales del distrito minero de Guanajuato. ....	16
<b>Figura 1.10</b> Representación esquemática de La Valenciana (2250msnm).....	17
<b>Figura 2.1</b> Arreglo de spines de sustancias: a) ferromagnéticas, b) antiferromagnéticas y c) ferrimagnéticas. ....	24
<b>Figura 2.2</b> Curvas termomagnéticas que muestran reacciones termoquímicas en minerales magnéticos: a) titanomagnetitas ricas en Ti en ex solución formando magnetita relativamente pura, b) titanomagnetita pobre en Ti, oxidándose para formar maghemita, c) titanomagnetita pobre en Ti formando titanohematita y hematita, d) siderita en sedimentos convirtiéndose a magnetita y e) maghemita convirtiéndose a hematita. (Tarling, 1983). .....	27
<b>Figura 2.3</b> Patrones de dominio. En granos largos, el cambio y las fuerzas de cambio causan un alineamiento interno de la magnetización del spin, dando lugar a la formación de polos magnetostáticos fuertes por fuera del grano. Con el fin de balancear estos dos tipos de fuerza, los dominios pueden formar pares antiparalelos (segundo cuadro) o dominios cerrados (tercer cuadro). Tomado de Tarling, 1983.....	30
<b>Figura 2.4</b> Curvas de histéresis. Donde H es el campo magnético externo, M es la magnetización. (a) Curva cuadrada de histéresis, b) Sin curva de histéresis, c) curva de histéresis para partículas de multidominio. Tarling, 1983. ....	31

<b>Figura 2.5</b> Comportamientos de las curvas de histéresis: a) diamagnéticos, b) paramagnéticos, c) superparamagnéticos, d) uniaxial, dominio sencillo, e) magnetocristalino, dominio sencillo, f) pseudo-dominio. Comportamiento de histéresis de varias mezclas: g) magnetita y hematita, h) magnetita SD/SP, i) otro ejemplo de magnetita de SD/SP con una distribución SP de grano más fino. (Tauxe, 2014). Donde SP es superparamagnético y SD es dominio sencillo. ....	32
<b>Figura 2.6</b> Diagramas de fases para los óxidos de FeTi. De lado izquierdo se presenta la serie de las titanomagnetitas y de lado derecho la serie de las titanohematitas. (Tauxe, 2014). .....	33
<b>Figura 2.7</b> Diagrama ternario para óxidos de Fe. X denota la cantidad de Ti en sustitución en titanomagnetitas, y en hemoilmenitas, y. X & Y van de 0 (magnetita/hematita) a 1 (ulvöespinela/ilmenita). Tomado de Tauxe, 2014. ....	34
<b>Figura 2.8</b> Diagrama de Pourbaix del hierro. (Ramos–Arroyo y Siebe–Grabach, 2005). Se ejemplifica el desarrollo de los procesos geoquímicos en función del tamaño de grano y la humedad: la oxidación de sulfuras y el consumo de calcita se vuelven más importantes al aumentar el tamaño de grano, siempre y cuando exista un aporte de agua; por otra parte, el contenido de metales aumenta al disminuir el tamaño de partícula. ....	37
<b>Figura 3.1</b> Mapa de Corona-Chávez et al. Variaciones Geoquímicas y Mineralógicas Jales El Oro y Tlalpujahuá, 2010, donde se muestra la distribución de jales y algunas obras mineras en el DMOT. En números romanos se localizan las estaciones de muestreo analizadas en esta etapa del trabajo (notación usada en este trabajo por ejemplo E2H3 corresponde al número romano II). ....	40
<b>Figura 3.2</b> Equipo X-Calibur utilizado en el estudio de FRX. ....	44
<b>Figura 3.3</b> Prensa de la marca Specac utilizada en el laboratorio. ....	45
<b>Figura 3.4</b> Representación de muestras de Guanajuato secas, molidas y prensadas a), y muestras hechas pastillas colocadas en el carrete del equipo X-Calibur de FRX b). ....	45
<b>Figura 3.5</b> Conjunto de las 8 muestras IGL's utilizadas en la calibración del equipo X-Calibur. ....	46
<b>Figura 3.6</b> Creación de un procedimiento en el software Next. ....	47
<b>Figura 3.7</b> Elementos mayores y traza con sus respectivos filtros a aplicar, líneas de energía y propiedades de cada uno. (Tabla reportada para uso exclusivo del equipo X-Calibur). ....	47
<b>Figura 3.8</b> Calibración del Pb para usarse posteriormente en el procedimiento de medición de este EPT. ....	48
<b>Figura 3.9</b> Espectro con los elementos que reconoció después de determinada lectura. ....	48
<b>Figura 3.10</b> Susceptibilímetro Bartington MS2 y Susceptibilímetro MS3 conectado al sensor MS2B. ....	49
<b>Figura 3.11</b> Distribución de las muestras en los distintos vasos de precipitado. Los vasos se etiquetaron y las muestras se midieron en orden según el perfil y el horizonte. ....	50
<b>Figuras 3.12a y 3.12b</b> Representación del proceso completo en laboratorio (a) y medición de Eh y pH (b). ....	50
<b>Figura 4.1</b> Variabilidad de las mediciones de la Estación 3 del DMOT. En la columna estratigráfica, H1 corresponde a textura franca, E2 y E4 a textura arcilla-limosa, E3 a franco-arcilla-arenosa, E5 y E6 a franco-arcillosa y E7 sin textura (Corona-Chávez et al., 2010). ....	57
<b>Figura 4.2</b> Perfiles de jales del DMOT, correlacionando cada horizonte con sus distintas mediciones. Es importante mencionar que no hay relación con la profundidad solo en los mismos niveles de horizontes. ....	59
<b>Figura 4.3</b> Perfiles de jales del DMOT, presentando un decremento de la $\chi$ hacia la parte inferior del perfil. Los horizontes de los demás perfiles se ajustaron a los horizontes ordenados de acuerdo a la $\chi$ . ....	60

<b>Figura 4.4</b> Se observan las relaciones a profundidad de las distintas mediciones realizadas a las muestras de jales del DMOT de las estaciones E7 y E8 (El Oro), y CBT (Tlalpujahuá)...	60
<b>Figura 4.5</b> Tendencias de los EPT's con relación a la $\chi$ y el contenido de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ en los jales del DMOT (muestras seleccionadas). Relaciones: a) $\chi$ -Fe, b) $\chi$ -Pb, c) $\chi$ -As y d) $\chi$ -elementos.	61
<b>Figura 4.6</b> Relación de la variación de la $\chi$ en relación a las concentraciones de elementos y propiedades fisicoquímicas en suelos del DMOT.	63
<b>Figura 4.7</b> Tendencias de los EPT's en relación a la $\chi$ y al contenido de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ en los suelos del DMOT. Relaciones: a) $\chi$ -Fe, b) $\chi$ -Pb, c) $\chi$ -As y d) $\chi$ -elementos.	64
<b>Figura 4.8</b> Tendencias de los EPT's en relación a la $\chi$ y el contenido de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ en los jales del DMG.	65
<b>Figura 4.9</b> Tendencias ordenadas de mayor a menor de $\chi$ con relación a la profundidad para los jales del DMG.	65
<b>Figura 4.10</b> Tendencias de los EPT's con relación a la $\chi$ y el contenido de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ en los jales del DMG.	66
<b>Figura 4.11</b> Tendencias de los EPT's con relación a la $\chi$ y el contenido de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ en los socavones del DMG.	67
<b>Figura 4.12</b> Tendencias de los EPT's en relación a la $\chi$ y el contenido de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ en los socavones del DMG.	67
<b>Figura 4.13</b> Tendencias de los EPT's con relación a la $\chi$ y el contenido de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ en los jales de la localidad de Pozuelos del DMG.	68
<b>Figura 4.14</b> Tendencias de los EPT's con relación a la $\chi$ y el contenido de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ en los jales de la localidad de Burrones del DMG.	69
<b>Figura 4.15</b> Tendencias generales entre Pb, As y Fe en el DMOT y DMG (muestras seleccionadas que son parte de la tendencia de la mayoría de los datos).	70
<b>Figura 4.16</b> Relación $\chi$ -pH-As para el DMOT.	71
<b>Figura 4.17</b> Interpolación de los valores de $\chi$ , pH y As para el DMOT. Se observa que el As muestra una relación de mayor concentración con valores altos de pH.	72
<b>Figura 4.18</b> Relación $\chi$ -pH-Pb para el DMOT.	72
<b>Figura 4.19</b> Interpolación de los valores de $\chi$ , pH y Pb para el DMOT.	73
<b>Figura 4.20</b> Relación $\chi$ -pH-Cr para el DMOT.	73
<b>Figura 4.21</b> Interpolación de los valores de $\chi$ , pH y Cr para el DMOT.	74
<b>Figura 4.22</b> Concentraciones de los EPT's en el DMOT: Cr curva rosa, As curva morada y Pb café con amarillo.	74
<b>Figura 4.23</b> Se observa que las muestras de jales tienen mejor relación $\chi$ -Fe para los jales del DMOT que para los suelos, sin embargo, ambas tendencias son directas.	75
<b>Figura 4.24</b> Relación $\chi$ -pH-As para el distrito de Guanajuato.	76
<b>Figura 4.25</b> Interpolación entre los valores de $\chi$ , pH y As para el distrito de Guanajuato.	76
<b>Figura 4.26</b> Relación $\chi$ -pH-Pb para el distrito de Guanajuato.	77
<b>Figura 4.27</b> Interpolación entre los valores de $\chi$ , pH y Pb para el distrito de Guanajuato.	78
<b>Figura 4.28</b> Relación $\chi$ -pH-Cr para el distrito de Guanajuato.	78
<b>Figura 4.29</b> Interpolación de los valores de $\chi$ , pH y Cr para el distrito de Guanajuato.	79
<b>Figura 4.30</b> Relaciones $\chi$ -Fe del DMG: a) Jales y b) Socavones.	79

<b>Figura 4.31</b> Relación entre la $\chi$ , el pH y las concentraciones de As, Pb y Cr para el distrito de Guanajuato. ....	80
<b>Figura 4.32</b> Ejemplo de curvas termomagnética y de histéresis para la muestra E7H7 del DMOT. ....	85
<b>Figura 4.33</b> Ejemplo de curvas termomagnética y de histéresis para la muestra H4M1 del DMG.....	85
<b>Figura 4.34</b> Mapa de la interpolación de $\chi$ para los jales del DMOT. En color verde las menores susceptibilidades y hacia el blanco rosáceo las mayores.....	86
<b>Figura 4.35</b> Mapa de pendientes del DMOT. En color verde las pendientes más suaves y en rojo las mayores. ....	87
<b>Figura 4.36</b> Mapa de la interpolación del As del DMOT. RE: Riesgo Ecológico; RSH: Riesgo a la Salud Humana; ARC: Límites para Uso Agrícola, Residencial y Comercial. ....	87
<b>Figura 4.37</b> Mapa de la interpolación del Pb del DMOT. Las estrellas de color verde corresponden a los límites ambientales para el uso agrícola, residencial y comercial.....	88
<b>Figura 4.38</b> Mapa de la interpolación del Cr del DMOT. Los triángulos de color rosa corresponden al límite de uso agrícola, residencial y comercial; los triángulos rojos corresponden al Riesgo a la Salud Humana.....	88
<b>Figura 4.39</b> Mapa del muestreo en el distrito minero de Guanajuato (DMG).....	89
<b>Figura 4.40</b> Mapa de pendientes del distrito minero de Guanajuato. De color verde las pendientes más suaves y hacia los tonos rosas las más pronunciadas.....	90



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Datos de las superficies y espesores de las presas de jales del DMOT (Corona-Chávez et al., 2010).....	6
<b>Tabla 1.2</b> Regiones mineras de elementos metálicos. Las regiones mineras se han agrupado de acuerdo al tipo de mineralización, tipo de yacimiento y litología. (Panorama minero del Estado de Michoacán, septiembre del 2011). .....	7
<b>Tabla 1.3</b> Regiones mineras de elementos metálicos del Estado de México. Las regiones mineras se han agrupado de acuerdo al tipo de mineralización, tipo de yacimiento y litología. 9	
<b>Tabla 1.4</b> Regiones mineras del Estado de Guanajuato, con sus respectivas zonas o distritos mineros, sustancia que se explota y tipo de yacimiento (Panorama Minero del Estado de Guanajuato, septiembre del 2011). .....	14
<b>Tabla 1.5</b> Cuatro localidades reportadas por Ramos–Arroyo y Siebe–Grabach, 2006, con diversas variables de descripción geoquímica de las 4 presas de jales. Nota: *Czo: cuarzo, cal: calcita, feld: feldespato y plagioclasas, cao: caolinita, clor: clorita, pi: pirita, FeOx: óxidos e hidróxidos de Fe. ....	16
<b>Tabla 1.6</b> Reporte de máximas concentraciones según la norma NOM-157-SEMARNAT/SSA1-2009 para realizar pruebas de movilidad de un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. ....	17
Tabla 1.7 Resumen de la concentración límite de EPT's para el consumo humano (RSH) y riesgo ecológico (RE). Tomada de Gutiérrez-Ruiz et al., 2007 (Fuente: PROFEPA 2000).....	18
Tabla 1.8 Concentraciones de referencia totales (CR <sub>T</sub> ) por tipo de uso de suelo según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. ....	18
Tabla 2.1 Comportamiento magnético de algunos minerales magnéticos. (De Rivas-Ortiz, 2006).....	24
Tabla 2.2 Algunos minerales y su valor de susceptibilidad magnética (resumido del manual Environmental Magnetic Susceptibility, Bartington MS2 System).....	25
Tabla 2.3 Diversos intervalos característicos de algunas temperaturas de Curie y/o Néel reportado para algunos minerales magnéticos. (Tabla resumida de Rivas-Ortiz, 2006).....	29
Tabla 3.1 Relación de las 11 muestras tomadas en el segundo muestreo de campo realizado en Tlalpujahua. ....	41
Tabla 3.2 Descripción del muestreo realizado en Guanajuato. ....	42
Tabla 3.3 Escala de pH según la NOM-021-RECNAT-2000.....	51
Tabla 4.1 Resumen estadístico del DMOT. Pb y As presentan sesgo y curtosis estandarizados (no están en color rojo), esto quiere decir que la muestra proviene de una distribución normal (rango de normalidad, -2 a +2). Al hacer las comparaciones como muestras pareadas, los datos reportados como fuera del rango de procedencia de una distribución normal siguen en la misma posición. ....	52
Tabla 4.2 Correlaciones del DMOT. El rango de los coeficientes de correlación va de -1 a +1 (fuerza de la relación lineal entre las variables). El segundo número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas; < 0.05 indican correlaciones con un nivel de confianza del 95.0%. ....	53

Tabla 4.3 Resumen estadístico del DMG. Pb y As presentan sesgo y curtosis estandarizados (no están en color rojo), esto quiere decir que la muestra proviene de una distribución normal (rango de normalidad, -2 a +2). .....	54
Tabla 4.4 Correlaciones del DMG. El rango de los coeficientes de correlación va de -1 a +1 (fuerza de la relación lineal entre las variables). El segundo número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas; < 0.05 indican correlaciones con un nivel de confianza del 95.0%. .....	54
Tabla 4.5 Datos de las mediciones realizadas a los jales del DMOT. ....	57
Tabla 4.6 Datos de las mediciones realizadas a los suelos del DMOT. ....	62
Tabla 4.7 Datos de las mediciones realizadas a los jales del DMG. ....	64
Tabla 4.8 Datos de las mediciones realizadas a los socavones del DMG. ....	66
Tabla 4.9 Datos de las mediciones realizadas en la terraza alta en la localidad de Pozuelos en el DMG. ....	68
Tabla 4.10 Datos de las mediciones realizadas en la localidad de Burrones en el DMG. ....	68
Tabla 4.11 Muestras anómalas y dentro de la tendencia en la relación $\chi$ -Fe del DMOT. Se reportan 9 de las muestras anómalas de la relación $\chi$ vs $\text{Fe}_2\text{O}_3$ y dos muestras que caen dentro de la tendencia lineal de la relación mencionada, para el DMOT. ....	81
Tabla 4.12 Muestras anómalas y dentro de la tendencia en la relación $\chi$ -Fe del DMG. Se reportan 7 de las muestras anómalas de la relación $\chi$ vs $\text{Fe}_2\text{O}_3$ y una muestra que caen dentro de la tendencia lineal de la relación mencionada, para el distrito de Guanajuato. ....	82
Tabla 4.13 Cambios de las diversas fases minerales reportadas. (Rivas-Ortíz, 2006). ....	83
Tabla 4.14 estimación modal mineralógica por microscopía de luz reflejada de los minerales opacos: óxidos y sulfuros de 6 perfiles de jales del DMOT. (Corona-Chávez et al., 2010). ....	84
Tabla 4.15 Forma de las curvas de histéresis medidas para el DMOT y el DMG. ....	84

## RESUMEN

El valor de la susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) en los materiales geológicos depende principalmente de la cantidad de los materiales ferro – ferri magnéticos en una muestra (Verosub y Roberts, 1995). Así, entre otra información, las mediciones de susceptibilidad magnética proporcionan una estimación rápida y sencilla sobre los contenidos de hierro (concentración de Fe) en una muestra. Por otra parte, es conocida la afinidad de ciertos elementos potencialmente tóxicos (EPT's) con el Fe. Esta afinidad es aprovechada para la identificación y estimación de la concentración de los EPT's en un depósito de desechos mineros (jales).

En este trabajo se ha observado que los valores de  $\chi$ , pH y concentración elemental están fuertemente relacionados. Mientras que la conductividad eléctrica (CE) reporta cambios en la geoquímica de los jales. Se propone un método que permite estimar la concentración de Pb y As de forma indirecta, rápida y económica utilizando estos parámetros determinados in situ y en laboratorio para la identificación de regiones con valores altos de concentración y, en consecuencia, riesgosos para la salud.

Se presentan los datos de los estudios realizados en los distritos mineros de Tlalpujahuá - El Oro (DMOT) y Guanajuato (DMG). En el DMOT se trabajó por separado la relación  $\chi$ -Fe de jales y suelos; mientras que en el DMG se separó jales de socavones. Esto, debido a las discrepancias presentes en las relaciones  $\chi$  -Fe, lo cual, permitió definir los rangos de interés de  $\chi$  asociados a las altas concentraciones de EPT's.

Los valores de susceptibilidad magnética son relacionados con las curvas termomagnéticas y de histéresis para reconocer las principales fases magnéticas asociadas a los depósitos de jales y, así brindar una explicación a las discrepancias en las relaciones  $\chi$  -Fe.

Este trabajo fue apoyado con recursos del proyecto PAPIIT-IA102413.

## 2. Introducción

### 2.1. Descripción del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua (DMOT)

El Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua (DMOT) es parte de la cuenca hidrológica del Río Lerma Santiago; se localiza en el Cinturón Volcánico Transmexicano.

De acuerdo a la carta geológico-minera El Oro de Hidalgo E14-A16 del Estado de México y Michoacán, en el Distrito Minero El Oro los yacimientos minerales son vetas hidrotermales del tipo de relleno de fisuras, que se emplazan en las secuencia volcanosedimentaria del Terreno Guerrero, cuya columna geológica comprende el Cretácico inferior con litología de metaandesita, metavolcanosedimentaria, metacaliza-metalutita y un pórfido sienítico como roca ígnea intrusiva. La principal veta, San Rafael, tiene un rumbo de NW 30° con echado de 75° al SW, con una longitud de 2km y espesor promedio de 25m, en la actualidad esta veta se encuentra totalmente explotada, la mineralización consiste en cuarzo cristalino y calcita, en menor proporción se encuentra siderita, dolomita y rodocrosita. La mineralización económica no tiene una distribución uniforme sino que se encuentra en clavos o bolsadas que pueden corresponder a sigmoides de deformación. En Este yacimiento se explotó hasta 190 gr/ton de Au. Otras vetas son La Descubridora, Chihuahua y Victoria. También dentro de este distrito se encuentra incluida el área mineralizada de Tapaxco que consta de las obras mineras del tiro la Mesa y el Socavón Presa del Salto, ambas inaccesibles, presumiblemente con mineralización argentífera.

La misma carta E14-A16, indica que en el Distrito Minero de Tlalpujahua los yacimientos minerales también son vetas hidrotermales emplazadas en la misma secuencia volcanosedimentaria (Terreno Guerrero), la de mayor importancia es la Veta Coronas con rumbo N17°W, echado de 887° al NE, extensión de 3.5 km y potencia promedio de 5 m. La mineralización consiste en cuarzo cristalino, con sulfuros de plata, pirita y óxidos de fierro; se llegó a explotar con leyes 12 gr/ton de Au y 500 gr/ton de Ag. También como parte de este Distrito se tiene la zona mineralizada de Estanzuela, la primera representada por vetas de forma irregular, en la secuencia volcanosedimentaria, donde las principales estructuras son Santa María y Las Ánimas con vetas de cuarzo de espesores variables de 1.5 a 5.0 m y rumbo N20°W y, en la segunda, La Andesita Anganguero con mineralización disseminada y en vetillas de sulfuros de fierro.

En este distrito, los minerales se han extraído por más de 5 siglos. Durante la época de la colonia, la empresa “Real de Minas de Tlalpujahua” explotaba las vetas Coronado y Borda. Los métodos utilizados para la explotación fueron el método de patio o amalgamación, caracterizado por el uso

de sal y Hg. Los residuos de jales fueron depositados en las áreas de los alrededores de las minas y fueron llamados *Granjas de Beneficio*. La descarga de los desechos de los jales relacionados a éste método fueron dispersos en volúmenes relativamente pequeños, por lo tanto, no formaron acumulaciones importantes y pueden aparecer ahora relacionados a perturbaciones naturales por intemperismo de la región DMOT por lluvias.

Seguido a esto, hubo 3 periodos de alta actividad (Corona-Chávez et al., 2010):

- i) 1820's: los británicos aportaron dinero y tecnología para la rehabilitación de minas, las cuales fueron destruidas y abandonadas durante la guerra de Independencia.
- i) 70 años después comienza el régimen de Porfirio Díaz y el periodo post-revolucionario (1876-1911, 1914-1937) cuando las vetas de Au más ricas fueron descubiertas en el "Cerro Somera". Desde el año de 1898 fue aplicado el método de cianuración y desde 1902, fue aplicado como método industrial (ganancias de 99%Au y 56%Ag por tonelada comparadas con las ganancias de los métodos de beneficio y patio). Los primeros desechos generados en ésta etapa no fueron acumulados sino vertidos en el Río Tlalpujahuá; pero los daños al Río eran observables por lo que, en 1902 la Hacienda Guadalupe fue establecida como primer contenedor de jales en el DMOT. Entre los años 1904-1938: producción de los jales del DMOT principalmente por la compañía francesa "Las Dos Estrellas".
- ii) 1938-1959: cambio de nombre de la compañía francesa a "Cooperativa Minera y Obrera Dos Estrellas"; la cual, utilizó el método de flotación, con mejor producción metalúrgica y menos contaminación. Pero a partir de esta fecha la producción decayó por diversas razones como: aumento en costos para operación a mayores profundidades, reducción en los valores de Au en las vetas, incremento de las entradas de valor de producción y una fuerte depresión en el mercado internacional para metales de Au. En el año de 1959, se realiza el cierre definitivo de la mina (Uribe Salas, 2008; 2009).

De los estudios mencionados anteriormente, se sabe que el DMOT es un posible depósito epitermal de baja sulfuración, lo cual quiere decir que en este depósito la mineralización ocurrió dentro de 1 a 2 km de profundidad desde la superficie terrestre y se depositó a partir de fluidos hidrotermales calientes (fluidos  $>100^{\circ}\text{C}$  hasta unos  $320^{\circ}\text{C}$ ); además de ser fluidos reducidos y con un pH cercano a 7. En estos depósitos, el azufre se presenta como  $\text{S}^{-2}$  en forma de  $\text{H}_2\text{S}$  (reducido). Los fluidos de baja sulfuración (BS) son una mezcla de aguas de lluvias (aguas meteóricas) que han percolado la superficie y aguas magmáticas (derivadas de una fuente de roca fundida a mayor profundidad en la Tierra) que han ascendido hacia la superficie. Los metales preciosos han sido transportados en solución como iones complejos (en general bi-sulfurados a niveles epitermales; clorurados a niveles más profundos) y para fluidos de baja sulfuración la precipitación de metales ocurre cuando el fluido hierve al acercarse a la superficie. Éstos fluidos circulan hacia la superficie a través de fracturas en las rocas y la mineralización a menudo se presenta en esos conductos (mineralización controlada

estructuralmente), pero también pueden circular por niveles de rocas permeables y eventualmente mineralizar ciertos estratos. Los fluidos de BS generalmente forman vetas de relleno con metales preciosos o series de vetas/vetillas más finas, denominadas “stockwork” o “sheeted-veins”.

El método de minería y procesamiento del mineral son también factores importantes en la economía del depósito. Dado que los depósitos epitermales se forman a profundidades de menos de 2km, muchos son factibles de explotar a tajo abierto, lo que es menos costoso y permite la explotación de leyes menores. Los depósitos más profundos o controlados estructuralmente (vetas) pueden explotarse solamente por métodos subterráneos más caros y requieren de leyes mayores para constituir yacimientos económicos.

Los métodos de recuperación para el oro epitermal pueden involucrar flotación y cianuración. El costo del procesamiento aumenta si el oro está contenido en minerales que son difíciles de procesar, tales como la arsenopirita.

Por otro lado, el oro puede presentarse libre o asociado a otras fases minerales, los sulfuros en particular. Sus dimensiones varían del centímetro al micrómetro. La escasa variedad de la mineralogía del oro y alguna de sus propiedades físicas (densidad muy elevada, afinidad con el mercurio formando amalgamas, flotabilidad natural, solubilidad en las soluciones de cianuro), conducen al desarrollo de 3 grandes técnicas de tratamiento: amalgamación, flotación y cianuración; métodos de recuperación empleados en el DMOT (ver figura 1.1) y en Guanajuato:

- Método de Patio o Amalgamación (época de la colonia): es una técnica metalúrgica antigua, que permite recuperar el oro libre mediante el uso del mercurio, formando una amalgama por contacto del Hg con el Au libre, tiene sin embargo muchas implicancias ambientales y ecológicas por la toxicidad del mercurio.
- Cianuración: es una técnica metalúrgica que busca convertir el Au (insoluble en agua) en aniones metálicos solubles en agua. El mineral es triturado (utilizando maquinaria de molienda), y puede ser más enriquecido por flotación de espuma o por fuerza centrífuga de concentración, en función de la mineralogía de la mena. El lodo mineral alcalino puede ser combinado con una solución de cianuro de Na, K o Ca.

La propiedad del oro de disolverse en cianuro, ha hecho de ésta la técnica de tratamiento la más habitual en la práctica.

Algunos minerales de plomo, arsénico y antimonio son solubles en cianuro, los cuales hacen más lenta la cinética de la extracción del oro y, en el caso del arsénico, este vuelve a aparecer con la precipitación del oro sobre el polvo de zinc y se genera  $AsH_3$ , que es un gas muy tóxico. Por tanto, en presencia de arsénico y antimonio, el oro es en general concentrado por flotación y tostado.

Debido a la tendencia de los sulfuros de hierro a descomponerse con la cianuración, suelen afectar a la cinética de la extracción. La pirita es poco soluble, la pirrotita en cambio es muy soluble en cianuro sobre todo a altas concentraciones de este (>100ppm).

- Flotación: proceso fisicoquímico de tres fases (sólido-líquido-gas) que tiene por objeto la separación de especies minerales mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a burbujas de aire.

En la figura 1.1 se puede observar las diferentes etapas de extracción de mineral en el DMOT a lo largo de 400 años, así como la producción de la mina. Se observa que es hasta el siglo XX que aumenta drásticamente la producción minera y con ella, un cambio en el método de extracción. La mayor parte del material ha sido extraído con el método de Cianuración.

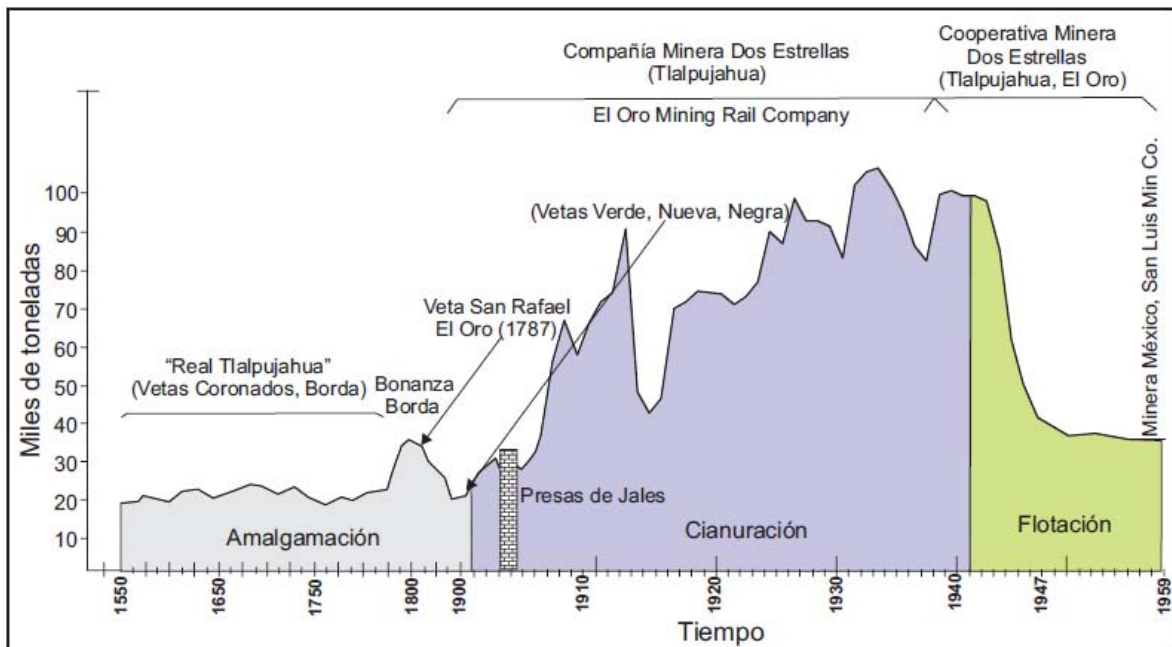


Figura 1.1 Etapas y métodos de explotación de Au y Ag empleados en el DMOT a lo largo de su historia productiva. Datos compilados de Uribe-Salas, 2008 y del Archivo del Museo Mina del Siglo XIX, Dos Estrellas (Corona-Chávez et al., 2010).

Es importante mencionar, que como resultado de la actividad minera se originaron los pueblos de Tlalpujahua (S.XVI) y El Oro (S.XVIII) con una distancia entre ambos de 8 km.

En la actualidad hay 4 vertederos y 6 jales históricos: El Carmen, Cedros y Dos Estrellas en Tlalpujahua; CONALEP 1 y 2, y Tiro México en El Oro (Corona-Chávez et al., 2010). Ver tabla 1.1.

Jales	Área (ha)	% del DMOT
<b>Los Cedros</b>	39.42	63.28
<b>Dos Estrellas</b>	1.49	2.39
<b>Tiro México</b>	7.77	12.47
<b>CONALEP</b>	11.39	18.29
<b>El Carmen</b>	2.22	3.56
<b>TOTAL</b>	62.29	100

Tabla 1.1 Datos de las superficies y espesores de las presas de jales del DMOT (Corona-Chávez et al., 2010).

Dentro de la mineralogía reportada por Corona-Chávez et al., 2010 se tiene cuarzo (>42%), arcilla (9-19%) y calcita (11-12%), además de Pirita ( $\text{FeS}_2$ ), Argentita ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), Galena ( $\text{PbS}$ ), Goethita [ $\text{FeO}(\text{OH})$ ], Ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), Calcopirita ( $\text{FeCuS}_2$ ), Pirrotita [ $\text{Fe}(1-x)\text{S}(0-0.17)$ ]. Entre los elementos mayores se presentan Si (56-92%), Al (5-13%), Fe (3-5%), Ca(2.5-5%), K (1-2%).

Por otro lado, la concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) se presentan por: As (3-83.9ppm), Cu (7.4-808.6 ppm), Pb (16.5-317.5 ppm), Zn (63.8-548.2 ppm).

Entre los años noventa del siglo XIX y la primera década del presente, se descubrieron los depósitos más ricos de oro en el distrito El Oro-Tlalpujahua; el hallazgo en este distrito de la Veta Negra y la Veta Verde entre otras, lo transformaron en campo fértil para la inversión de grandes capitales y el desarrollo de tecnología minera adecuada. De esta manera, el distrito minero El Oro-Tlalpujahua se colocó a la cabeza de la industria minero-metalúrgica de minerales preciosos, durante el Porfiriato.

En el caso de Tlalpujahua, en 1959 la compañía Las Dos Estrellas cesó sus actividades quedando el distrito prácticamente abandonado.

En el caso del Estado de México, la minería no metálica se ha convertido en el presente siglo en la de mayor importancia en el estado, alcanzando en los últimos años un crecimiento sostenido hasta del 20% anual, según los datos del Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM, desde 2000). Los minerales no metálicos que más contribuyeron al PIB minero del estado fueron materiales pétreos como arena y grava, caliza, tezontle, y tepetate. Otros, de menor importancia, son la dolomía, tepojal, arcillas y diatomita.

Se consultaron los panoramas mineros tanto del estado de México como del estado de Michoacán y del Estado de México, publicados por la Secretaría de Economía en septiembre 2011. Esto con el fin de identificar las regiones mineras, zonas mineros (distritos), sustancias y tipos de yacimiento de



ambos estados. En el estado de Michoacán es de nuestro interés la región minera de Tlalpujahua (ver tabla 1.2 y figuras 1.2 y 1.3).

<b>Región Minera</b>	<b>Zona o Distrito Minero</b>	<b>Substancia</b>	<b>Tipo de Yacimiento</b>
<b>Tlalpujahua</b>	1.- Tlalpujahua 2.- Angangueo	Au, Ag	Hidrotermal
<b>Tzitzio</b>	3.- Real de Oztumatlán 4.- Tzitzio	Au, Ag, Sb	Hidrotermal
<b>Tuzantla</b>	5.- TiámARO	Au, Ag, Cu	Hidrotermal
<b>El Limón de Papatzingán Huetamo</b>	6.- Tzintzinguaron	Au, Ag	Hidrotermal
	7.- El Baztán		
	8.- San Ignacio		
	9.- San Lucas 10.- Tiquicheo	Cu, Au, Ag, Zn, Pb	Hidrotermal
<b>Villa Madero</b>	11.- San Diego Curucupaceo	Au, Ag, Pb, Cu, Zn	Hidrotermal
<b>La Huacana</b>	12.- Inguarán	Cu, Au, W	Hidrotermal
	13.- La Verde		
<b>Arteaga</b>	14.- Las Truchas	Fe, Ag, Au	Hidrotermal
	15.- Los Pozos		
	16.- Cerro Bola		
<b>El Ahijadero</b>	17.- El Ahijadero	Au	Hidrotermal
<b>Las Playas</b>	18.- El Jovero	Au, Fe, Ag	Hidrotermal
	19.- El Costeño		
<b>Coalcomán</b>	20.- La Minita	Cu, Ag, Zn, Fe, Cu,	Hidrotermal
	21.- Arroyo Seco	Ag, Pb, Zn	Vulcanogénico
<b>Aguila</b>	22.- Aguila	Fe, Ag, Au, Cu, Mn	Hidrotermal
	23.- San Pedro		

Tabla 1.2 Regiones mineras de elementos metálicos. Las regiones mineras se han agrupado de acuerdo al tipo de mineralización, tipo de yacimiento y litología. (Panorama minero del Estado de Michoacán, septiembre del 2011).

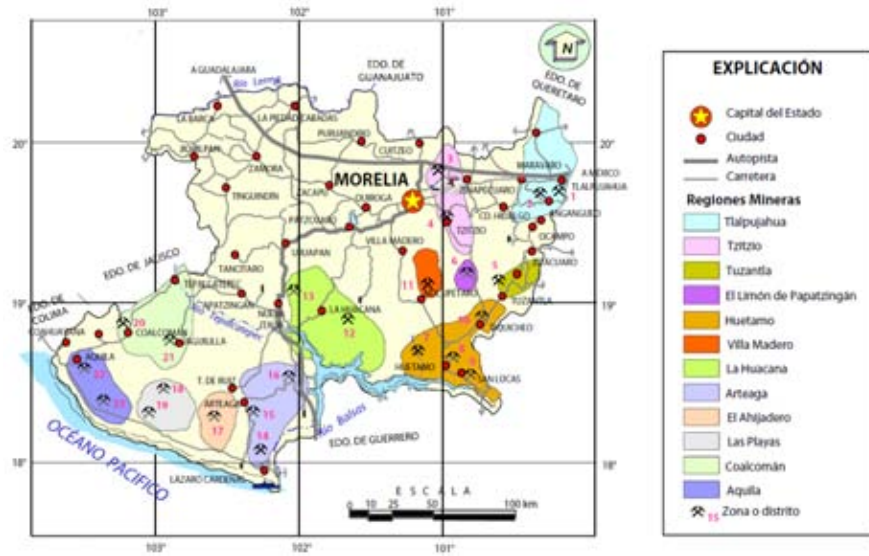


Figura 1.2 Regiones mineras de elementos metálicos del Estado de Michoacán. (Panorama minero del Estado de Michoacán, septiembre del 2011)

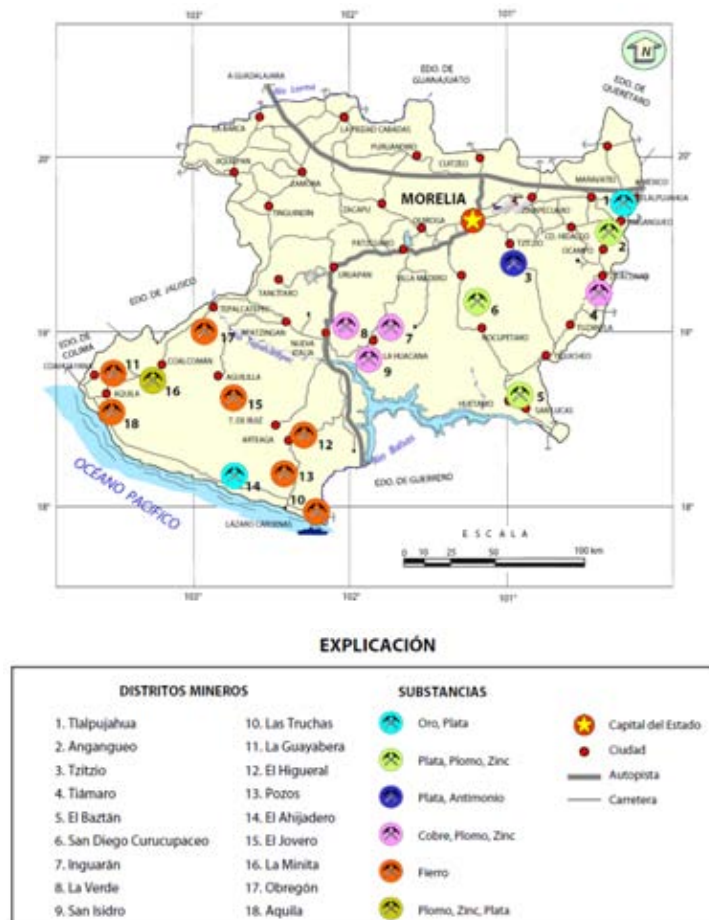


Figura 1.3 Distritos Mineros más importantes de elementos metálicos del Estado de Michoacán. (Panorama minero del Estado de Michoacán, septiembre del 2011).

En el Estado de México, es de nuestro interés el distrito minero de El Oro (ver tabla 1.3 y figuras 1.4 y 1.5).

Región Minera	Mineralización	Tipo de Yacimiento	Distritos y Zonas Mineras
1.- El Oro-Tlalpujahua	Au, Ag	Vetas y stockwork	El Oro-Tlalpujahua
2.- Temascaltepec	Au, Ag, Pb, Cu, Zn, Cd	Vetas y mantos de sulfuros masivos	Temascaltepec, Zacualpán, Sultepec, Zacazonapán y Tlatlaya
3.- Ixtapan del Oro	Au, Ag	Vetas	Ixtapan del Oro

Tabla 1.3 Regiones mineras de elementos metálicos del Estado de México. Las regiones mineras se han agrupado de acuerdo al tipo de mineralización, tipo de yacimiento y litología.

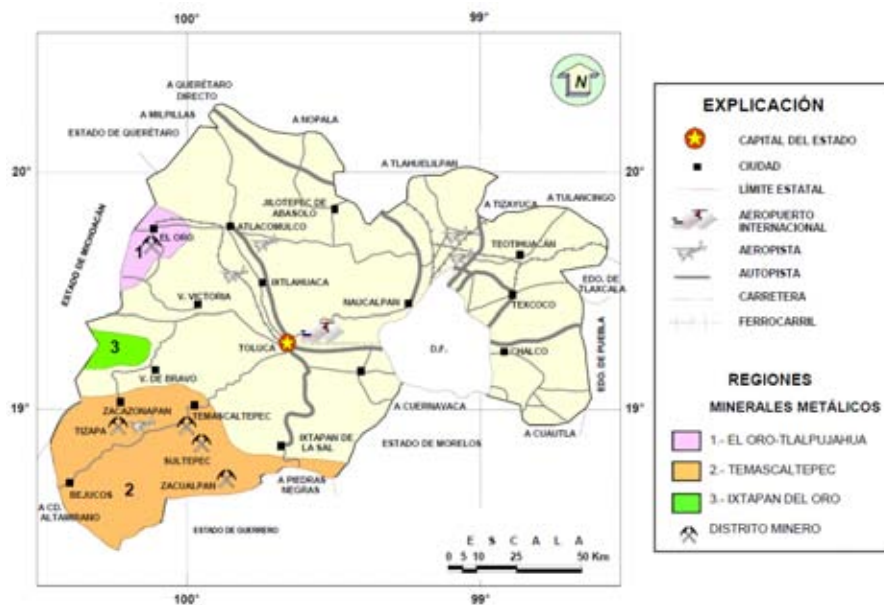


Figura 1.4 Regiones mineras de elementos metálicos del Estado de México (Panorama Minero del Estado de México de la Secretaría de Economía, septiembre del 2011).

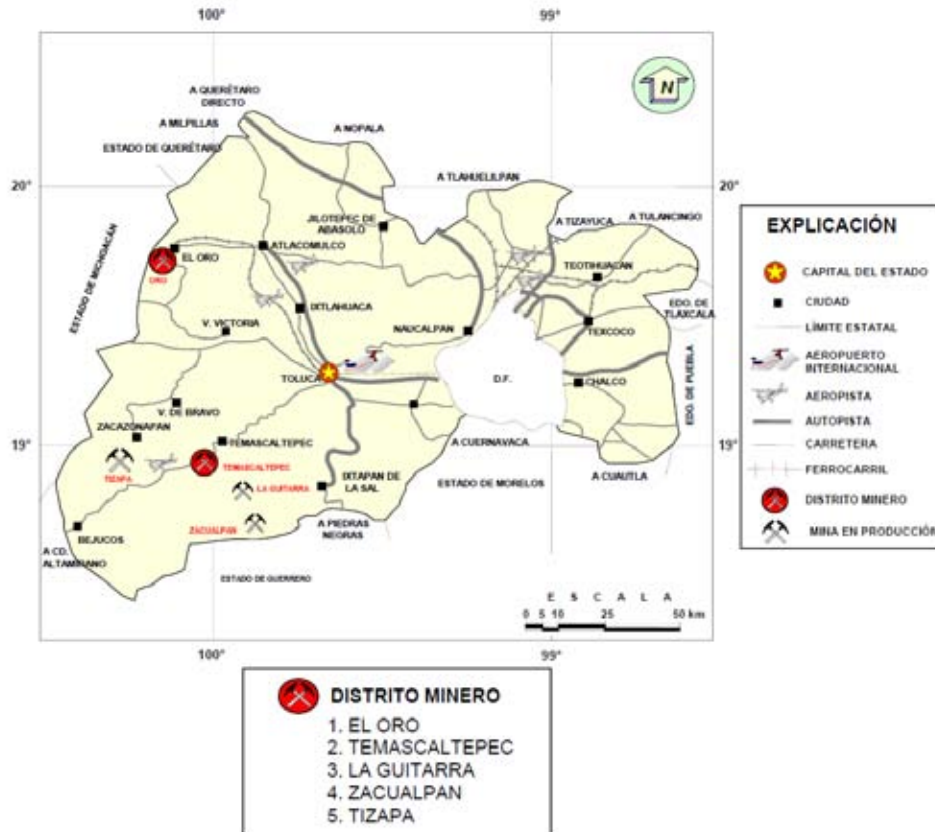


Figura 1.5 Distritos mineros más importantes de elementos metálicos del Estado de México (Panorama Minero del Estado de México de la Secretaría de Economía, septiembre del 2011).

De acuerdo al reporte de la compañía Candente Gold Corp., de los distritos mineros de El Oro-Tlalpujahua, publicado en Noviembre de 2013, ésta compañía ha estado explorando ambos distritos desde 2007; y reportan que la mayor ganancia de la Compañía se encuentra en la propiedad de Au y Ag de baja sulfuración El Oro, la cual comprende ambos distritos mineros separados entre sí por 5kms, los cuales comprenden al menos 20 vetas de metales preciosos explotadas y con más de 57 vetas conocidas por datar, habiendo producido 6.4 millones de onzas de oro y 74 millones de onzas de plata de tan solo dos de las vetas conocidas. Una de las vetas más productivas es la llamada Veta San Rafael que históricamente ha producido más de 4 millones de onzas de oro y 44 millones de onzas de plata, con grados de minado promedio entre 10 a 12 gr/ton de Au y 120 a160 gr/ton de Ag, hasta >50 gr/ton de Au y >500 gr/ton de Ag (Candente Gold Corp., NR003 April 6, 2010).

## 1.2 Descripción del Distrito Minero de Guanajuato (DMG)

El estado de Guanajuato se encuentra ubicado en la porción central de la República Mexicana y se localiza entre las coordenadas geográficas al norte 21°52', al sur 19°55' de latitud norte; al este 99°41' oeste 102°09' de longitud oeste. En el territorio estatal se localizan tres provincias fisiográficas. En la parte norte-central, la Mesadel Centro; en la porción Nororiental, la Sierra Madre Oriental y en la parte centro-sur, el Eje Neovolcánico.

El Distrito Minero de Guanajuato se localiza en la ciudad del mismo nombre y es considerado uno de los distritos más grandes del mundo pues tiene una longitud de aproximadamente 20km, además de un ancho aproximado de 16km, es decir, unos 320km<sup>2</sup> de área.

Geológicamente, es considerado un sistema epitermal de baja sulfuración, al igual que el DMOT. De estudios anteriores (Mendoza-Amézquita et al., 2006) se conocía un valor de pH de 7.92, mientras que de estudios más recientes en la región (Ramos-Gómez et al., 2012) se determinó que los jales de este distrito tenían en su mayoría un pH alcalino entre 7-8.

Por otro lado, otros estudios (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006) reportan que se encontraron 31 depósitos de jales en el Distrito de Guanajuato, los cuales ocupan un área de 81.9 hectáreas y representan 40.3 millones de toneladas. Hay once depósitos de jales de cianuración construidos entre 1905 y 1946, de los cuales cuatro están fuertemente erosionados. Hay veinte presas de jales de flotación 'bulk', cuyos depósitos presentan una clasificación textural: las áreas proximales a la cortina de retención son de textura arenosa, tienen baja capacidad de retención de humedad y están bien aireadas, mientras que las zonas distales a la cortina tienen textura arcillosa, baja permeabilidad y baja capacidad de aireación, lo que permite la acumulación de agua en tiempo de lluvias y favorece condiciones reductoras. Todos los jales tienen pH alcalino, excepto los horizontes arenosos de un sitio con 75 años de abandono (Pozuelos) con pH de 5, que indica que en condiciones bien aireadas y drenadas se presenta acidificación local. Además, de que las concentraciones de metales en los jales son de medias a altas según normas de diferentes países: 37 a 429 mg/kg de Cu, 13 a 178 mg/kg de Pb y 36 a 448 mg/kg de Zn. El origen geológico de los jales determina las concentraciones de metales, ya que residuos provenientes de menas tipo 'stockwork' tienen menores concentraciones de metales que los extraídos de vetas o brechas. Los jales de flotación presentan una gran variabilidad espacial en sus contenidos de metales relacionada con la clasificación textural dentro del depósito, de tal manera que las zonas proximales tienen concentraciones de metales más bajas que las distales.

Según la carta geológico-minera del Distrito Minero Guanajuato, F14-C43, las rocas reconocidas en la región tienen edad desde el Jurásico hasta el Reciente, y se dividen en dos grandes secuencias:

una volcanosedimentaria que pertenece a un arco volcánico submarino del Jurásico superior-Cretácico inferior llamado Arco de Guanajuato, que se distribuye en la parte sur-poniente de la carta y una cubierta volcánica Cenozoica que ocupa el resto del área. La primera San Atón de las Minas. Se denomina informalmente Formación Esperanza; la base de la unidad no aflora, pero se infiere un espesor mayor a los 500 m. De Mendoza-Amézquita et al., 2006 se sabe que ésta formación es la más antigua del distrito y está representada por lutitas, calcilitas y areniscas de estratificación delgada con intercalaciones de derrames basálticos y andesíticos. El conglomerado rojo de Guanajuato descansa discordantemente sobre la formación Esperanza y está constituida por una secuencia de areniscas en su base a conglomerado en la parte superior, compuesta principalmente por fragmentos de lutita, volcanoclastos, arenisca y granito cementados en una matriz arcillosa oxidada. La Formación Loseros descansa concordantemente sobre la formación Guanajuato, consiste en una toba volcanoclástica de composición riolítica, de estratificación delgada a media. La Formación La Bufa descansa discordantemente sobre la formación Loseros y está constituida por tobas e ignimbritas de composición riolítica de color rosa a rojizo.

La Formación Calderones descansa discordantemente sobre la Formación La Bufa; se encuentra constituida principalmente por tobas andesíticas de tipo lapilli, de color verde. La Formación Cedros está formada por andesitas de textura porfídica.

La mena son sulfuros y sulfosales que se presentan como bandeamiento en contacto con las rocas encajonantes o en granos diseminados en la ganga, tales como polibasita [(Ag, Sb, Cu, Se, As) $S_2$ ] con un tamaño de 10-100  $\mu\text{m}$ ; plata nativa; una solución sólida de acantita-aguilarita-neumanita (Ag $S_2$ -SeAg $S_2$ -Se $S_2$ ) y electrum. La pirita (Fe $S_2$ ) presenta una disolución desigual en todas las vetas en concentraciones de 1-10%.

La galena (PbS), la calcopirita (CuFe $S_2$ ) y la esfalerita (ZnS) se encuentran juntas a lo largo del distrito. Además se presentan otros minerales metálicos en concentraciones menores: guanajuatita (Bi $_2$ Se $_2$ S), pirrotita (Fe $_{1-x}$ S), marcasita (Fe $S_2$ ), tetraedrita [(cu,Fe) $_{12}$ Sb $_4$ S $_{13}$ ] y arsenopirita (FeAsS). Además, de acuerdo a la carta geológico-minera del Distrito Minero Guanajuato, F14-C43, en el Distrito Guanajuato, destacan las fallas normales con rumbo general noroeste-sureste a las que se asocian estructuras mineralizadas como son Veta Madre, La Leona, El Cubo, Villalpando, La Luz y Dolores, principalmente (ver figura 1.6).

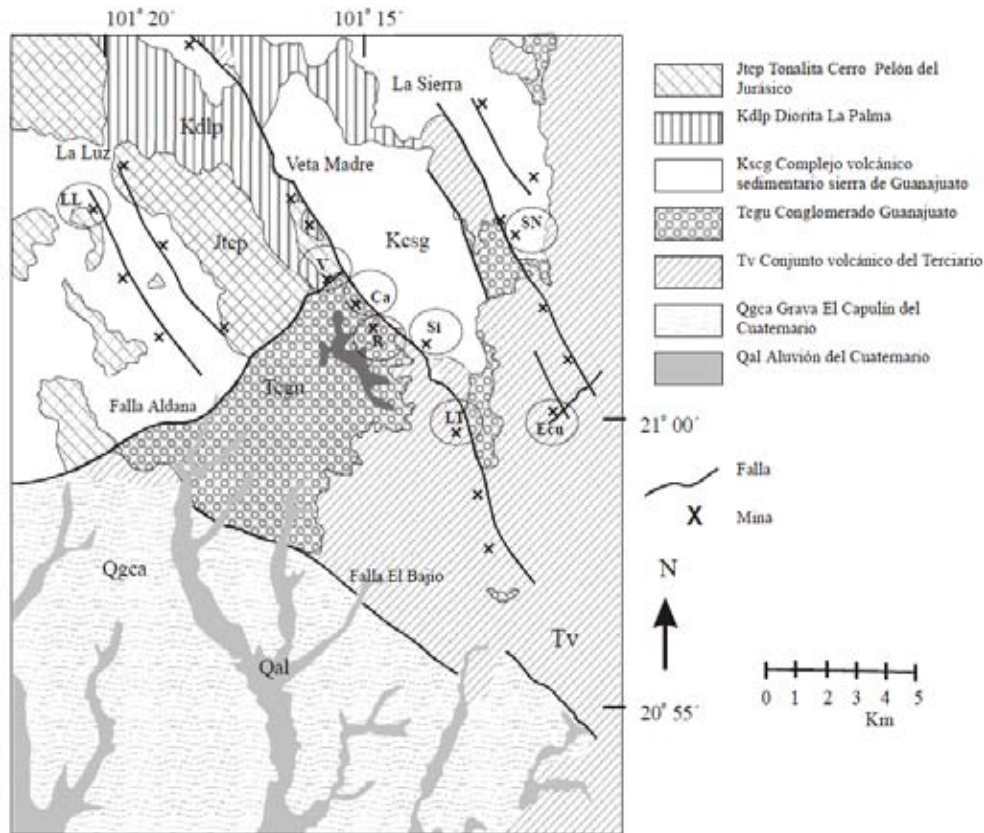


Figura 1.6 Bosquejo geológico del Distrito Minero de Guanajuato. (Ramos-Arroyo y Martínez-Arredondo, *Modelo conceptual de la evolución de geoquímica de los residuos mineros “La Valenciana”, Guanajuato, México*).

La mineralización económica presente en los distritos es oro y plata principalmente, así como plomo, zinc y cobre. En el distrito de Guanajuato se ha reconocido tres sistemas de vetas: Vetas de la Luz, en donde destacan las estructuras de La Luz, Bolañitos, La Joya, Plateros, El Puertecito y San Cayetano. El segundo es el sistema de Veta Madre, a la que se le asocian otras vetas al alto como las de El Nopal y San Prospero; en este sistema se tienen las minas de Valenciana, Rayas, San Vicente, Sirena y las Torres. Por último se tiene el sistema de Vetas de la Sierra entre las que destacan Villalpando, El Cubo, San Nicolás, La Asunción, etc.

Hasta la actualidad, el distrito minero de Guanajuato continua produciendo mineral auroargentífero el cual fue en 2010 de 678kg de oro y 55,377kg de plata, mediante la operación de tres plantas de beneficio de las compañías mineras: Endeavour Silver Corp.; Great Panther Silver LTD y Gamon Gold Inc.

En el Estado de Guanajuato, se distinguen 4 regiones mineras con sus respectivas zonas o distritos mineros en la explotación de minerales metálicos (ver tabla 1.4, y figuras 1.7 y 1.8).

	REGIÓN MINERA	ZONA O DISTRITO MINERO	SUBSTANCIA	TIPO DE YACIMIENTO
I	Guanajuato- Sierra León- San Antón de Las Minas- La Saucedada	1.- Guanajuato 2.- San Antón de Las Minas 3.- Sierra de León 4.- La Saucedada	Au, Ag, Pb, Zn, Cu	Hidrotermal
II	Xichu	Xichu	Pb, Zn, Cu, Ag	Mantos, Chimeneas, rellenos de fracturas con diseminación
III	Pozos- Victoria	1.- Pozos 2.- Victoria	Au, Ag, Pb, Zn	Vetas
IV	Providencia- Sierra El Cubo	1.- Providencia 2.- Sierra El Cubo	Au, Ag, Sn, Hg	Vetas

Tabla 1.4 Regiones mineras del Estado de Guanajuato, con sus respectivas zonas o distritos mineros, sustancia que se explota y tipo de yacimiento (Panorama Minero del Estado de Guanajuato, septiembre del 2011).

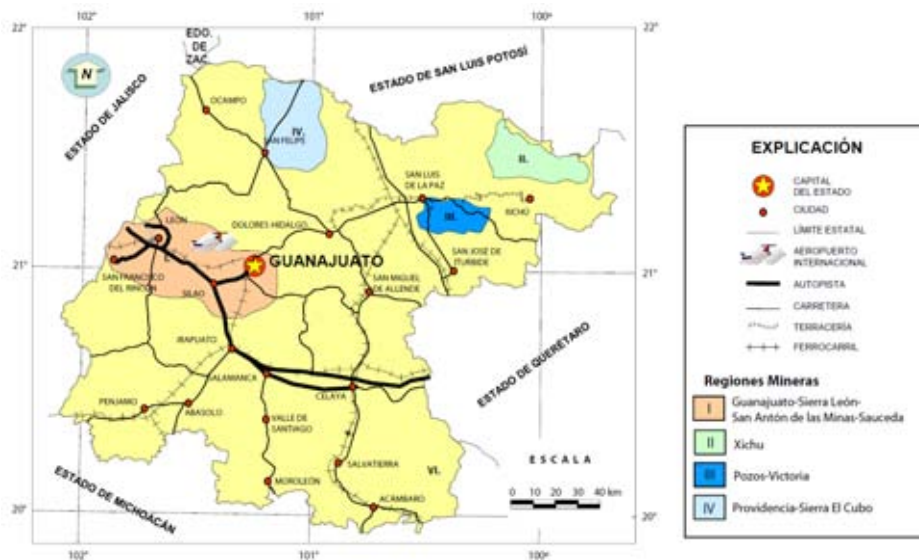


Figura 1.7 Regiones mineras de elementos metálicos del Estado de Guanajuato (Panorama Minero del Estado de Guanajuato, septiembre del 2011).



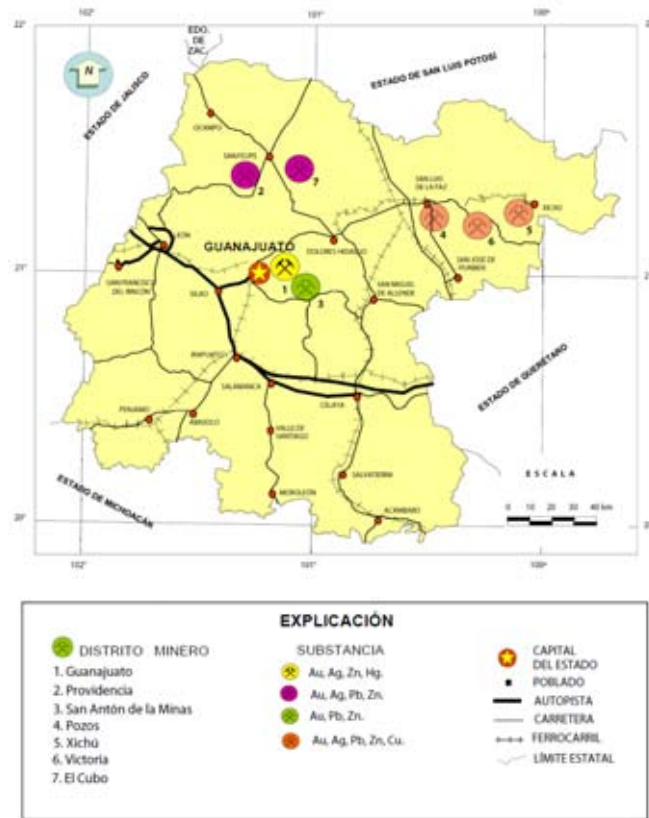


Figura 1.8 Distritos mineros de elementos metálicos más importantes del Estado de Guanajuato. (Panorama Minero del Distrito Minero de Guanajuato, septiembre del 2011).

Del estudio realizado por Ramos–Arroyo y Siebe–Grabach, 2006, se tienen datos de presas de jales. De nuestro interés es la localidad de La Valenciana. (Ver tabla 1.5).

Variable	Noria Alta	La Luz	Valenciana	El Cedro
<b>Edad de depositación y método de extracción</b>	> 60 años Cianuración	> 60 años Amalgamación	Recientes Flotación	Recientes Flotación
<b>Sistema de vetas de procedencia</b>	Veta Madre	Veta La Luz	Veta Madre	Veta Madre

<b>Tipo de mineralización</b>	Llenado de fisuras	Llenado de fisuras	Llenado de fisuras	Llenado de fisuras
<b>Mineralogía dominante (&gt;1%)</b>	Czo, cal, feld, cao	Czo, cal, feld, cao	Czo, cal, feld, cao, clor, pi, FeOx	Czo, cal, feld, cao, clor, pi
<b>Tipo de erosión intensiva</b>	Laminar/ carcavamiento/ movimientos masivos/ muy alta	Laminar/ carcavamiento/ movimientos masivos/ muy alta	Laminar/ carcavamiento/ baja	Laminar/ carcavamiento/ baja
<b>Área total aproximada</b>	2 has.	1.5 has.	5 has.	6 has.
<b>% de cobertura/ vegetación/ tipo de vegetación dominante</b>	80% pasto  Arbustos, pirul	50% pasto  Arbustos, pirul	1.5% pasto y arbusto; en zonas inundadas tules	5% pasto; en zonas inundadas tules 20%

Tabla 1.5 Cuatro localidades reportadas por Ramos–Arroyo y Siebe–Grabach, 2006, con diversas variables de descripción geoquímica de las 4 presas de jales. Nota: \*Czo: cuarzo, cal: calcita, feld: feldespato y plagioclasas, cao: caolinita, clor: clorita, pi: piritita, FeOx: óxidos e hidróxidos de Fe.

Un mejor estudio de La Valenciana fue realizado por el Dr. Yann René Ramos Arroyo y Julio César Martínez-Arredondo, del departamento de geomática e hidráulica de la Universidad de Guanajuato en su *Modelo conceptual de la evolución de geoquímica de los residuos mineros “La Valenciana”, Guanajuato, México*. (Ver imágenes 1.9 y 1.10).

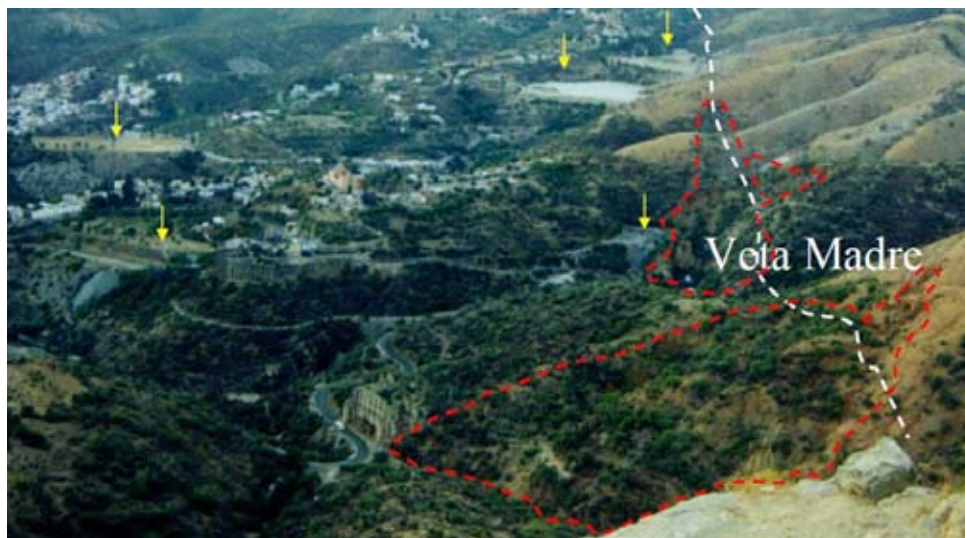


Figura 1.9 Vista panorámica de algunas de las presas de jales del distrito minero de Guanajuato.



Figura 1.10 Representación esquemática de La Valenciana (2250msnm).

### 1.3 Normatividad

#### **NOM-157-SEMARNAT/SSA1-2009**

De acuerdo a la NOM-157-SEMARNAT/SSA1-2009 en su apartado 5.4.2.4 de Pruebas de Movilidad, en su sub-apartado 5.4.2.4.1 dice que “cuando la concentración total de los elementos normados sea mayor que el correspondiente al límite máximo permisible base seca señalado en el cuadro

siguiente, se deberán realizar las pruebas de movilidad”. Estas pruebas permiten determinar la movilidad de los constituyentes de un residuo, que lo hacen peligroso por su toxicidad al ambiente, ejemplos Prueba de Extracción o PECT (procedimiento de laboratorio) y base seca (sin agua). La tabla siguiente indica los límites permisibles LMP para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT y base seca. Ver tabla 1.6.

Contaminante	PECT	LMP [mg/L]	Base seca	LMP [mg/kg]
<b>As</b>		5		100
<b>Cr</b>		5		100
<b>Hg</b>		0.2		4
<b>Ag</b>		5		100
<b>Pb</b>		5		100

Tabla 1.6 Reporte de máximas concentraciones según la norma NOM-157-SEMARNAT/SSA1-2009 para realizar pruebas de movilidad de un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Estos valores han sido los mismos desde la norma **NOM-052-SEMARNAT-1993** de “Caracterización del lixiviado (PECT) que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad al ambiente”. Para la **NOM-159-SEMARNAT-2011** se tiene el mismo reporte. Mientras que la **NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004** reporta concentraciones de referencia totales para usos de suelo agrícola, residencial, comercial e industrial. Ver tabla 1.8.

Además de la **PROFEPA 2000**, se tiene un reporte de la concentración límite de EPT's para el consumo humano (RSH) y riesgo ecológico (RE). Ver tabla 1.7.

Elemento	RSH [mg/kg]	RE [mg/kg]
<b>As</b>	20	20
<b>Pb</b>	200	100

Tabla 1.7 Resumen de la concentración límite de EPT's para el consumo humano (RSH) y riesgo ecológico (RE). Tomada de Gutiérrez-Ruiz et al., 2007 (Fuente: PROFEPA 2000).

## NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

Contaminante	Uso	Uso
	agrícola/residencial/comercial [mg/kg]	industrial [mg/kg]
As	22	260
Pb	400	800
Ag	390	5100
Cr	280	510
Hg	23	310

Tabla 1.8 Concentraciones de referencia totales (CR<sub>T</sub>) por tipo de uso de suelo según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Es de importancia entonces, de acuerdo a todos los reportes de las normas, realizar el estudio de estos jales, pues para varios casos presentan concentraciones superiores a los diversos límites marcados.

### 1.7 Antecedentes que motivaron la elección del tema

La explotación de yacimientos minerales con o sin valor económico está asociada a distintos procesos geológicos que afectan las condiciones ambientales de las áreas mineralizadas, afectando a los organismos vivos, a los recursos hídricos y en general, al ecosistema de las regiones circunvecinas.

En las distintas etapas de una obra minera se generan concentraciones anómalas de elementos químicos que pueden tener un valor tóxico en la biósfera, causando un grave impacto ambiental. Por otro lado, el manejo inadecuado y la disposición de los residuos mineros aunado a distintos factores climáticos han provocado la dispersión y movilización a extensas áreas urbanas y rurales, originando problemas de contaminación de suelos por metales pesados potencialmente tóxicos (EPT's). Estos residuos mineros causan muchos problemas ambientales, tales como: i) cambios en la superficie, en el uso de suelo y en el agua, ii) impacto negativo en los procesos hidrológicos, y iii) dispersión de los compuestos potencialmente tóxicos (Corona-Chávez et. al, 2010).

Un distrito minero muestra una clara tendencia de generar aguas ácidas con altos contenidos de metales (As, Zn, etc.), que tienden a su vez tienden a aumentar las concentraciones de los mismos y redistribuirlos, ya sea por mecanismos de erosión e intemperismo, por afectaciones posteriores a la actividad minera o por acciones humanas (Corona-Chávez y Uribe-Salas, 2009).

Actualmente, el desarrollo de nuevas tecnologías de diversa índole depende de los elementos que se obtienen por actividades minero-metalúrgicas o del reciclaje de otros materiales, ya que muchos de los componentes de los nuevos equipos (computadoras, teléfonos celulares, entre otros) están fabricados de metales como el hierro, cobre, cadmio, oro, plomo, plata, silicio, etc.

Debido a la problemática mencionada aunada a que la tecnología y fuentes de energía actuales generan mayor volumen de desechos mineros que en años anteriores, el ser humano ha estudiado más a fondo técnicas alternativas con fin de generar menor cantidad de residuos, además de implementar medidas de prevención y realizar proyectos que contemplen el tratamiento de los jales en los distintos distritos mineros.

Para estudiar el comportamiento de los desechos mineros se han realizado estudios tanto geoquímicos como de medición de parámetros físico-químicos. En los últimos años, los métodos magnéticos han sido aplicados en los estudios de regiones con alto impacto antropogénico; realizando la medición de propiedades magnéticas de los materiales que conforman a la atmósfera, suelos, así como del contenido de metales (Pb, Zn, Fe, Cd, Cu, Cr, Mn, Ni, etc.); y utilizan la correlación entre la concentración de metales y las propiedades magnéticas de los materiales (susceptibilidad magnética, diferentes tipos de magnetización, etc.). (G. G. Matasova et al., 2005).

En este trabajo se propone la descripción de propiedades magnéticas, inicialmente susceptibilidad magnética de los desechos mineros, como una herramienta que permita evaluar la concentración de EPT's en estos depósitos. Adicionalmente, se pretende elaborar un mapa con la distribución de EPT's obtenida a partir de este trabajo.

### 1.5 Objetivos del trabajo

Objetivo general: Generar un modelo de respuesta de susceptibilidad magnética en la predicción del contenido de metales potencialmente tóxicos en los residuos sólidos mineros (jales) de El Oro – Tlalpujahuá y Guanajuato.

#### Objetivos particulares:

- \* Proponer una metodología de trabajo que relacione de forma específica a la susceptibilidad magnética con el contenido de diferentes elementos presentes en concentraciones importantes en los jales mineros del DMOT.
- \* Validar la metodología propuesta con análisis publicados previamente, así como con determinación de concentraciones en sitios nuevos de muestreo por análisis de FRX y propiedades fisicoquímicas.
- \*Elaborar un mapa donde se muestre la distribución de EPT's obtenida por métodos magnéticos.
- \*Validar el método aplicándolo a muestras de concentraciones de EPT's obtenidas a partir de la metodología magnética y análisis fisicoquímicos de otro distrito minero, ejemplo Guanajuato.

#### 1.6 Hipótesis presentada

El valor de la susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) en los materiales geológicos depende principalmente de la cantidad de los materiales ferro – ferri magnéticos en una muestra (Verosub y Roberts, 1995). Así, entre otra información, las mediciones de susceptibilidad magnética proporcionan una estimación rápida y sencilla sobre los contenidos de hierro (concentración de Fe) en una muestra. Por otra parte, es conocida la afinidad de ciertos elementos potencialmente tóxicos (EPT's) con el Fe (G. G. Matasova et al., 2005). Esta afinidad es aprovechada para la identificación y estimación de la concentración de los EPT's en un depósito de desechos mineros (jales). Al hacer una descripción de los valores de susceptibilidad magnética es posible estimar valores de concentración y físico químicos de materiales geológicos de forma casi inmediata al relacionarlos con una curva previamente calibrada.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Jales Mineros

Los jales o desechos mineros son desechos de procesos de explotación de la industria minera que contienen elevadas cantidades de metales pesados, los cuales, representan un riesgo en la ecología y en la salud humana. Dentro de sus características generales, se encuentran: bajo pH, concentraciones variables de metales pesados, bajo contenido de materia orgánica, ausencia de estructura de suelo y baja retención de agua; proporcionando así, un medio hostil para el desarrollo de la vegetación. Adicionalmente, la mayoría de los jales tienen laderas con pendientes muy elevadas e inestables, además de la falta de una cubierta protectora (vegetación) y de canales para colectar el agua y así reducir los flujos a través de las áreas con pendientes altas. Esto facilita tanto la erosión hídrica como la eólica, así como la transferencia y depositación de material de los jales a los suelos adyacentes (de la O.-Villanueva et al., 2013).

Los procesos de erosión de los jales representan un riesgo inminente que puede causar daños importantes en las siguientes formas: i) la estabilidad estructural de los jales puede estar seriamente afectada por procesos intensos de erosión hídrica causando en algunos casos colapsos de material, ii) la generación de drenaje ácido y el transporte en solución de metales hacia cuerpos de agua, iii) transporte de partículas a través del viento y su posterior depositación en ambientes más susceptibles (Martín-Romero & Gutiérrez-Ruíz, 2010).

En los desechos de minas, los minerales generadores de ácidos (sulfuros) por lo general ocurren asociados a minerales neutralizadores de ácidos, tales como, calcita y aluminosilicatos. Cuando estos minerales neutralizadores de ácidos están presentes, el ácido generado por oxidación de sulfuros es balanceado mediante el consumo del ácido y consecuentemente, las concentraciones disueltas de EPT en los lixiviados de jales y aguas meteóricas son relativamente bajas (Corona-Chávez et al., 2010).

### 2.2 Propiedades y Parámetros magnéticos de materiales geológicos

Un campo magnético es producido por el movimiento de la carga de un electrón. Los electrones giran normalmente sobre sus ejes y a la vez alrededor de sus núcleos, por lo que, tienen dos tipos de movimiento que pueden producir campos magnéticos. Todas las sustancias pueden entonces,



considerarse magnéticos a un nivel atómico y pueden ser clasificadas en dos tipos. En las sustancias diamagnéticas las celdas electrónicas están llenas y la precesión de las órbitas electrónicas puede al ser colocadas en un campo magnético, crear otro campo magnético en dirección opuesta al campo aplicado. En las sustancias en las que las celdas electrónicas están incompletas, materiales paramagnéticos, cada átomo tiene un momento magnético debido a los espines electrónicos que no están compensados. Al ser colocados en un campo magnético, las órbitas electrónicas presentan precesión pero el momento magnético es alineado en la misma dirección que el campo aplicado y es generalmente más fuerte que el campo de las sustancias diamagnéticas. Los materiales con este tipo, se caracterizan por presentar una baja susceptibilidad magnética mayor a cero.

En los materiales ferromagnéticos, todas las magnetizaciones de espines individuales están acopladas paralelas unas a otras mediante fuerzas de cambio interno, dando lugar a un campo externo fuerte generado aún en la ausencia de algún campo aplicado. El valor de la susceptibilidad magnética de estos materiales es mucho más alta que en el caso de los paramagnéticos y depende de la historia previa del material.

En las sustancias antiferromagnéticas, la magnetización de los espines es de forma anti paralela perfecta, mientras que en las sustancias ferrimagnéticas, las magnetizaciones también son antiparalelas pero tienen magnitudes diferentes por lo que los materiales tienen magnetización más débil que los ferromagnéticos.

La creación de momentos magnéticos de Bohr ( $\mu_B$ ) se da cuando se tienen pares de espines sin aparear, y cada par, contribuye a un momento magnético.

En la figura 2.1 se observa (a) Ferromagnetismo: todas las magnetizaciones de espines individuales están acopladas paralelamente unas a otras mediante un intercambio de fuerzas, dando como resultado un campo externo fuerte que se genera aún en ausencia de un campo aplicado; (b) Antiferromagnetismo: las fuerzas de superintercambio causan que las magnetizaciones de espines sean acopladas antiparalelamente unas a otras de tal manera que no tengan ningún campo magnético externo a menos que los defectos de cristalización aporten un alineamiento antiparalelo perfecto; y (c) Ferrimagnetismo: las magnetizaciones de espines son antiparalelas unas con otras, pero tienen diferentes magnitudes de tal manera que los materiales tengan una magnetización más débil que un material ferromagnético, pero de la misma manera adquieran esta magnetización aún en la ausencia de un campo magnético aplicado. (Tarling, 1983). Ver tabla 2.1.

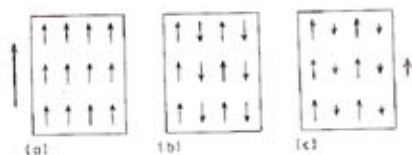


Figura 2.1 Arreglo de espines de sustancias: a) ferromagnéticas, b) antiferromagnéticas y c) ferrimagnéticas.

Comportamiento Magnético	Minerales magnéticos
Diamagnéticos	Calcita, feldespatos alcalinos, plásticos, cuarzo, materia orgánica, agua, halita, kaolinita, granate, cerusita, magnesita, cinabrio, galena
Paramagnéticos	Ilmetita, ulvoespinela, olivino, siderita, biotita, piroxeno, chamosita, nontronita, anfíbol, epidota, piritita, lepidocrocita, proclorita, vermiculita, illita, bentonita, calcopirita, atapulgitita, dolomita
Ferromagnéticos	Hierro, Cobalto, Níquel
Ferrimagnéticos	Magnetita, Maghemita, Titanomagnetita, Titanomaghemita, Pirrotita, Greigita
Antiferromagnéticos	Goethita, Hematita

Tabla 2.1 Comportamiento magnético de algunos minerales magnéticos. (De Rivas-Ortiz, 2006).

La concentración de los minerales ferromagnéticos es importante, ya que la formación de óxidos e hidróxidos son capaces de reflejar información sobre los procesos que dan origen a la formación del suelo, su material parental, las condiciones ambientales y sus variaciones durante el periodo de pedogénesis (Rivas-Ortiz, 2006).

*Susceptibilidad Magnética:* es la relación entre la magnetización inducida y la intensidad de un campo aplicado. Es medido en un campo alterno con intensidad menor a 0.1mT, y es una primera aproximación de la concentración de minerales ferrimagnéticos ( $\chi_f$ ), paramagnéticos ( $\chi_p$ ) y del tamaño de partícula. (Ver ANEXO 4, Susceptibilidad Magnética específica de minerales). Ver tabla 2.2.

Mineral/Material (tamaño de partícula)	Fórmula	Fe (%)	Susceptibilidad magnética específica de masa ( $10^{-6} \text{ m}^3\text{Kg}^{-1}$ )
<i>Metales ferromagnéticos</i>			
Hierro	$\alpha\text{Fe}$	100	276000
Cobalto	Co		204000
Níquel	Ni		68850
<i>Ferrimagnéticos</i>			
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	72	
(0.012-0.069 $\mu\text{m}$ )			513-1116
			500-1000
(0.09-2000 $\mu\text{m}$ )			596 +/- 77
(1-250 $\mu\text{m}$ )			440-716
			390-580
Maghemita	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	70	410, 440
			286-371
Titanomagnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$		169-290
Titanohematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{FeTiO}_3$		281-315
Pirrotita	$\text{Fe}_7\text{S}_8$		50, 53
Greigita	$\text{Fe}_3\text{S}_4$		
<i>Antiferromagnéticos</i>			
Hematita	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	70	1.19-1.69
			0.58-0.78
			0.49-0.65
Goethita	$\alpha\text{FeOOH}$	63	0.35, 0.38, 0.7, <1.26
<i>Paramagnéticos (20°C)</i>			
Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$	37	1.7, 2
Ulvoespinela	$\text{Fe}_2\text{TiO}_4$		
Olivino	$4[(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4]$	<55	0.01-1.3
Siderita	$\text{FeCO}_3$	48	1.0
Biotita	Silicato de Mg,Fe,Al	31	0.05-0.95
Piroxeno	$(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	<12	0.04-0.94
Chamosita	Clorita oxidada		0.9
Nontronita	Arcilla rica en Fe		0.863
Anfíbol	Silicato de Mg, Fe, Al		0.16-0.69
Epidota	Silicato de Ca, Fe, Al	31	0.25-0.31

Pirita	FeS <sub>2</sub>	47	0.3
Lepidocrocita	γFeOOH	63	0.5-0.75, 0.69
Proclorita	Mineral de mica		0.157
Vermiculita	Silicato complejo		0.152
Illita	KAl <sub>4</sub> (Si,Al) <sub>8</sub> O <sub>2</sub> O(OH) <sub>4</sub>		0.15
Bentonita	Silicato complejo		0.058
Smectita	Silicato complejo		0.05, 0.027
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	30	0.03
Attapulgita	Silicato complejo		0.02
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		0.011

Tabla 2.2 Algunos minerales y su valor de susceptibilidad magnética (resumido del manual Environmental Magnetic Susceptibility, Bartington MS2 System).

*Susceptibilidad Magnética dependiente de la Frecuencia (FD):* Es definida como la relación entre la magnetización inducida y la intensidad del campo aplicado. Expresa el carácter y la intensidad de una respuesta de muestra al campo magnético externo y no es controlada solamente por la concentración de partículas magnéticas (aunque para composiciones dadas éste efecto es el más importante).

Este parámetro magnético es medido con el susceptibilímetro Bartington MS2; uso del sensor MS2B (frecuencia dual), el cual, opera con el principio de inducción de corriente alterna (AC). Se suministra alimentación al circuito oscilador en el sensor, lo cual, genera una intensidad baja (80A/m aprox.) alternando el campo magnético. Cualquier material bajo la influencia de este campo, producirá un cambio en la frecuencia del oscilador. La información de frecuencia es reportada en forma de pulso al susceptibilímetro MS2, donde es convertida a un valor de susceptibilidad magnética.

*Magnetización de saturación:* magnetización que adquiere una substancia cuando sus espines están completamente alineados, es decir, cuando todos los momentos magnéticos están alineados paralelamente al campo aplicado.

*Magnetización remanente de saturación:* es la remanencia neta después de la saturación, es decir, cuando el campo regresa a cero.

*Coercitividad:* campo necesario para reducir el momento magnético a cero.

*Temperatura de Curie ( $T_c$ ):* parámetro que sirve de firma magnética para identificar a los minerales magnéticos. Esta es la temperatura a la cual un mineral pierde su carácter magnético, es decir, cuando el mineral cambia de una condición ferro/ferrimagnética a una paramagnética. Por debajo de ésta  $T_c$ , los átomos de los minerales interactúan de manera que sus momentos magnéticos se acoplan y actúan en la dirección del campo magnético aplicado. La  $T_c$  varía según el tipo de mineral así como el grado de alteración que presente el material original, por lo que a mayor alteración, mayor será su  $T_c$ . (Rivas-Ortíz, 2006).

*Temperatura de Néel ( $T_N$ ):* Temperatura análoga a la de Curie, es decir, es aquella temperatura a partir de la cual los materiales antiferromagnéticos imperfectos se transforman en paramagnéticos. (Rivas-Ortíz, 2006).

*Curvas termomagnéticas:* curvas que presentan el ciclo de calentamiento y enfriamiento en la determinación de la temperatura de Curie. El calentamiento de una muestra inducirá cambios en sus minerales magnéticos y no magnéticos, dando lugar a la creación y destrucción de minerales magnéticos a ciertas temperaturas, algunos de los cuales pueden ser diagnosticados del cambio de mineralogía involucrado.

En la figura 2.2, se presentan curvas termomagnéticas que muestran reacciones termoquímicas en minerales magnéticos. El rango de reacciones posibles es muy grande (tabla 2.2), y depende de una variedad de factores. En los ejemplos presentados, se usan unidades arbitrarias para la intensidad de la remanencia, por lo que el valor total de, por ejemplo, e) es mucho menor que a). (Tarling, 1983).

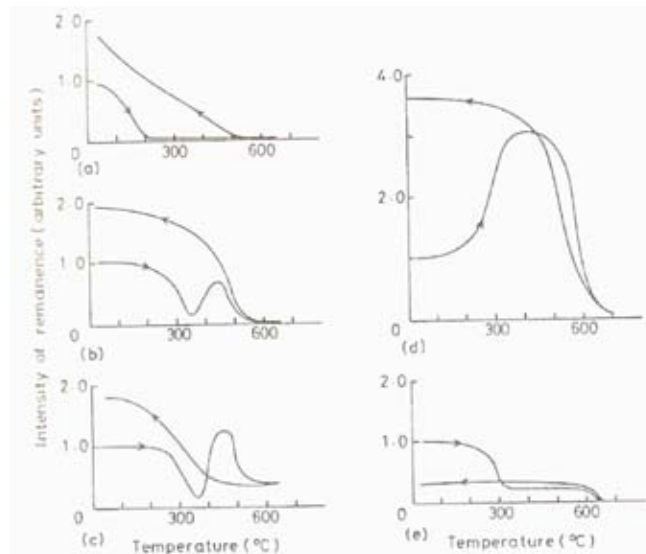


Figura 2.2 Curvas termomagnéticas que muestran reacciones termoquímicas en minerales magnéticos: a) titanomagnetitas ricas en Ti en ex solución formando magnetita relativamente pura, b) titanomagnetita pobre en Ti, oxidándose para formar maghemita, c) titanomagnetita pobre en Ti formando titanohematita y hematita, d) siderita en sedimentos convirtiéndose a magnetita y e) maghemita convirtiéndose a hematita. (Tarling, 1983).

Mineral inicial	Alteración	Temperatura [°C]
Titanomagnetita 60% de Ti		80-120, 150, 80-100, 80, 150
Titanomagnetita 30% de Ti		350
Titanomagnetita (Duras y suaves)		200
Titanomagnetita rica en Ti	Magnetita	>300
Titanomaghemita		400-600
Titanomaghemita	Magnetita	>250
Goethita		150, 80-120, 120-130
Goethita	Deshidrata a Hematita	200-400
Lepidocrocita		400-600
Lepidocrocita	Deshidrata a Maghemita	220-270, 200-250, 250-350
Siderita	Magnetita	>200, 311
Pirrotita		300, 290-320, 300-325, 280-300, 100-200
Greigita		>300
Olivino	Magnetita	>300
Maghemita	Hematita	>500
Pirita	Magnetita	350-500
Magnetita	Maghemita	150-250
Magnetita		580, 575, 585, 578, 480
Maghemita		600, 587-675, 740, 590-675, 350
Hematita		675, 480-600, 680
Magnetita	Hematita	>500
Hematita	Magnetita	>500
Piroxenos	Magnetita	>600
Maghemita	Hematita	350, >250

Maghemita metaestable	Hematita	270-350
Ilmemohematita		100
Hierro		770, 765
Akaganita	Deshidrata a Hematita	250
Ulvoespinela		-153
Ilmenita		-218, -200 a -218, -233
Cobalto		1131
Níquel		358
Pirrotita		320
Jacobsita		300
Cromita		-84

Tabla 2.3 Diversos intervalos característicos de algunas temperaturas de Curie y/o Néel reportado para algunos minerales magnéticos. (Tabla resumida de Rivas-Ortiz, 2006).

En los estudios de magnetización de saturación en función de la temperatura, por ejemplo, las curvas usadas para la determinación de la temperatura de Curie, muestran el incremento y decremento en el momento magnético inducido así como los cambios químicos alteran la mineralogía magnética.

El análisis termomagnético no solo provee las temperaturas de Curie ( $T_C$ ) y Néel ( $T_N$ ) de minerales específicos, sino que también proporciona información de cambios en reacciones de estructura magnética y químicas que involucran minerales ferromagnéticos. Para minerales ferromagnéticos saturados, las curvas de calentamiento y enfriamiento de un ciclo termomagnético completo son reversibles si no hay cambios químicos (deshidratación, exsolución, oxidación), estructurales (inversión, mejor orden en arreglo cristalino debido a la recristalización, o difusión de los efectos del arreglo cristalino), o de textura (aglutinación) como consecuencia del calentamiento. Estos cambios se detectan al comparar las formas de ambas curvas (Boer & Dekkers, 1998).

En campos no saturados la forma de las curvas termomagnéticas también depende de la coercitividad de la muestra y su variación con la temperatura. En este caso, la irreversibilidad de la curva de calentamiento, y por tanto, de la curva de enfriamiento no es necesariamente causada por cambios estructurales o químicos del mineral estudiado pero también puede ser causada por un proceso de alineamiento de irreversibilidad magnética (Boer & Dekkers, 1998).

*Curvas de histéresis:* la aplicación de campos magnéticos crecientes, primero en una dirección y luego en la dirección opuesta, causa que la magnetización se comporte de la misma manera, formando una curva de histéresis.

Si un campo magnético es aplicado a un conjunto de partículas orientadas al azar, la dirección de magnetización en los dominios que tienen una magnetización exactamente anti paralela al campo aplicado no cambiarán su dirección de magnetización hasta que el campo aplicado exceda la energía interna, cuando la dirección gire y esté alineada. Estos dominios tendrán cada uno una curva de histéresis cuadrada (un campo externo  $H$ , aplicado a lo largo del eje "fácil" de partículas de un solo dominio no tiene efecto en la intensidad ni dirección de la magnetización,  $M$ ). Donde los dominios tienen una dirección en un ángulo al campo aplicado, éste campo induce un campo magnético el cual se pierde rápidamente al quitar el campo, por lo que, no presenta histéresis (Tarling, 1983). Ver figura 2.3.

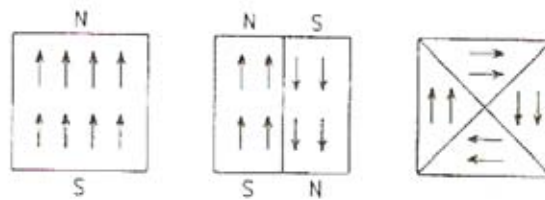


Figura 2.3 Patrones de dominio. En granos largos, el cambio y las fuerzas de cambio causan un alineamiento interno de la magnetización del spin, dando lugar a la formación de polos magnetostáticos fuertes por fuera del grano. Con el fin de balancear estos dos tipos de fuerza, los dominios pueden formar pares antiparalelos (segundo cuadro) o dominios cerrados (tercer cuadro). Tomado de Tarling, 1983.

Cuando las partículas presentan multidominio, hay un incremento lineal inicial tal como se aplique un campo débil a una muestra desmagnetizada previamente. Así como el dominio cambia, todas las magnetizaciones de los dominios se alinean y el material se satura magnéticamente,  $M_{sat}$ , en un campo magnético aplicado en específico,  $H_{sat}$  si el campo aplicado es removido, algunos dominios cambian, pero otros se mantienen, por lo que la muestra tiene una remanencia,  $M_{IRM}$ , en el campo cero. Esta remanencia isotérmica es destruida así como el campo aplicado en reversa (campo de retraso) excede un volumen específico,  $H_{cr}$ , que es el campo coercitivo (Tarling, 1983). Ver figura 2.4.



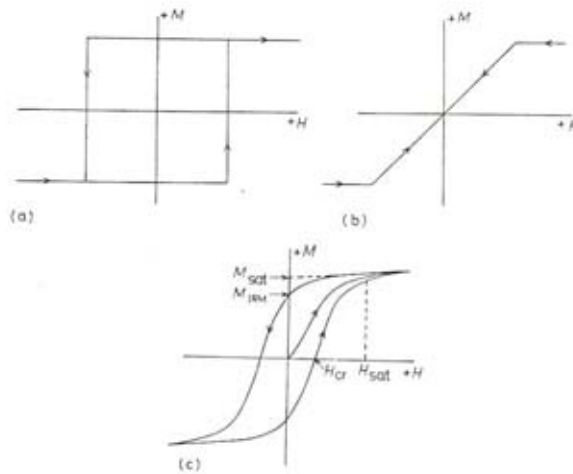


Figura 2.4 Curvas de histéresis. Donde H es el campo magnético externo, M es la magnetización. (a) Curva cuadrada de histéresis, b) Sin curva de histéresis, c) curva de histéresis para partículas de multidominio. Tarling, 1983.

El hecho de que el momento de saturación y la coercitividad de minerales magnéticos dependan de su composición, quiere decir que el área encerrada por la curva de histéresis está directamente relacionada a la composición específica del mineral magnético presente y puede por tanto ser usado para identificar minerales. El problema consta en que la curva de histéresis es también afectada por la presencia o ausencia de un dominio único de partículas. Pues las curvas de histéresis al igual que las de IRM, son la suma de todas las contribuciones de las partículas de muestra. Hay muchos tipos básicos de curvas que son reconocidas como *bloques de construcción* de las curvas de histéresis que se miden en materiales geológicos (Tauxe, 2014).

Sobre cierto volumen crítico, los granos tendrán tiempos de relajación que son suficientes para retener una remanencia estable. Las poblaciones de granos estables orientadas aleatoriamente pueden producir curvas de histéresis con una variedad de formas dependiendo del origen de la anisotropía magnética y del estado de dominio. En la figura 2.5d se muestra una curva característica de especímenes cuya remanencia se deriva de la magnetita de SD con anisotropía uniaxial. La figura 2.5e muestra una hematita especular cuya anisotropía debe ser magnetocristalina en el origen (hexagonal en el plano basal). Se muestra también una curva con relación  $M_r/M_s$  baja en la figura 2.5f de pseudo-dominio (PSD). (Tauxe, 2014).

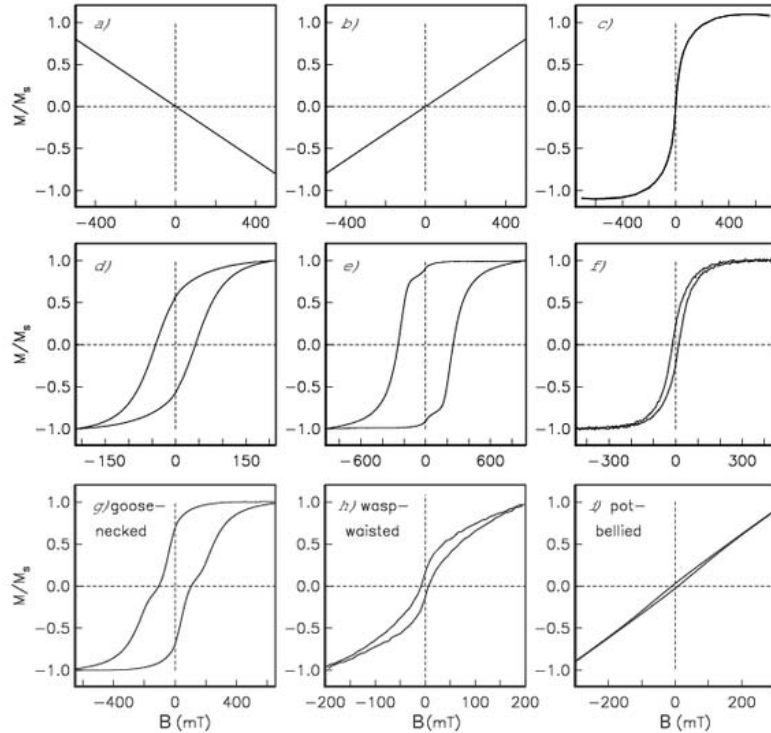


Figura 2.5 Comportamientos de las curvas de histéresis: a) diamagnéticos, b) paramagnéticos, c) superparamagnéticos, d) uniaxial, dominio sencillo, e) magnetocristalino, dominio sencillo, f) pseudo-dominio. Comportamiento de histéresis de varias mezclas: g) magnetita y hematita, h) magnetita SD/SP, i) otro ejemplo de magnetita de SD/SP con una distribución SP de grano más fino. (Tauxe, 2014). Donde SP es superparamagnético y SD es dominio sencillo.

En los materiales geológicos se pueden encontrar mezclas de muchas fases magnéticas y/o estados de dominios. Tales mezclas dan lugar a curvas distorsionadas, nombradas como *goose-necked* (figura 2.5g), *wasp-waisted* (figura 8.11h) y *pot-bellied* (figura 2.5i). (Tauxe, 2014).

Las curvas de forma *wasp-waisted* pueden ser asimétricas debido a las grandes cantidades de hematita mezclada con magnetita (Jackson et al., 1990).

El fenómeno de las formas de estas curvas se ha atribuido a ya sea anisotropía o a la presencia de más de una fase magnética con diferentes propiedades. Estas dos fases pueden ser dos minerales magnéticos con propiedades magnéticas contrastantes y/o dos facciones de tamaños de grano del mismo mineral (se puede obtener este tipo de curva al combinar partículas de dominio sencillo y multi-dominio). Además, estas curvas pueden ser usadas para inferir la presencia de dos

distribuciones de fuerzas coercitivas discretas; por ejemplo, este comportamiento en lavas que tienen fases ricas y pobres en Ti. La fase rica en Ti es esencialmente de dominio múltiple, mientras que la fase pobre en Ti es de dominio sencillo. También ha observado este comportamiento en sedimentos con fase de magnetita y hematita (summary mail, 1994).

### 2.3 Mineralogía magnética

El hierro es el elemento de transición más abundante en el sistema solar. En la Tierra, forma óxidos de Fe como la hematita, magnetita y maghemita; oxihidróxidos de Fe como la goethita y ferrihidrita y, sulfuros de Fe como la greigita y pirrotita.

En los óxidos de Fe, el Ti sustituye generalmente al Fe en la estructura cristalina. Debido a que el ion  $Ti^{4+}$  tiene espines no apareados y es de distinto tamaño, las propiedades magnéticas de la titanomagnetita son distintas de la magnetita sin Ti.

Existen dos series de solución sólida de gran importancia: la ulvöespinela-magnetita y la ilmenita-hematita. La primera también se conoce como serie de las titanomagnetitas y la segunda, serie de las titanohematitas. (Tauxe, 2014). Ver figuras 2.6 y 2.7.

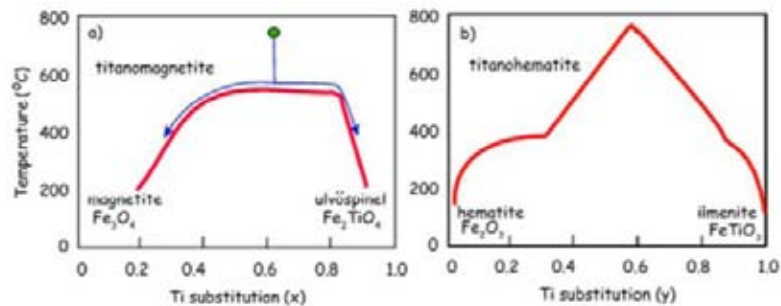


Figura 2.6 Diagramas de fases para los óxidos de FeTi. De lado izquierdo se presenta la serie de las titanomagnetitas y de lado derecho la serie de las titanohematitas. (Tauxe, 2014).

Las composiciones de minerales se presentan en diagramas ternarios para los óxidos de Fe:

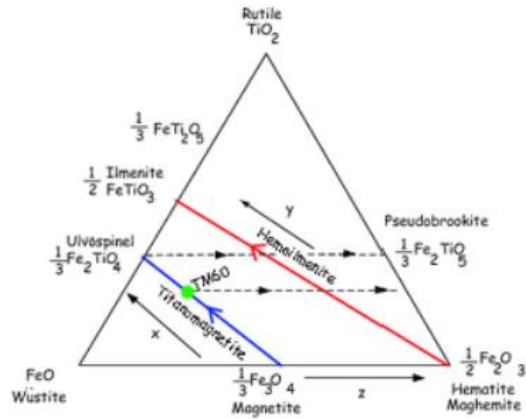


Figura 2.7 Diagrama ternario para óxidos de Fe. X denota la cantidad de Ti en sustitución en titanomagnetitas, y en hemoilmenitas, y. X & Y van de 0 (magnetita/hematita) a 1 (ulvöespinela/ilmenita). Tomado de Tauxe, 2014.

La pirita es paramagnética, pero se oxida a magnetita con el calentamiento, y la pirrotita antiferromagnética se torna en forma ferrimagnética sobre los  $\sim 325^{\circ}\text{C}$ , con mucha mayor magnetización espontánea (Böhnel et al., 2002). (Ver ANEXO 4, Mineralogía Magnética).

La hematita es considerada algunas veces como ferromagnética, debido a que muestra un momento magnético débil, pero esto no es resultado de momentos magnéticos.

Al igual que los ferromagnéticos, también en los ferrimagnéticos, la magnetización neta espontánea desaparece en la temperatura de Curie. A temperaturas más altas, debido a la entropía más alta y energía libre más baja, el ensamblaje desordenado de momentos magnéticos atómicos es preferencial, y los ferrimagnéticos se convierten en paramagnéticos. Las interacciones de intercambio entre átomos individuales están presentes también en la región de temperatura paramagnética, pero no son suficientes para mantener el alineamiento espontáneo; además de que afectan la magnitud de la magnetización inducida y su dependencia con la temperatura (Petrovsky & Kapicka, 2006).

## 2.4 Caracterización Química de jales mineros en México

Los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT's) son metales pesados y metaloides que son contaminantes persistentes y, por lo tanto, se acumulan en el suelo. Bajo ciertas condiciones, los EPT's presentes en el suelo pueden ser transportados por agua y aire; y dependiendo de la vulnerabilidad del entorno pueden representar un riesgo para la biota y la población humana. La concentración de EPT's natural en el suelo depende de la composición de la roca de la cual deriva y de las condiciones ambientales a las cuales estuvo sujeto. Los valores naturales (de fondo) de la fracción total de EPT's en suelos son alterados por diversas actividades humanas, desde la disposición de basura municipal y lodos de plantas de tratamiento, riego con aguas residuales o aplicación de plaguicidas, hasta la producción de vidrio, explotación del petróleo, actividad de las industrias petroquímica, fabricación de pinturas, tenerías, etc. Todas estas operaciones están contribuyendo en forma importante al aumento de EPT totales en áreas de suelos expuestos.

De los EPT's comúnmente reportados en los jales mineros, el hierro (Fe) como elemento mayor, el zinc (Zn) y el cobre (Cu) son esenciales en la composición o funcionamiento de los organismos vivos, pero en concentraciones altas pueden causar efectos adversos. En cambio, el arsénico (As), cadmio (Cd) y el plomo (Pb), junto al mercurio (Hg) están reconocidos como los elementos químicos más tóxicos en la naturaleza, a los que no se les conoce alguna función biológica y que aún en concentraciones bajas, pueden contaminar los ecosistemas con el consecuente efecto nocivo para los organismos vivos, (Gutiérrez-Ruiz et al., 2007). Los elementos anteriores forman parte de los metales de transición (grupos IB, IIB y VIII B) a excepción del Pb y As que son metales (grupos IVA y VA, respectivamente). Otros EPT's de importancia son Co, Ni, Cr, V, Ti (grupos IV B a VI B y VIII B), y con valor económico Ag, Au (todos metales de transición, grupo IB). El Sn, Sb, S también pueden ser EPT's de importancia (grupos IVA a VIA).

## 2.5 Propiedades químicas y físicas

### *pH*

En 1908 el bioquímico danés Sören Peter Luritz Sørensen propuso que el grado de acidez o basicidad se explicara usando logaritmos negativos y que éste índice logarítmico se expresara por el símbolo pH (p=potencia), actualmente conocido como potencial de Hidrógeno. Esta definición establece que:

$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] = \log 1 / [\text{H}^+]$ . Sin embargo, esta definición matemática solo es válida para condiciones muy diluidas donde los iones  $\text{H}^+$  no se afectan entre sí por la presencia de otros iones.

En el caso de los jales oxidados, es decir, en aquellos donde ya ocurrieron los procesos geoquímicos que determinan la generación potencial de drenaje ácido, la determinación del pH es suficiente para valorar su potencial para la generación del mismo.

El conocimiento del pH en los ambientes mineros es de importancia debido a que en los procesos como biolixiviación (proceso en el que se utilizan bacterias para lixiviar un metal de valor como cobre, zinc, uranio, níquel, cobalto, de una forma mineral como sulfuro y convertirlo en una forma soluble, en su mayoría sulfatado de un metal) y biooxidación (proceso intercambiable con la biolixiviación pues usan las mismas especies de bacterias; se usa sobre todo para la extracción de oro en concentraciones muy pequeñas y encapsuladas por sulfuros insolubles como la arsenopirita o piritita) se deben mantener ciertas condiciones de temperatura, humedad, presión y pH para la vida bacteriana utilizada en ambos procesos.

El pH es el factor más influyente en la movilización de metales debido a las reacciones de hidrólisis de los cationes, provocando un aumento de la solubilidad y por tanto de la movilidad de los metales de forma inversamente proporcional al pH del jal; de tal manera que a pH neutros y básicos se encuentran minerales poco solubles. Aunado a las condiciones básicas de los jales, el potencial redox, el segundo parámetro más influyente en la movilidad de metales, mostró condiciones aerobias con tendencias oxidantes ( $E_h > 10$  mV), lo cual favorece los fenómenos de adsorción de metales a los óxidos, nitratos o sulfatos presentes en la matriz del sustrato. Adicionalmente, valores de conductividad elevados favorecen la acomplejación de los metales, dado que implican un elevado contenido salino y por tanto aniones acomplejantes. En contraste, la baja capacidad de intercambio catiónico presentada por los jales favorece la posibilidad de movilización de los metales; sin embargo, la baja solubilidad de los metales a pH alcalino limita severamente su movilidad. (Ramos-Gómez et al., 2012).

### *Eh*

Las reacciones de óxido - reducción son importantes en todos los procesos geológicos: magmáticos, diagenéticos, metamórficos, intemperismo químico, y la formación de depósitos minerales. En geoquímica acuosa, el potencial electródico de una reacción media en cualquier estado, medida relativa de un electrodo de hidrógeno estándar, es llamado potencial de oxidación (o potencial redox).

El  $E_h$  de un ambiente terrestre natural es por mucho una función del contenido de su materia orgánica. El agua somera en un espacio abierto presenta un ambiente de oxidación por mucha materia orgánica, independientemente de la abundancia de los organismos, decae a dióxido de

carbono y agua antes de que mueran los organismos. Los ambientes sedimentarios en los cuales la materia orgánica se acumula o se ha acumulado en las descomposiciones pasadas (ej., lutitas negras) son altamente reductoras, con valores de Eh en el rango de -0.1 a -0.5 volts (y pH de 4 donde el decaimiento toma lugar bajo condiciones aeróbicas).

Los diagramas Eh-pH se utilizan para mostrar la estabilidad de compuestos metálicos y proporciona un método fácil para predecir el comportamiento de los metales pesados frente a un cambio en las condiciones ambientales. Ver figura 2.8.

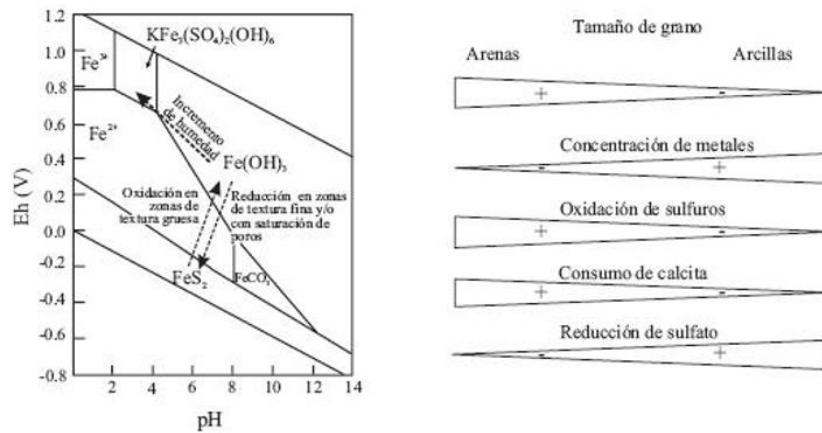


Figura 2.8 Diagrama de Pourbaix del hierro. (Ramos–Arroyo y Siebe–Grabach, 2005). Se ejemplifica el desarrollo de los procesos geoquímicos en función del tamaño de grano y la humedad: la oxidación de sulfuros y el consumo de calcita se vuelven más importantes al aumentar el tamaño de grano, siempre y cuando exista un aporte de agua; por otra parte, el contenido de metales aumenta al disminuir el tamaño de partícula.

### Conductividad Eléctrica (CE)

La Conductividad Eléctrica se define como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar a través de él o la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través del mismo.

Se sabe que por lo regular, el material de desecho de mina es por lo regular más conductor que el material base o contenedor, y que las aguas residuales con cantidades más altas de sólidos disueltos totales y/o desechos ácidos de mina son más conductoras que las aguas normales.

Esta propiedad física es de interés ya que, la conductividad de una unidad geológica, en general, refleja su litología, porosidad y la saturación del agua. Una unidad con minerales conductivos, como

las arcillas (ej. montmorillonita) o sulfuros (ej. pirita) será más conductiva que otra consistente de minerales silicatados.

Además, entre más húmeda será una formación, más alto será su valor de conductividad. Del mismo modo, al incrementar las cantidades de sólidos disueltos y de ácidos en el agua contenedora también se incrementará la conductividad de la formación. El efecto que tiene el ácido en las aguas lixiviadas es que para valores menores a 5, la conductividad de estas aguas es inversamente proporcional al pH.



### 3. Metodología de Trabajo

#### 3.1. Muestreo

##### 3.1.1. DMOT

El muestreo se divide en dos etapas. La primera se basa en el artículo de Corona-Chávez et al., 2010, como se muestra en la figura 3.1. Al inicio, se tomaron 48 muestras en los jales de Tlalpujahua y El Oro. 28 en Tlalpujahua y 20 en el Oro. Estas muestras se ordenaron en bitácora por estación y horizonte.

En Tlalpujahua: E2H1, E2H3, E3H1, E3H2, E3H3, E3H4, E3H5, E3H6, E3H7, E4H2, E9H1, E9H2, E9H3, E9H4, E9H5, E10H2, E10H4, E11H1, E11H2, E11H3, E11H4, E11H5, E11H6, E12H1, E12H3, E12H4, E13H1, E13H4.

En El Oro: E5H1, E5H2, E5H3A, E5H4, E5H5, E5H6, E7H1, E7H3, E7H4, E7H5, E7H6, E7H7, E7Hcima, E7Hmedia, E8H1, E8H2, E8H3, E8H4, E14H2, E14H8.

Este muestreo se tomó en cuenta en los primeros análisis, sin embargo, se contaba con más muestras del DMOT que no estaban incluidas en la publicación citada anteriormente pero pertenecen al mismo muestreo, por lo que se decidió aumentar el número de muestras. Se agregaron para el Oro 12 muestras (ahora, 32 muestras): E5H3B, E5H3C, E8H5, E8H6, E8H7, E8H8, E14H1, E14H3, E14H4, E14H5, E14H6, E14H7. Para Tlalpujahua se agregaron 6 muestras (ahora, 34 muestras): E2H2, E4H3, E10H1, E12H2, E13H2, E13H3.

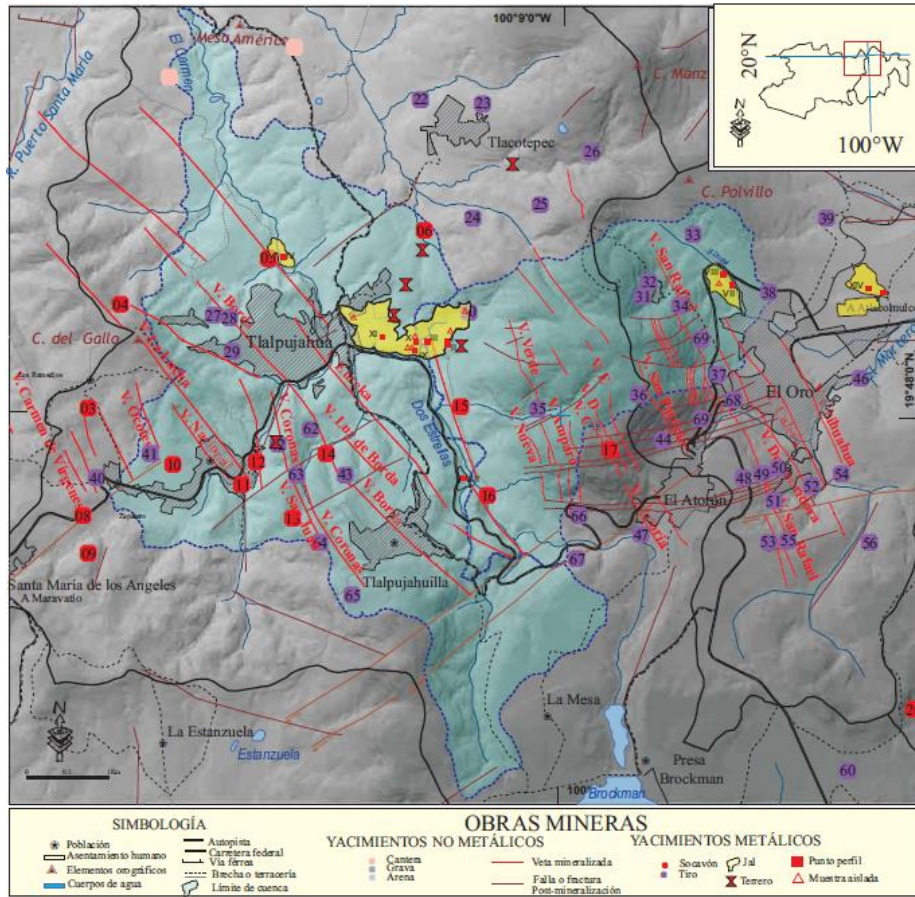


Figura 3.1 Mapa de Corona-Chávez et al. Variaciones Geoquímicas y Mineralógicas Jales El Oro y Tlalpujahua, 2010, donde se muestra la distribución de jales y algunas obras mineras en el DMOT. En números romanos se localizan las estaciones de muestreo analizadas en esta etapa del trabajo (notación usada en este trabajo por ejemplo E2H3 corresponde al número romano II).

En las 66 muestras se midieron parámetros físico-químicos, tales como: FRX -concentración de elementos mayores y traza, pH, Eh, CE y susceptibilidad magnética. Los resultados de estas mediciones están detallados en el capítulo 4.

### 3.1.2. Tlalpujahua (2° muestreo)

La segunda etapa de muestreo en Tlalpujahua, se realizó en los alrededores de la antigua iglesia en el Barrio del Carmen, en donde, se colectaron once muestras. Para este segundo muestreo, la mayoría de los jales se encontraban expuestos debido al incidente del derrumbe de la presa de jales en 1937; la relación de este muestreo se presenta en la tabla 3.1.

Clave	Descripción del lugar	Coordenadas	Altura [m]
D2M1	Derrame de Desechos	19°48'22.3" N, 100°09'35.2" W	2630
D2M2H1, D2M2H2, D2M2H3	Camino, bajando al Arroyo las Dos Estrellas	19°48'22.2" N, 100°09'35.4" W	2622
D2M3H1, D2M3H2	15m después del muestreo anterior	19°48'25.4" N, 100°09'34" W	2622
M1_T_Iglesia, M2_T_Iglesia, M3_T_Iglesia, M4_T_Iglesia	Iglesia del Barrio del Carmen.	19°48'46.6" N, 100°10'26.09" W	2510
Arroyo_2Est	Arroyo las Dos Estrellas	19°47'41.7" N, 100°09'27.8" W	2637

Tabla 3.1 Relación de las 11 muestras tomadas en el segundo muestreo de campo realizado en Tlalpujahua.

A este muestreo se le agregaron 4 muestras más de un muestreo anterior realizado en el parque de béisbol de esta localidad: Campo\_BB\_T, CBT\_Base, CBT\_Media, CBT\_Cima.

Sumando las 66 muestras del muestreo del DMOT con estas once muestras, se tenían 81 muestras.

### 3.1.3. Guanajuato

El muestreo en este distrito minero se realizó principalmente en cuatro localidades dos de las cuales no eran propiamente jales si no zonas de minado y jales expuestas (socavón y veta madre expuestos), una tercera llamada Burrones sin seguridad de ser jales y la cuarta, la localidad de Pozuelos contenedora de jales.

El primer día de muestreo, 16 de diciembre de 2013, se acudió a los sitios de Pozuelos y al socavón abandonado de la mina San Ignacio.

Sitio de muestreo	Nombre de la muestra	Latitud	Longitud	Observaciones
Pozuelos	H1M1, H1M2, H1M3, H1M4	21°0'32.60"N	101°15'58.60"O	Perfil Terraza Media
	H2M1, H2M2, H2M3	21°00'34.1"N	101°15'57.8"O	Perfil Canal Río Pozuelos
	H3M1, H3M2, H3M3, H3M4	21°0'31.67"N	101°15'56.89"O	Perfil Terraza Alta
Mina San Ignacio	H4M1, H4M2, H4M3, H4M4	21° 3' 39.41"N	101° 13' 39.18"O	Socavón abandonado
La Valenciana	H5M1, H5M2, H5M3, H5M4, H5M5 y E5H6 (Veta Madre)	21°2'9.97"N	101°15'10.70"O	H5M1 y H5M2 son sulfuros; H5M3 es caolín; H5M4 son óxidos y sulfuros; H5M5 es roca alterada; y la E5H6 pertenece a la terraza intermedia entre la Veta Madre y la pared de jales
	E6M1, E6M2, E6M3	21°2'10.09"N	101°15'10.69"O	Pared de jales
	Valenciana Nivel Medio	21°2'8.00"N	101° 15' 11.23"O	Muestra intermedia entre La Veta Madre y la pared de jales
	Valenciana Río (pared) y Raíces Valenciana	21°2'9.3042"N	101°15'10.90"O	La primera es una mineralización fijada en las paredes del socavón abandonado y la segunda de raíces de plantas crecidas en la superficie pero que llegan hasta el socavón abandonado.
Burrones	Burrones Htes Infs. (Horizontes Inferiores), E6H1 media, E6H3 base, E6H3 media y E6H3 cima	21°0'37.81"N	101°17'50.8776"O	Se duda si esta zona muestreada pertenece realmente a los jales. Parte alta de la Presa Burrones.

Tabla 3.2 Descripción del muestreo realizado en Guanajuato.

En la localidad de Pozuelos se realizó el muestreo de tres perfiles a diferentes niveles del cerro, en la zona inferior, media y superior con el fin de definir también la distribución de los jales en la localidad con relación a la profundidad.

En el socavón abandonado de la mina San Ignacio se muestreó a distintos niveles del socavón expuesto. En esta localidad tal como es de esperarse, la mineralogía estaba claramente expuestas y las rocas eran de tonos rojizos y cafés debido a la oxidación, pues además de estar expuestas al medio ambiente, había un arroyo en la parte inferior de las rocas con mineralización.

Por otro lado, en la localidad de La Valenciana se muestreó bajo condiciones distintas tales como se describen en la tabla 3.2.

En el sitio de Burrones se muestreó la parte superior de la presa Burrones.

En ambos días se tomaron algunas mediciones de pH y CE en campo con el fin de realizar la comparación con los valores medidos en el laboratorio. Esto puede verse en el apartado 3.4 con mayor detalle.

Sumando las 81 muestras del DMOT y las 31 muestras de Guanajuato, se tenían 112 muestras en total de ambos distritos mineros.

### 3.2. Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Con el fin de determinar las concentraciones de EPT's en todas las muestras, tales como las reportadas por Corona-Chávez et al., 2010, se utilizó un equipo de Fluorescencia de Rayos X. (Ver ANEXO 1. Fluorescencia de Rayos X).

En el presente estudio se hizo uso del equipo X-Calibur, de marca XENOMETRIX (figura 3.2); el cual es un equipo de dispersión de energía (variante de la técnica de FRX, la otra variante son los equipos que trabajan con dispersión de onda).

Las muestras se pueden analizar de tres maneras diferentes: pulverizadas (Mylar), en pastillas (prensadas) o en perlas (fundidas).

En un principio las muestras fueron analizadas en polvo; posteriormente se utilizaron pastillas. El principio mecánico del equipo es el mismo: se irradian (durante un corto periodo de tiempo) con los rayos X generados en el tubo de rayos X de alta intensidad. Estos rayos se absorben fundamentalmente siguiendo la ley de Beer:  $\text{Log}(I_0/I) = K_d \Delta d$ , en donde  $I_0$  es la intensidad de los

rayos X incidentes,  $I$  la intensidad del haz no absorbido por la muestra,  $K_d$  es una constante de proporcionalidad y  $\Delta d$  es el espesor de la muestra. (Cornelis y Cornelius, 1996).



Figura 3.2 Equipo X-Calibur utilizado en el estudio de FRX.

La preparación de las pastillas se realizó de la siguiente manera: 3.3 gr de cada una de las muestras fueron mezclados con 0.58 gr de cera, posteriormente ésta mezcla se colocó sobre una capa de ácido bórico. Y fueron prensadas con la prensa hidráulica Atlas™ Manual 15Ton (15T) y 25 Ton (25T) aplicando 20Ton (figura 3.3). Esto siguiendo la metodología de Lozano Santa Cruz y Girón García, 1996; en donde se explica que: para la medición de elementos traza es indispensable preparar la muestra prensada con una dilución baja, es decir de 10-20% en peso de aglutinante, lo que evita la pérdida de señal de las líneas características de cada elemento. Siendo el aglutinante la cera wax-c micropolvo de Hoechst. La presión aplicada al preparar muestra prensada no afecta significativamente los elementos en baja concentración. Sin embargo, en los elementos con concentraciones altas se recomienda aplicar presiones de 15 ton/cm<sup>2</sup> o superiores (Figura 3.4a y 3.4b).

Para poder realizar las pruebas del contenido de cera-c (micropolvo Hoetch) se utilizaron las muestras Loes10 y Loes20, con un 10 y 20% de cera respectivamente. Primeramente se midieron los elementos mayores cuatro veces cada muestra con el fin de corroborar que el resultado reportado (medido) por el equipo fuera el mismo, de acuerdo a la comparación de los resultados y los valores reportados, se pudo observar que un valor medio de cera daría resultados óptimos; por lo que, la preparación de las pastillas posteriores se realizarían con un 15% de cera.



Figura 3.3 Prensa de la marca Specac utilizada en el laboratorio.

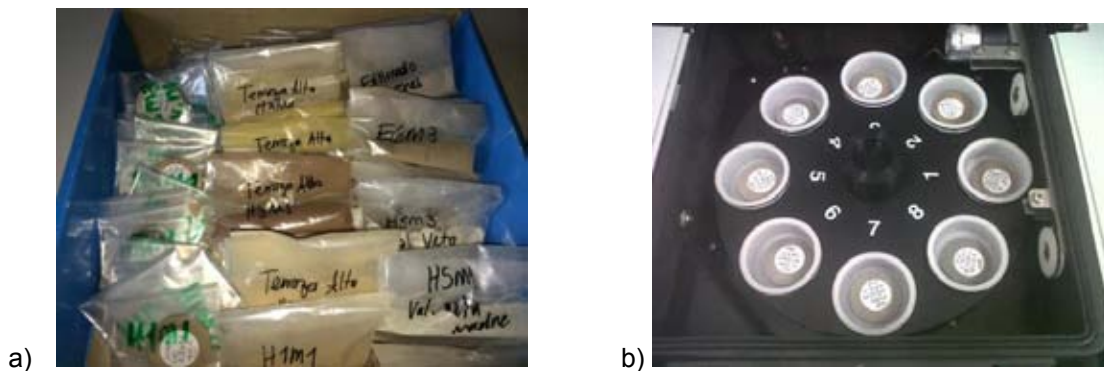


Figura 3.4 Representación de muestras de Guanajuato secas, molidas y prensadas a), y muestras hechas pastillas colocadas en el carrete del equipo X-Calibur de FRX b).

Con el fin de llevar a cabo la calibración del equipo X-Calibur, se utilizó un conjunto de 8 muestras de concentración conocida (Rufino Lozano et al, 2005). Este conjunto de muestras son llamadas IGL's: IGLa-1, IGLc-1, IGLd-1, IGLs-1, IGLgb-3, IGLsy-1, IGLsy-2, IGLsy-3, y fueron hechas pastillas con el fin de obtener los espectros radiactivos de los elementos traza (figura 3.5). Éstas muestras fueron medidas originalmente y reportadas por el Instituto de Geología, UNAM, en el Laboratorio de Fluorescencia de rayos X; y constan de distintos tipos de roca y ubicación, como son: Andesita (IGLa-1, Volcán Ceboruco, Nayarit, México), Caliza (IGLc-1, Cerro El Mingú, México), Dolomía (IGLd-1, Cerro El Mingú, México), Suelo laterítico (IGLs-1, Suelo de Arandas, Jalisco, México), Gabro (IGLgb-3, San Carlos, Tamaulipas, México), Sienita de nefelina (IGLsy-1, San Carlos, Tamaulipas, México), Sienita de egrina/augita (IGLsy-2, San Carlos, Tamaulipas, México), Sienita de egrina (IGLsy-4, San Carlos, Tamaulipas, México). (Ver ANEXO 3. Calibraciones, equipo X-Calibur).

Los datos obtenidos en las 8 muestras incluyen óxidos de elementos mayores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y elementos traza (Ba, Co, Cr, Cs, Cu, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, V, Y, Zn, Zr).



Figura 3.5 Conjunto de las 8 muestras IGL's utilizadas en la calibración del equipo X-Calibur.

El procedimiento para la medición en el equipo X-Calibur fue el siguiente:

- 1) Se introdujo el set de 8 muestras IGL (Rufino-Lozano et al., 2005) y se obtuvieron los espectros de cada una de ellas. Estos espectros se guardaron pues son necesarios para poder comparar la información que vaya leyendo el equipo de las muestras desconocidas (jales).
- 2) En el Software Next, se realizaron los procedimientos para la medición particular de cada elemento. Aquí se eligieron diversos parámetros como: ajuste de regresión lineal para las curvas, corriente, voltaje, tiempo de medición, línea de nivel de energía, DT óptimo, filtros aplicables, entre otros. (Figuras 3.6 y 3.7).

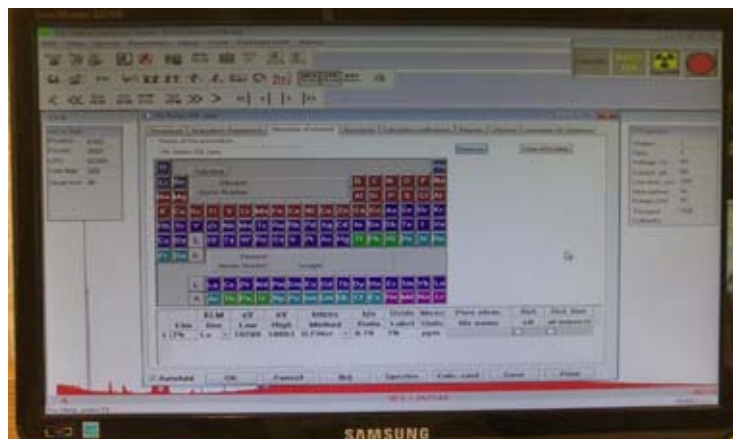


Figura 3.6 Creación de un procedimiento en el software Next.



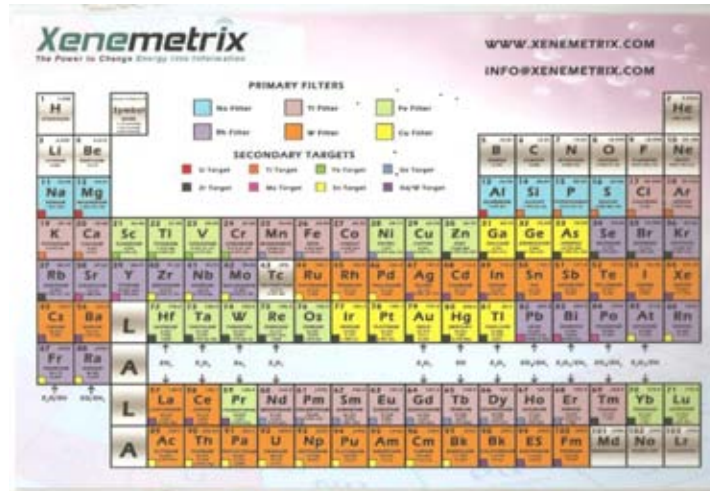


Figura 3.7 Elementos mayores y traza con sus respectivos filtros a aplicar, líneas de energía y propiedades de cada uno. (Tabla reportada para uso exclusivo del equipo X-Calibur).

- 3) En el mismo software Next se revisó que cada elemento tuviera un ajuste lineal y se observaron las unidades de la lectura de la concentración en %wt o en ppm (figura 3.8).

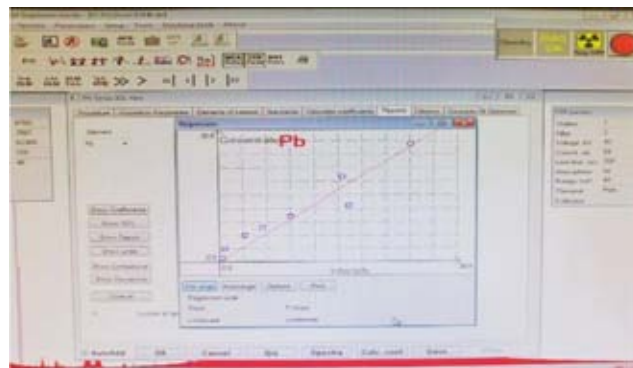


Figura 3.8 Calibración del Pb para usarse posteriormente en el procedimiento de medición de este EPT.

- 4) Una vez creado el procedimiento para cada elemento en particular, se procedió a crear el Batch en el mismo software del equipo. El cual, es un programa que lleva a cabo el procedimiento creado para cada elemento introduciendo las muestras como desconocidas, posteriormente se corría el Batch cuantas veces fuera necesario según el número de muestras (Figura 3.9).

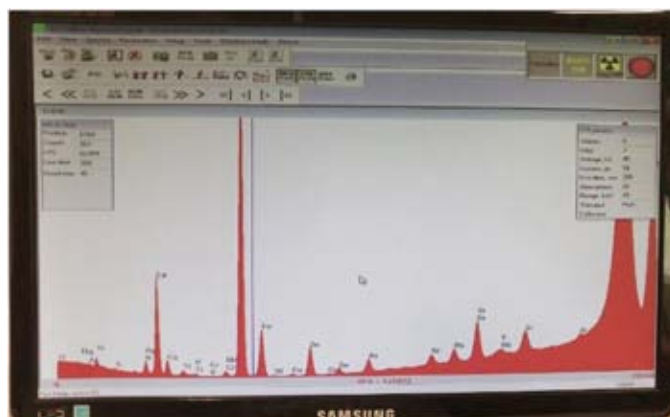


Figura 3.9 Espectro con los elementos que reconoció después de determinada lectura.

### 3.3. Susceptibilidad Magnética

Con ayuda del susceptibilímetro Bartington MS2 y uso del sensor MS2B (frecuencia dual), se midió la susceptibilidad magnética de todas las muestras del DMOT, y para la medición de esta misma propiedad de las muestras de Guanajuato se utilizó el susceptibilímetro Bartington MS3 y se hizo uso del mismo sensor MS2B. Ver figura 3.10. (Ver ANEXO 4. Susceptibilidad Magnética).



Figura 3.10 Susceptibilímetro Bartington MS2 y Susceptibilímetro MS3 conectado al sensor MS2B.

Para realizar la medición de  $\chi$  de las muestras, se vertió aproximadamente 6gr de jales en frascos cilíndricos transparentes y se etiquetaron (ver figura 3.11). Así se midieron las muestras reportadas por *Corona-Chávez et. al., 2010* (DMOT), incluyendo las muestras tomadas en campo en el segundo muestreo de Tlalpujahuá; además del muestreo realizado en Guanajuato.

### 3.4. Medición de Propiedades Físicoquímicas

Para enriquecer nuestro estudio, se realizaron mediciones de 3 propiedades físico-químicas: pH, Eh y Conductividad Eléctrica (CE).

Debido a las características de los yacimientos en campo y con el fin de comparar que tanto variaban las propiedades medidas en campo de las medidas en laboratorio, se mezcló agua destilada en contenedores con muestra, además realizar mediciones directamente al agua corriente en el caso del arroyo de La Valenciana con un pHmetro portátil.

Por otro lado, en el laboratorio se siguió el método potenciométrico (*Willard et al., 1974; Bates, 1983*). Solo se pudieron comparar algunas muestras pues no todas pudieron deshacerse en campo y mojarse. (Ver ANEXO 6. Propiedades físicoquímicas, lecturas en campo y en laboratorio).

Para poder realizar las mediciones en laboratorio, las muestras se colocaron en distintos vasos de precipitado y se secaron en un horno para posteriormente molerse, agregarles agua destilada y obtener resultados más precisos en las lecturas de las propiedades físico-químicas.

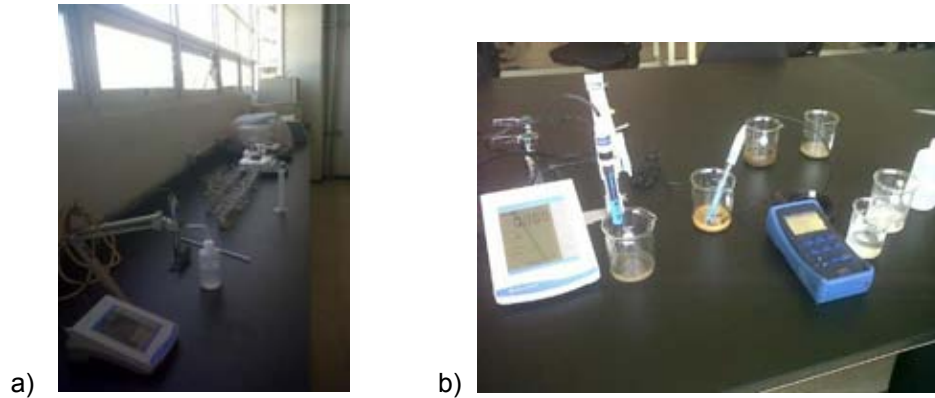


Figura 3.11 Distribución de las muestras en los distintos vasos de precipitado. Los vasos se etiquetaron y las muestras se midieron en orden según el perfil y el horizonte.

Por otro lado, en el laboratorio se siguió el método potenciométrico (*Willard et al., 1974; Bates, 1983*):

- 1) Se pesó 1gr de suelo de jale en un vaso de precipitado de 140mL o de 200mL.
- 2) Se agregaron 30mL de agua destilada.

- 3) Se colocaron los vasos con muestra y agua en las parrillas agitadoras magnéticas y se agitaron por 20min, aproximadamente a 300rpm.
- 4) Se ajustó el potenciómetro con las soluciones ya agitadas. Pasados 10 minutos, se midió el pH y Eh con el potenciómetro y con el conductivímetro la CE. (Figuras 3.12a y 3.12b).



Figuras 3.12a y 3.12b. Representación del proceso completo en laboratorio (a) y medición de Eh y pH (b).

Para la clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH se presenta el cuadro siguiente de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 (tabla 3.3):

<b>Clasificación</b>	<b>pH</b>
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Medianamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

Tabla 3.3 Escala de pH según la NOM-021-RECNAT-2000.

## 4. Resultados

### 4.1 Análisis Multivariado

Este análisis se realizó con la finalidad de revisar las relaciones estadísticas entre los datos de ambos distritos, esto es correlaciones entre la  $\chi$ , los datos de FRX y la medición de propiedades físico-químicas, regresiones lineales múltiples y ajustes lineales de curvas. (Ver ANEXO 2. Análisis Multivariado y ANEXO 5. FRX vs Susceptibilidad Magnética).

DMOT

Análisis multivariado para el DMOT. Ver tablas 4.1 y 4.2.

Datos/Variables: pH, CE, Eh, Pb, As, Cr, Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>.

Selección de la Variable:  $\chi$  magnética.

	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>Eh</i>	<i>Pb</i>	<i>As</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe2O3t</i>
Recuento	81	81	81	81	81	81	81
Promedio	8.65383	813.343	195.806	167.705	79.4112	84.1541	4.53049
Desviación Estándar	0.626242	809.516	38.0695	96.986	42.3761	144.13	1.80694
Coeficiente de Variación	7.23659%	99.5294%	19.4424%	57.8314%	53.3628%	171.269%	39.8838%
Mínimo	6.49	25.3	137.7	17.0	3.45	0	1.8
Máximo	9.66	3036.67	315.23	448.36	204.63	1027.0	11.6
Rango	3.17	3011.37	177.53	431.36	201.18	1027.0	9.8
Sesgo Estandarizado	-5.18886	3.59525	4.56178	0.848606	0.54321	20.9923	5.57088
Curtosis Estandarizada	4.68132	-0.199799	2.16977	-0.825722	0.201224	62.411	5.41413

Tabla 4.1 Resumen estadístico del DMOT. Pb y As presentan sesgo y curtosis estandarizados (no están en color rojo), esto quiere decir que la muestra proviene de una distribución normal (rango de normalidad, -2 a +2). Al hacer las comparaciones como muestras pareadas, los datos reportados como fuera del rango de procedencia de una distribución normal siguen en la misma posición.

	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>Eh</i>	<i>Pb</i>	<i>As</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe2O3t</i>
<i>pH</i>		-0.2698	-0.8218	0.5132	0.6006	0.0260	-0.7119
		0.0149	0.0000	0.0000	0.0000	0.8181	0.0000
<i>CE</i>	-0.2698		0.2548	-0.0101	0.0947	-0.0142	-0.0887
	0.0149		0.0217	0.9286	0.4004	0.9002	0.4310
<i>Eh</i>	-0.8218	0.2548		-0.5422	-0.6185	-0.0674	0.6155
	0.0000	0.0217		0.0000	0.0000	0.5502	0.0000
<i>Pb</i>	0.5132	-0.0101	-0.5422		0.8391	-0.0213	-0.5626
	0.0000	0.9286	0.0000		0.0000	0.8504	0.0000
<i>As</i>	0.6006	0.0947	-0.6185	0.8391		0.0624	-0.7479
	0.0000	0.4004	0.0000	0.0000		0.5803	0.0000
<i>Cr</i>	0.0260	-0.0142	-0.0674	-0.0213	0.0624		-0.0117
	0.8181	0.9002	0.5502	0.8504	0.5803		0.9174
<i>Fe2O3t</i>	-0.7119	-0.0887	0.6155	-0.5626	-0.7479	-0.0117	
	0.0000	0.4310	0.0000	0.0000	0.0000	0.9174	

Tabla 4.2 Correlaciones del DMOT. El rango de los coeficientes de correlación va de -1 a +1 (fuerza de la relación lineal entre las variables). El segundo número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas; < 0.05 indican correlaciones con un nivel de confianza del 95.0%.

Se intentó realizar el ajuste lineal de curvas entre la susceptibilidad magnética, la CE, los tres EPT's (Pb, As, Cr) y el Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>; sin embargo, la única correlación mayor a 0.7 fue la de la  $\chi$  vs Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> así que se buscó relacionar los EPT's con el Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>. De esta relación, se obtuvieron las correlaciones: -0.7119 con el pH, -0.0887 con la CE, -0.7479 con el As, -0.5626 con el Pb, -0.0117 con el Cr, por lo que se ideó calcular las concentraciones de As y Pb a partir de la ecuación obtenida de la relación  $\chi$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>. Sin embargo, los resultados reportaron concentraciones de As y Pb muy alejadas de los valores reportados en algunos casos y en otros muy cerca de los mismos, por lo que no serían útiles en un modelo predictivo.

Debido a lo anterior, se buscó relacionar la  $\chi$  con el pH y con los EPT's y las demás propiedades; esto se realizó mediante gráficas 3D para observar a detalle el comportamiento de la  $\chi$  en relación al pH y la concentración de EPT's, agregando además los límites de concentraciones marcados por las normas ambientales. Además se realizaron gráficas 3D de interpolaciones entre los mismos tres ejes ( $\chi$ , pH y EPT's) con el fin de acotar los rangos de  $\chi$  y pH indicativos de mayor concentración de EPT's. (Apartado 4.10). También se realizó la separación de jales y suelos en este distrito obteniendo mejores correlaciones (apartados 4.2 a 4.4).

## GUANAJUATO

Análisis multivariado para el DMG. Ver tablas 4.3 y 4.4.

Datos/Variables: pH, CE, Eh, Pb, As, Cr, Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>.

Selección de la Variable:  $\chi$  magnética.

	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>Eh</i>	<i>Pb</i>	<i>As</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe2O3t</i>
Recuento	32	32	32	32	32	32	32
Promedio	7.10438	1772.75	299.213	198.779	79.2128	93.2438	7.225
Desviación Estándar	1.92833	4359.79	104.438	149.821	65.0382	83.6692	4.91942
Coefficiente de Variación	27.1429%	245.934%	34.9041%	75.3705%	82.1057%	89.7317%	68.0888%
Mínimo	3.96	25.34	156.87	1.93	0	0	0.1

Máximo	9.28	21853.3	494.77	539.86	250.86	294.67	19.9
Rango	5.32	21828.0	337.9	537.93	250.86	294.67	19.8
Sesgo Estandarizado	-2.01476	9.05845	1.84535	0.877477	1.38061	2.63632	3.60119
Curtosis Estandarizada	-1.1017	18.5576	-0.835072	-0.983879	-0.255357	0.417488	2.00067

Tabla 4.3 Resumen estadístico del DMG. Pb y As presentan sesgo y curtosis estandarizados (no están en color rojo), esto quiere decir que la muestra proviene de una distribución normal (rango de normalidad, -2 a +2).

	pH	CE	Eh	Pb	As	Cr	Fe2O3t
pH		-0.4143	-0.9467	-0.3409	-0.3725	-0.0558	-0.6882
		0.0184	0.0000	0.0562	0.0358	0.7618	0.0000
CE	-0.4143		0.4081	-0.1897	-0.1900	-0.1130	-0.1894
	0.0184		0.0204	0.2985	0.2976	0.5382	0.2991
Eh	-0.9467	0.4081		0.2991	0.3315	0.0476	0.6557
	0.0000	0.0204		0.0963	0.0638	0.7957	0.0000
Pb	-0.3409	-0.1897	0.2991		0.9892	0.0756	0.5059
	0.0562	0.2985	0.0963		0.0000	0.6811	0.0031
As	-0.3725	-0.1900	0.3315	0.9892		0.0975	0.5835
	0.0358	0.2976	0.0638	0.0000		0.5954	0.0005
Cr	-0.0558	-0.1130	0.0476	0.0756	0.0975		0.3115
	0.7618	0.5382	0.7957	0.6811	0.5954		0.0827
Fe2O3t	-0.6882	-0.1894	0.6557	0.5059	0.5835	0.3115	
	0.0000	0.2991	0.0000	0.0031	0.0005	0.0827	

Tabla 4.4 Correlaciones del DMG. El rango de los coeficientes de correlación va de -1 a +1 (fuerza de la relación lineal entre las variables). El segundo número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas; < 0.05 indican correlaciones con un nivel de confianza del 95.0%.

Los ajustes de curvas entre la  $\chi$  y el pH, y entre la  $\chi$  y los demás elementos, reportaron correlaciones muy bajas.

Para evaluar las relaciones entre los valores de concentración de los EPT's y los valores de  $\chi$  como muestras pareadas (compara ambas columnas de datos numéricos y calcula intervalos de confianza)



se separaron las muestras de Guanajuato en dos grupos, las muestras provenientes de jales y las que provenían de los socavones. El resultado de estos análisis indicó que no hay desviaciones significativas de la normalidad, lo que no invalida pruebas estadísticas con referencia a la desviación estándar. Ambos valores estadísticos se encontraron dentro de los rangos esperados para datos provenientes de una distribución normal. Esto resultó válido para el As, Cr y Pb en relación a la  $\chi$  para ambos grupos de Guanajuato.

Debido a lo anterior, se concluyó realizar de igual manera que en el DMOT las gráficas 3D (apartado 4.10); además de la separación de jales y socavones para el caso del DMG (apartados 4.5 a 4.8). Además de observar las variaciones en las concentraciones de EPT's y Fe, los valores de  $\chi$  y de las propiedades físico-químicas medidas en perfiles 2D en relación a la profundidad u orden de variación en las estaciones muestreadas en campo. (Ver ANEXO 7. Distribución de EPT's y propiedades fisicoquímicas en perfiles).

#### 4.2 Tablas de datos y tendencias

Con el fin analizar la información de ambos distritos de manera integral, es decir, juntando los estudios geoquímicos con los magnéticos, se revisaron trabajos anteriores del DMOT (Corona-Chávez et al., 2010 y Martínez-Medina, 2009) y del DMG (Ramos-Arroyo & Siebe-Grabach, 2005) con el fin de detallar el muestreo realizado en campo en el caso del DMOT así como obtener información geológica e histórica de cada distrito. De esta revisión, se conoció que las muestras del DMOT no eran solo jales, si no también suelos por lo que se separaron las muestras en suelos y jales para el DMOT (incluido el segundo muestreo en Tlalpujahuá) y en socavones y jales para el DMG. Esto se realizó debido a que los jales se ven afectados no sólo por la litología, textura, método de explotación de la mina, sino también por las condiciones propias de cada depósito de jales. Todo lo mencionado anteriormente, entre otras características se ven reflejadas en los resultados presentados en el presente capítulo.

Para representar las relaciones entre la  $\chi$  y los demás elementos y propiedades físico-químicas, se realizaron los gráficos de los perfiles del muestreo en el DMOT tanto para jales (tabla 4.5 y figuras

4.1 a 4.5) como para suelos (tabla 4.6 y figuras 4.6 y 4.7); además se realizaron las gráficas de las dispersiones entre los datos con el fin de definir las tendencias de la mayoría de los datos. Todo esto se realizó también para los jales del DMG (tabla 4.7 y figuras 4.8 a 4.10) a diferencia que en vez de suelos, se muestrearon socavones (tabla 4.8 y figuras 4.11 y 4.12). Se detallan particularmente las localidades de la terraza alta de Pozuelos (tabla 4.9 y figura 4.13) y Burrones (tabla 4.10 y figura 4.14).

Uno de los perfiles con mayor dispersión en las mediciones es el de la Estación E3. Este perfil es un ejemplo de la importancia de la división de las muestras en jales y suelos.

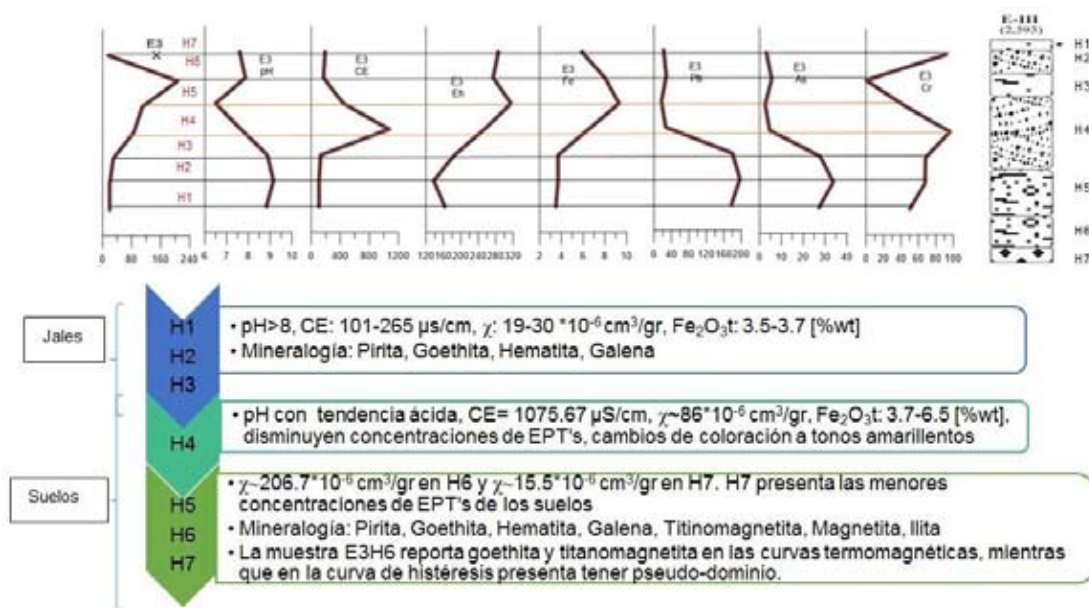


Figura 4.1 Variabilidad de las mediciones de la Estación 3 del DMOT. En la columna estratigráfica, H1 corresponde a textura franca, E2 y E4 a textura arcilla-limosa, E3 a franco-arcilla-arenosa, E5 y E6 a franco-arcillosa y E7 sin textura (Corona-Chávez et al., 2010).

#### 4.3 DMOT\_JALES

La siguiente tabla (4.5) muestra los resultados obtenidos para  $\chi$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ , Pb, As, Cr, pH y CE de las 57 muestras de jales del DMOT.

Muestra	$\chi$	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$	Pb	As	Cr	pH	CE
E2H1	31	4.2	172	79	63	8.05	267.00
E2H2	46.2	4.9	171	68	61	9.33	130.73
E2H3	59.3	3.7	184	83	46	9.23	101.80
E3H1	19.7	3.5	178	73	50	8.83	107.83
E3H2	19.4	3.7	197	91	68	9.15	108.30
E3H3	29.9	3.7	180	75	68	8.87	128.97
E4H2	29.7	4.1	167	74	58	9.06	190.10
E4H3	11	4.9	182	69	54	9.01	540.33
E9H1	45	3.7	180	82	49	8.87	126.03
E9H2	9.7	3.7	193	88	89	9.34	126.33
E9H4	51	3.3	263	122	86	8.80	2896.67
E10H1	61.33	4.8	227	87	39	8.33	1719.00
E10H2	38.6	3.4	159	71	34	9.66	1865.00
E10H4	7.8	3.3	211	101	40	8.65	2523.33
E11H2	76	3.9	256	121	8	9.19	117.70
E11H3	56.2	3.3	143	66	47	9.35	103.67
E11H4	8.1	3.6	198	93	29	8.74	1525.33
E12H2	73.4	5.8	115	42	44	8.51	117.13
E12H3	6.7	2	141	58	33	9.32	77.47
E13H1	56.4	3.5	250	120	38	8.72	1547.67
E13H2	16.97	4.1	196	80	39	8.33	3036.67
E13H3	5.03	4.4	214	83	41	8.49	1077.33
E13H4	12.4	3.4	202	94	42	9.13	205.33
E5H2	55.66	3.4	271	131	46	9.32	120.50
E5H3A	52.9	2.6	191	84	88	9.53	89.70
E5H3B	83.13	4.92	257	101	9	9.35	117.70
E5H3C	54.1	4.27	301	117	78	9.45	91.83
E5H4	24.5	3.1	273	129	169	9.36	128.00
E5H5	35.3	3.7	304	154	37	8.76	1222.00
E7H1	2.8	1.8	448	205	119	9.21	326.00
E7H3	4	3.25	278	117	22	9.29	160.20

<b>E7H4</b>	4.1	3.92	299	126	1027	8.86	476.00
<b>E7H5</b>	104.8	9.1	44	19	91	6.53	855.00
<b>E7H6</b>	112.5	9.3	28	16	83	7.16	461.00
<b>E7H7</b>	112.9	11.6	38	16	108	8.17	173.40
<b>E7media</b>	4.5	2.39	221	134	194	9.28	2060.00
<b>E7cima</b>	18.7	2.72	360	154	58	8.78	896.00
<b>E8H1</b>	11.6	1.8	368	174	37	9.01	665.00
<b>E8H2</b>	93.46	7.13	67	25	74	8.41	838.00
<b>E8H3</b>	7	2.05	274	146	79	9.06	731.00
<b>E8H4</b>	123.4	8.38	20	25	97	7.19	2400.00
<b>E14H1</b>	62.13	5.79	238	86	51	8.72	160.50
<b>E14H2</b>	66.7	4.7	205	95	38	8.88	483.00
<b>E14H3</b>	66.93	4.36	255	101	53	8.71	618.00
<b>E14H4</b>	73.67	4.71	202	78	27	8.72	102.23
<b>E14H5</b>	76.87	3.99	231	86	32	8.86	802.33
<b>E14H6</b>	49.6	4	250	98	40	8.73	1735.33
<b>E14H7</b>	76.3	4.26	201	81	31	8.77	1444.00
<b>E14H8</b>	32.4	3.3	307	146	0.2	8.72	1854.00
<b>Dia2_M2H1</b>	44	3.24	40	63	79	8.42	2120.00
<b>Dia2_M2H2</b>	54	3.41	42	64	65	8.64	903.67
<b>Dia2_M2H3</b>	56	3.72	67	73	95	8.61	1785.67
<b>Dia2_M3H1</b>	66	4.04	52	73	878	8.72	977.67
<b>Campo_BB_T</b>	4.5	2.05	108	85	30	8.73	1151.67
<b>CBT_Cima</b>	63.5	3.62	79	120	134	8.63	1987.00
<b>CBT_Media</b>	32.1	3.45	55	82	52	8.63	1427.33
<b>CBT_Base</b>	49.9	3.56	53	95	73	8.56	1818.67

Tabla 4.5 Datos de las mediciones realizadas a los jales del DMOT.

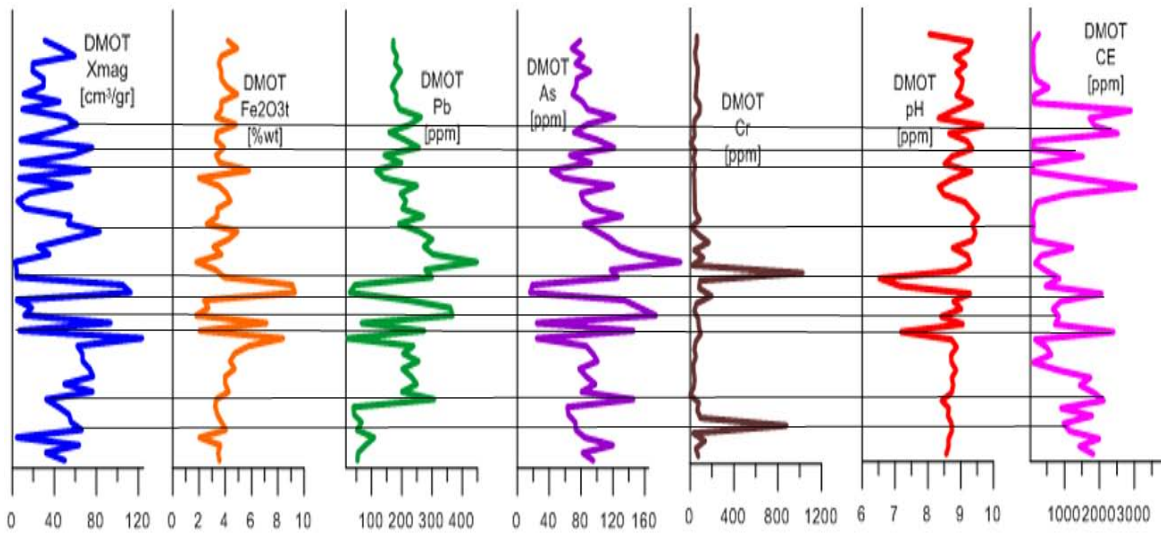


Figura 4.2 Perfiles de jales del DMOT, correlacionando cada horizonte con sus distintas mediciones. Es importante mencionar que no hay relación con la profundidad solo en los mismos niveles de horizontes.

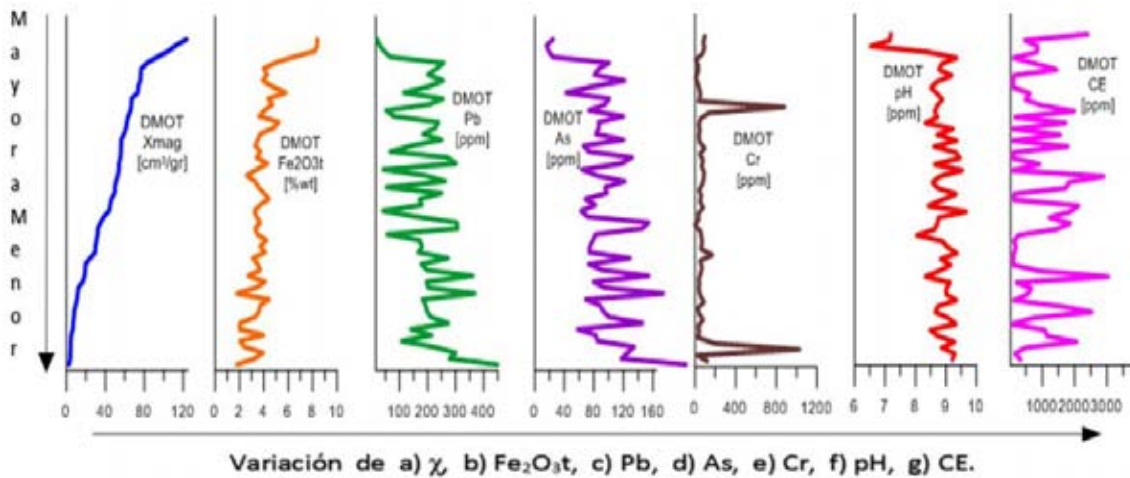
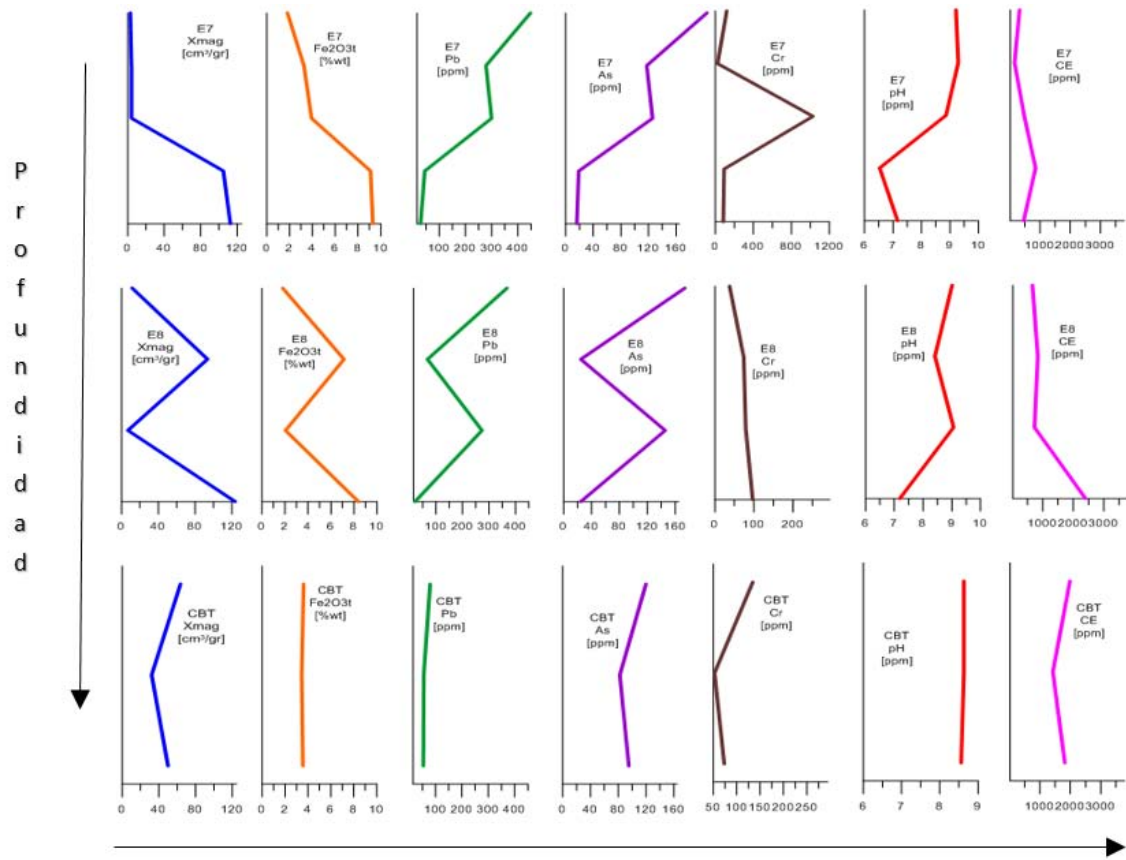
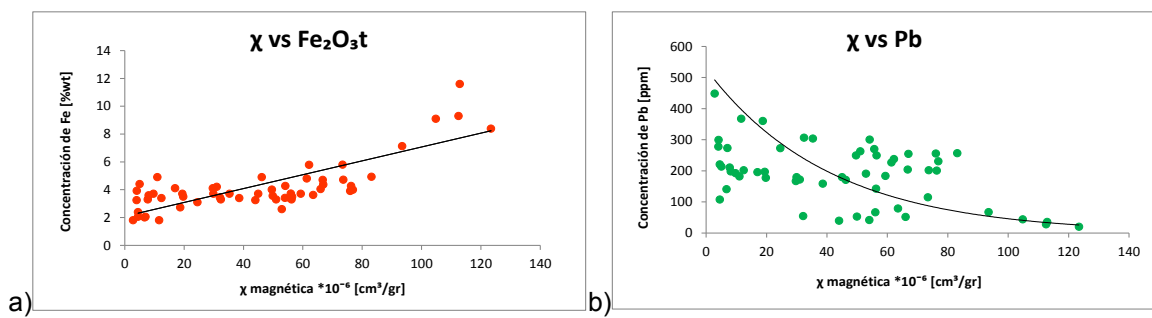


Figura 4.3 Perfiles de jales del DMOT, presentando un decremento de la  $\chi$  hacia la parte inferior del perfil. Los horizontes de los demás perfiles se ajustaron a los horizontes ordenados de acuerdo a  $\chi$ .



Variación de a)  $\chi$ , b)  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ , c) Pb, d) As, e) Cr, f) pH, g) CE.

Figura 4.4 Se observan las relaciones a profundidad de las distintas mediciones realizadas a las muestras de jales del DMOT de las estaciones E7 y E8 (El Oro), y CBT (Tlalpujahuá).



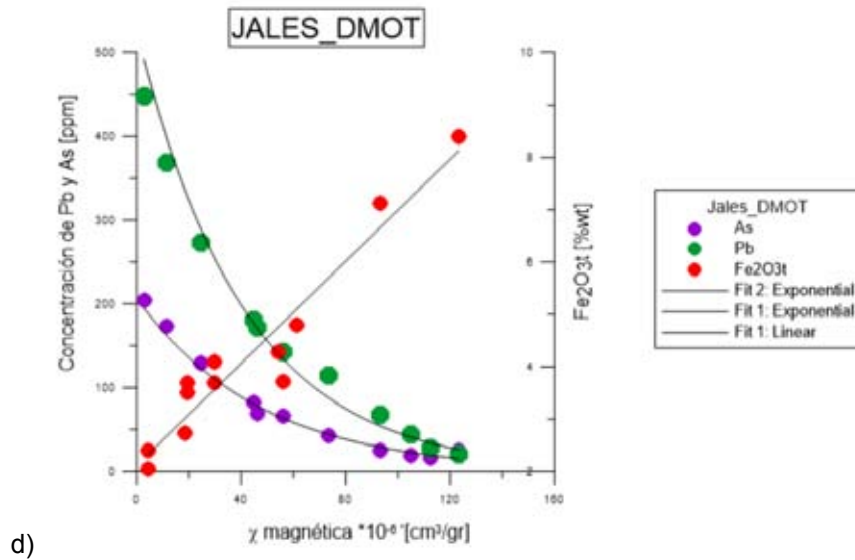
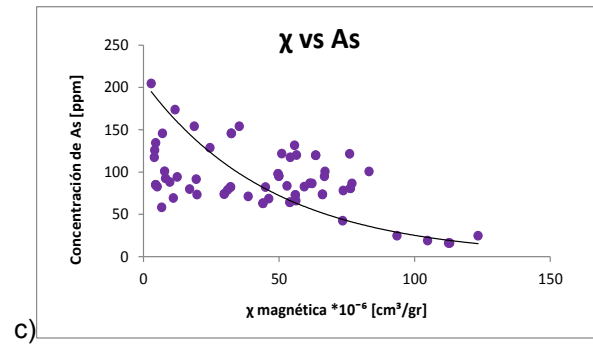


Figura 4.5 Tendencias de los EPT's con relación a la  $\chi$  y el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$  en los jales del DMOT (muestras seleccionadas). Relaciones: a)  $\chi$ -Fe, b)  $\chi$ -Pb, c)  $\chi$ -As y d)  $\chi$ -elementos.

#### 4.4 DMOT\_SUELOS

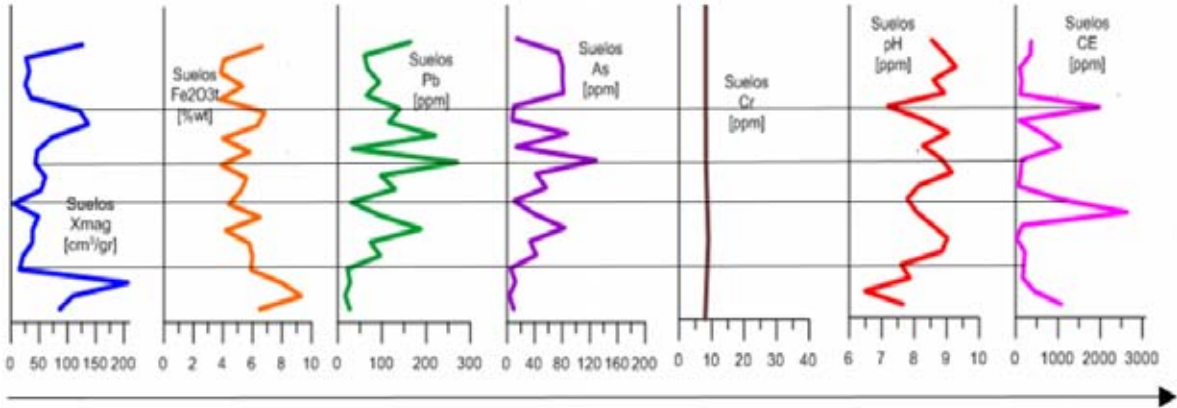
La siguiente tabla muestra los datos de las mediciones de  $\chi$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ , Pb, As, Cr, pH y CE para las 26 muestras de suelos del DMOT.

Muestra	$\chi$	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$	Pb	As	Cr	pH	CE
---------	--------	---------------------------------	----	----	----	----	----

<b>E3H4</b>	86.3	6.5	27	9	96	7.65	1075.67
<b>E3H5</b>	109.8	9.3	17	3	45	6.49	443.33
<b>E3H6</b>	206.7	8	28	12	0	7.86	168.97
<b>E3H7</b>	15.5	5.9	22	5	91	7.60	190.93
<b>E9H3</b>	21	6	96	42	73	8.85	213.33
<b>E9H5</b>	37.8	5.8	74	33	104	9.02	25.30
<b>E11H1</b>	38.3	4.2	188	83	59	8.55	154.03
<b>E11H5</b>	48.4	6.5	96	40	113	8.06	2636.67
<b>E11H6</b>	4.4	4.4	31	10	16	7.79	1036.00
<b>E12H1</b>	53	5.2	130	57	58	8.14	76.03
<b>E12H4</b>	60.8	5.6	98	42	74	9.16	116.07
<b>E5H1</b>	43.46	3.9	271	129	49	8.84	144.60
<b>E5H6</b>	46.5	5.8	33	13	87	8.27	1053.00
<b>E8H5</b>	73.17	4	220	86	32	9.04	631.00
<b>E8H6</b>	48.63	4	246	98	39	8.24	1758.33
<b>E8H7</b>	71.57	3.98	204	81	0	8.61	1180.00
<b>E8H8</b>	40.6	4.22	291	120	39	8.34	2026.67
<b>E8H9</b>	71.57	4	204	81	0	8.61	1180
<b>E8H10</b>	40.60	4.2	291	120	39	8.34	2026.67
<b>Dia2_M1</b>	136.7	6.35	116	7	67	8.26	89.60
<b>Dia2_M3H2</b>	122.3	6.82	140	10	52	7.20	1973.67
<b>M1_T_Iglesia</b>	35.4	3.84	65	82	69	8.92	108.27
<b>M2_T_Iglesia</b>	25.8	5.33	94	80	134	8.59	144.13
<b>M3_T_Iglesia</b>	32.5	3.86	67	80	77	9.28	99.40
<b>M4_T_Iglesia</b>	27.0	4.07	61	74	65	8.93	347.33
<b>Arroyo_2Estr</b>	125.9	6.64	165	14	154	8.54	366.33

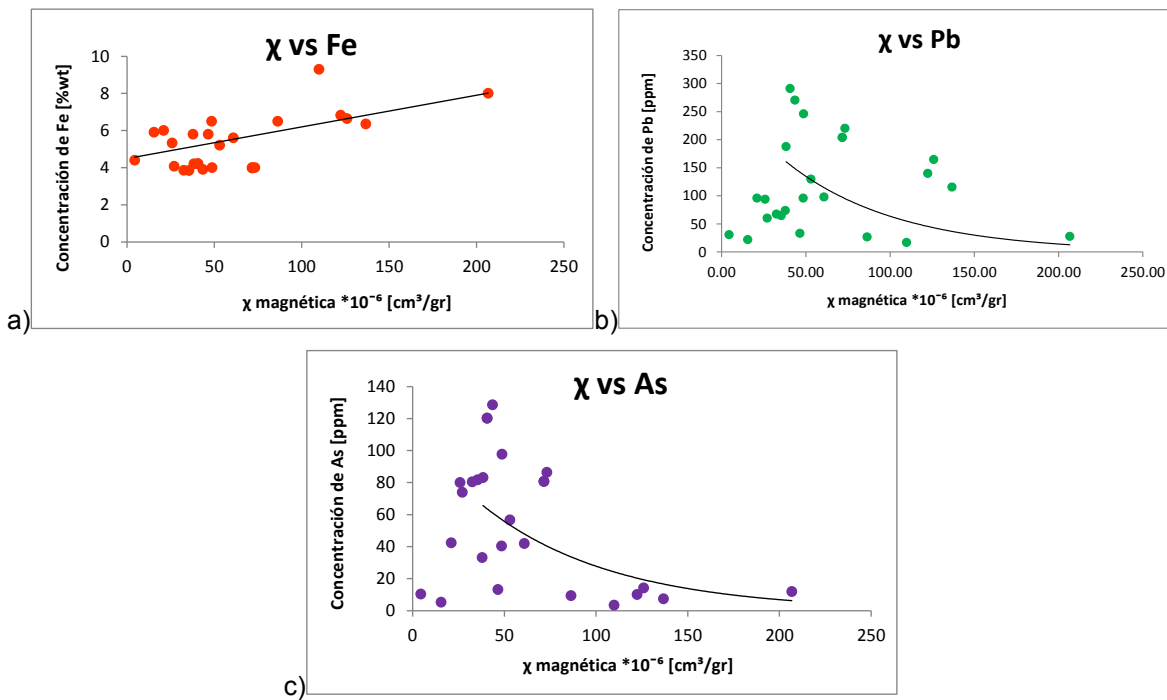
Tabla 4.6 Datos de las mediciones realizadas a los suelos del DMOT.





Variación de a)  $\chi$ , b)  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ , c) Pb, d) As, e) Cr, f) pH, g) CE.

Figura 4.6 Relación de la variación de la  $\chi$  en relación a las concentraciones de elementos y propiedades fisicoquímicas en suelos del DMOT.



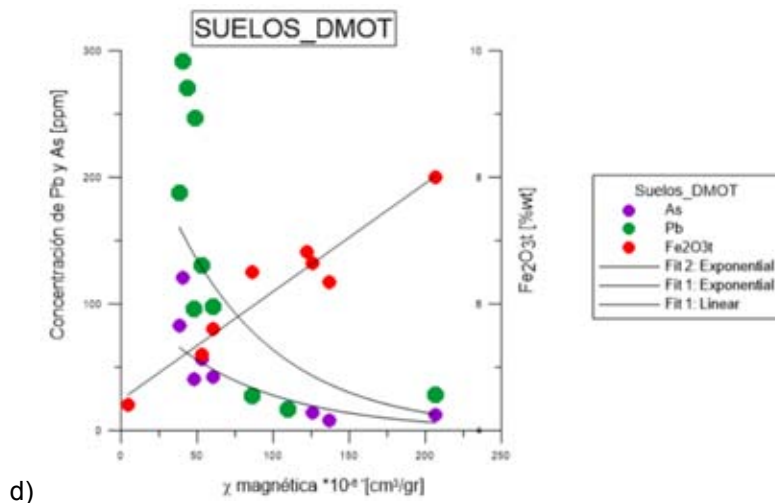


Figura 4.7 Tendencias de los EPT's en relación a la  $\chi$  y al contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$  en los suelos del DMOT. Relaciones: a)  $\chi$ -Fe, b)  $\chi$ -Pb, c)  $\chi$ -As y d)  $\chi$ -elementos.

#### 4.5 DMG\_JALES

Muestra	$\chi$	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$	Pb	As	Cr	pH	CE
H3M1 (TA)	36.40	8.6	108	39	193	6.63	43.06
H3M2 (TA)	6.33	7.8	394	159	56	6.79	37.94
H3M3 (TA)	7.11	5.5	318	113	64	7.29	32.10
H3M4 (TA)	8.66	5.1	305	109	32	6.35	25.34
H1M1 (TM)	27.13	5.3	406	162	61	8.64	132.97
H1M2 (TM)	17.32	5.4	397	157	62	8.62	360.90
H1M3 (TM)	45.51	4.8	295	120	57	8.22	2293.33
H1M4 (TM)	14.28	4.9	300	115	56	8.29	1672.33
H2M1 (CRP)	21.17	5.1	185	70	49	8.25	1617.33
H2M2 (CRP)	18.69	5.0	173	67	295	8.14	3783.67
H2M3 (CRP)	18.26	5.2	163	67	69	8.38	1800.00
E5H6	18.16	5.7	231	89	292	8.44	312.33
ValNivMed	15.30	4.3	144	49	68	8.86	43.84
E6M1	9.38	3.8	112	43	125	8.99	73.11
E6M2	11.72	4.0	124	44	202	9.28	69.33

<b>E6M3</b>	16.02	3.9	127	47	57	8.30	726.17
-------------	-------	-----	-----	----	----	------	--------

Tabla 4.7 Datos de las mediciones realizadas a los jales del DMG.

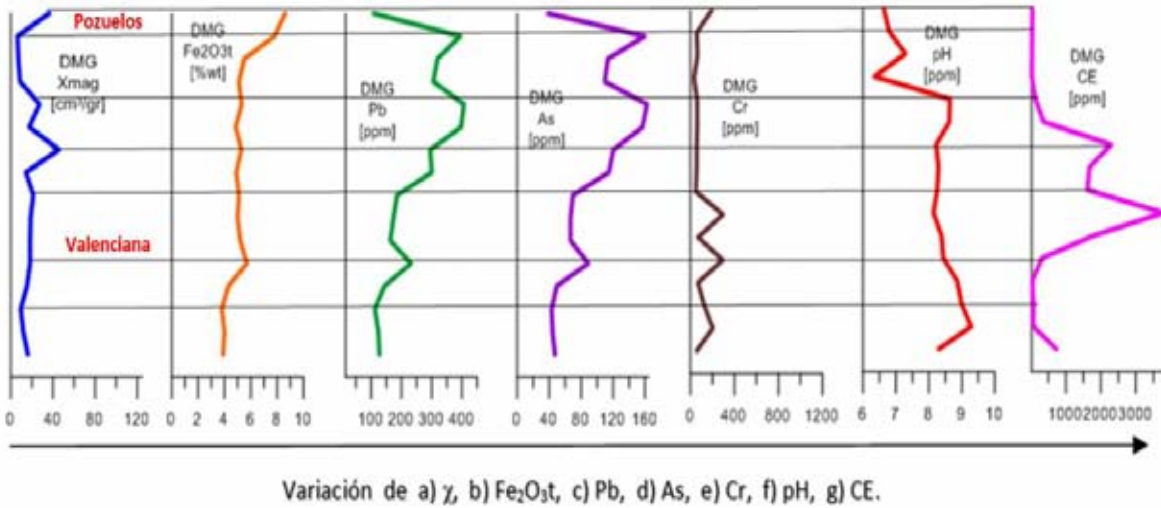


Figura 4.8 Tendencias de los EPT's en relación a la  $\chi$  y el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$  en los jales del DMG.

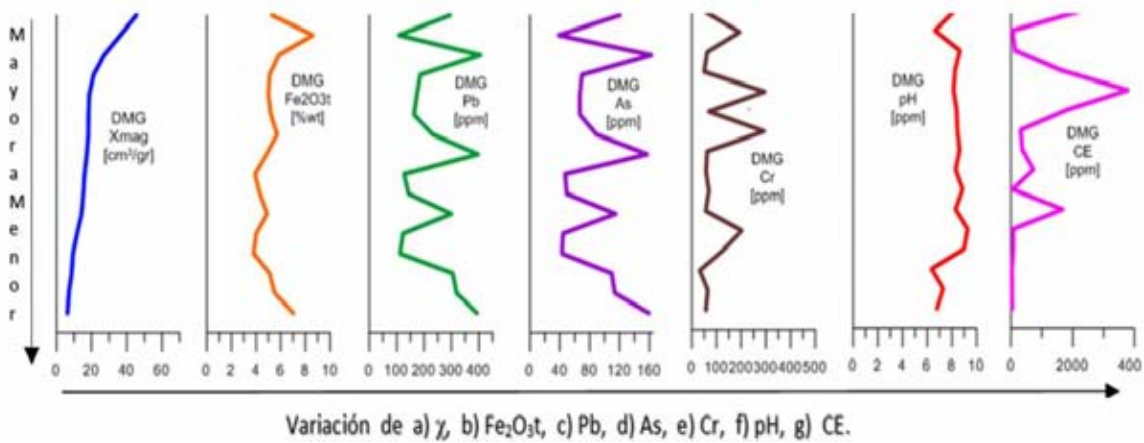


Figura 4.9 Tendencias ordenadas de mayor a menor de  $\chi$  con relación a la profundidad para los jales del DMG.

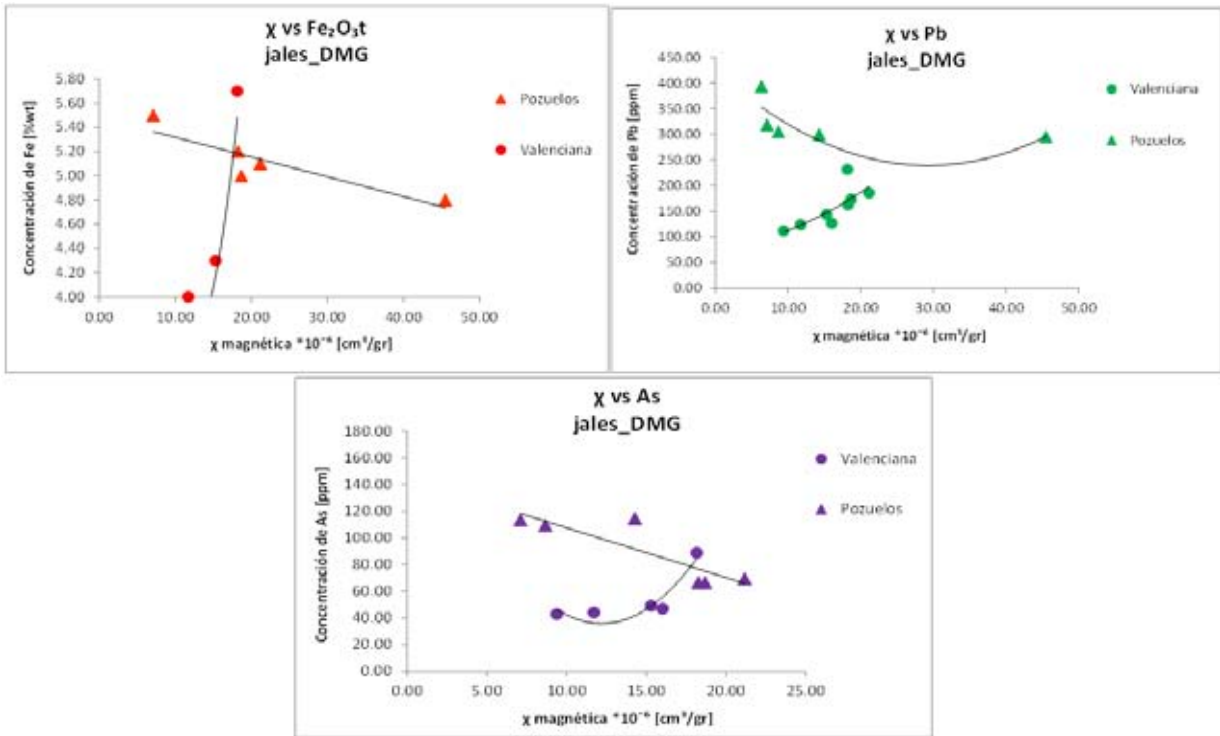


Figura 4.10 Tendencias de los EPT's con relación a la  $\chi$  y el contenido de  $Fe_2O_3t$  en los jales del DMG.

#### 4.6 DMG\_SOCAVONES

Muestra	$\chi$	$Fe_2O_3t$	Pb	As	Cr	pH	CE
Soc. M.S.I. H4M1	22.35	19.90	392	174	155	4.03	619.83
Soc. M.S.I. H4M2	47.09	18.10	322	145	71	4.03	1627.33
Soc. M.S.I. H4M3	51.86	17.30	286	132	107	4.03	1244.00
Soc. M.S.I. H4M4	38.05	19.20	540	251	187	4.03	1638.67
Valenc. H5M1	0.44	5.60	171	55	56	4.00	13040.00
Valenc. H5M2	5.84	9.10	415	155	25	3.98	36.44
Valenc. H5M3	0.54	1.80	8	0	32	3.96	21853.33
Valenc. H5M4	9.58	12.10	84	34	197	3.97	571.50
Val_Roca Alt H5M5	8.68	9.40	31	10	100	7.39	32.94

Tabla 4.8 Datos de las mediciones realizadas a los socavones del DMG.

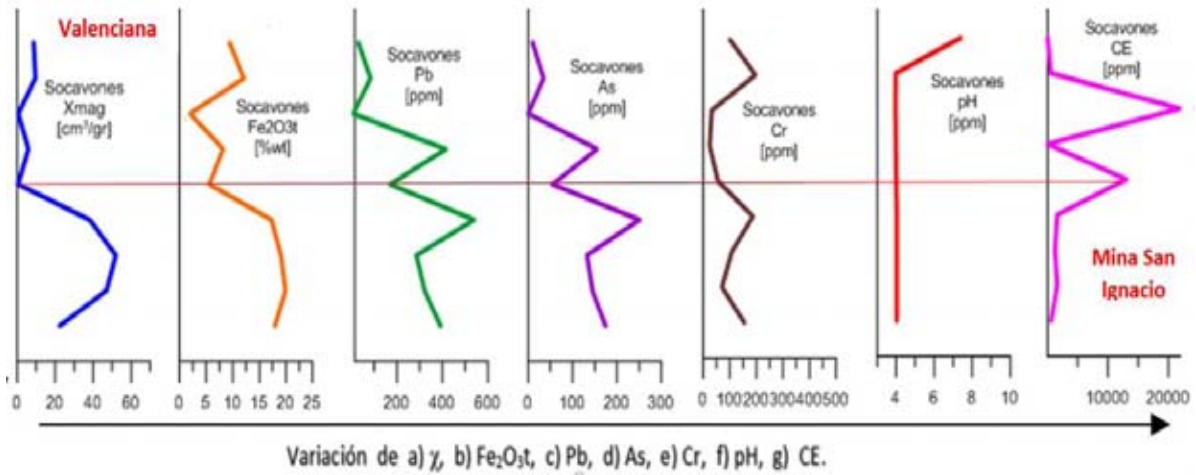


Figura 4.11 Tendencias de los EPT's con relación a la  $\chi$  y el contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t en los socavones del DMG.

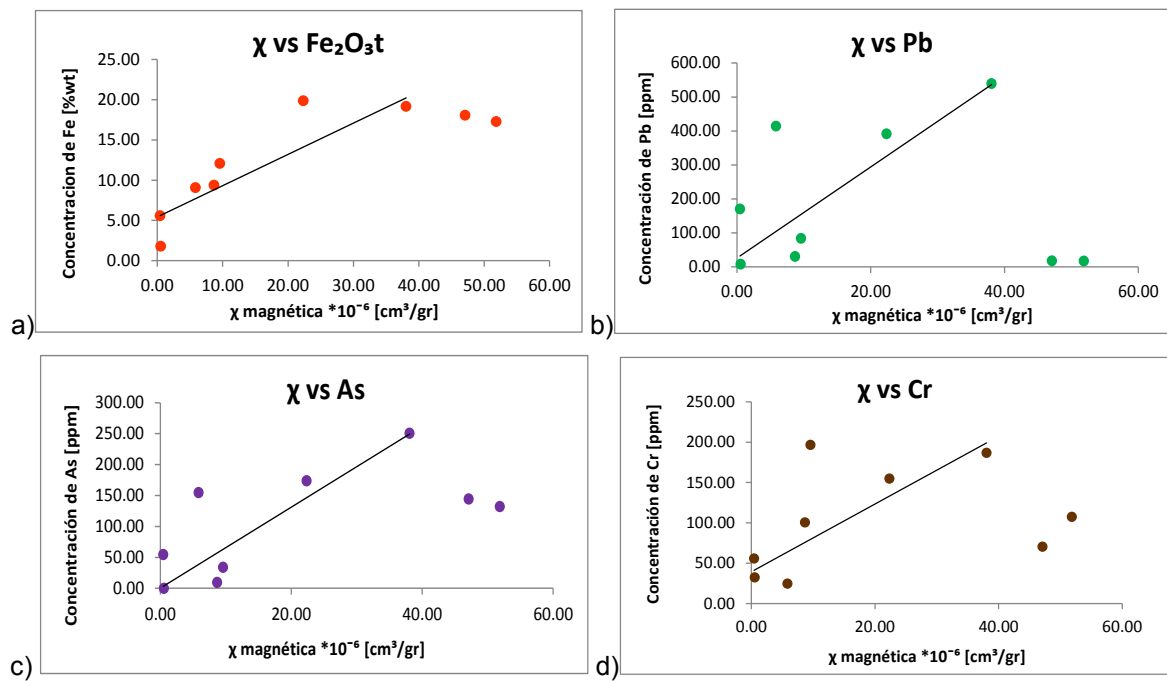


Figura 4.12 Tendencias de los EPT's en relación a la  $\chi$  y el contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t en los socavones del DMG.

#### 4.7 DMG\_TERRAZA ALTA

Muestra	$\chi$	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	Pb	As	Cr	pH	CE
H3M1	36.40	8.6	108	39	193	6.63	43.06
H3M2	6.33	7.8	394	159	56	6.79	37.94
H3M3	7.11	5.5	318	113	64	7.29	32.10
H3M4	8.66	5.1	305	109	32	6.35	25.34

Tabla 4.9 Datos de las mediciones realizadas en la terraza alta en la localidad de Pozuelos en el DMG.

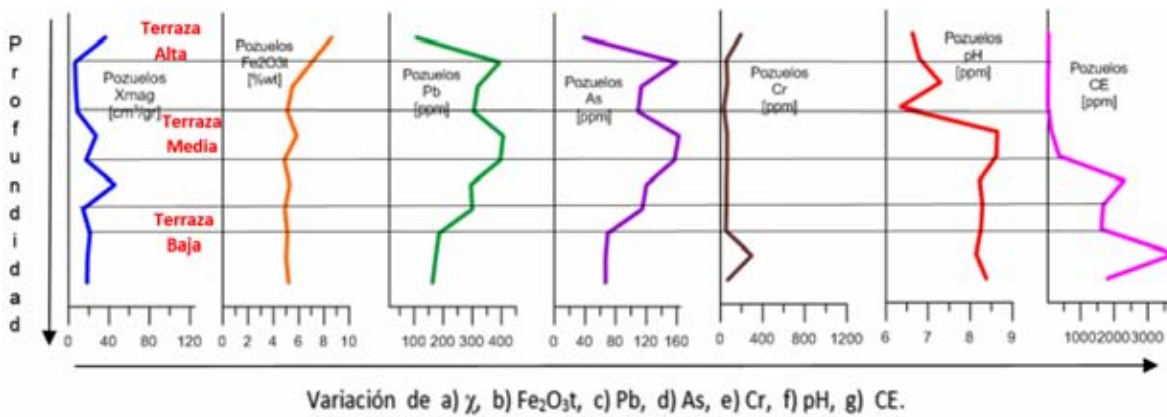


Figura 4.13 Tendencias de los EPT's con relación a la  $\chi$  y el contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> en los jales de la localidad de Pozuelos del DMG.

Se observan los tres perfiles muestreados en Pozuelos en orden topográfico, con los niveles topográficos más altos en la parte superior de la imagen y descendiendo tal como lo indica la flecha del lado izquierdo de la imagen.

#### 4.8 DMG\_BURRONES

Muestra	$\chi$	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	Pb	As	Cr	pH	CE
E6H3 cima	72.75	8.6	33	7	248	8.21	43.05

<b>E6H3 media</b>	53.75	5.0	17	3	5	8.17	58.65
<b>E6H3 base</b>	61.13	4.8	16	4	0	8.23	104.47
<b>E6H1 media</b>	38.82	4.6	19	5	0	8.98	40.39
<b>Htes. Inf.</b>	23.66	4.9	21	3	9	8.02	38.66

Tabla 4.10 Datos de las mediciones realizadas en la localidad de Burrones en el DMG.

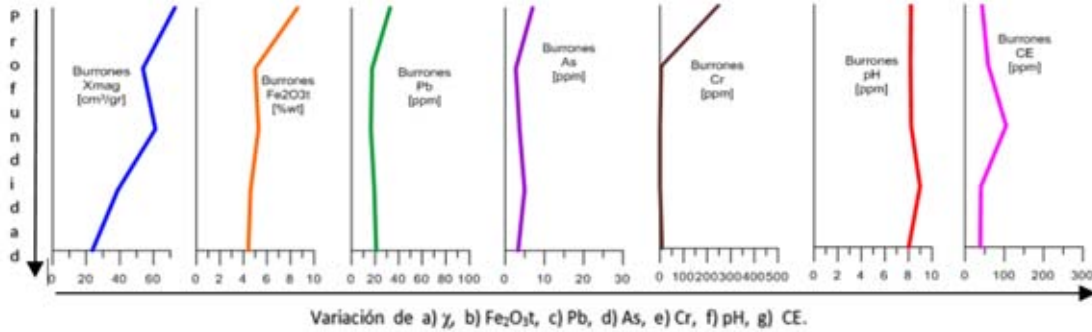


Figura 4.14 Tendencias de los EPT's con relación a la  $\chi$  y el contenido de  $Fe_2O_3t$  en los jales de la localidad de Burrones del DMG.

Como se puede observar buena correlación  $\chi$ -Fe a lo largo del perfil; sin embargo, estos jales no son portadores de niveles tóxicos a excepción de la muestra E6H3cima (la primera en cada perfil) que contiene 247 ppm de Cr.

#### 4.9 Resumen de relaciones $\chi$ con los jales, suelos y socavones (DMOT y DMG)

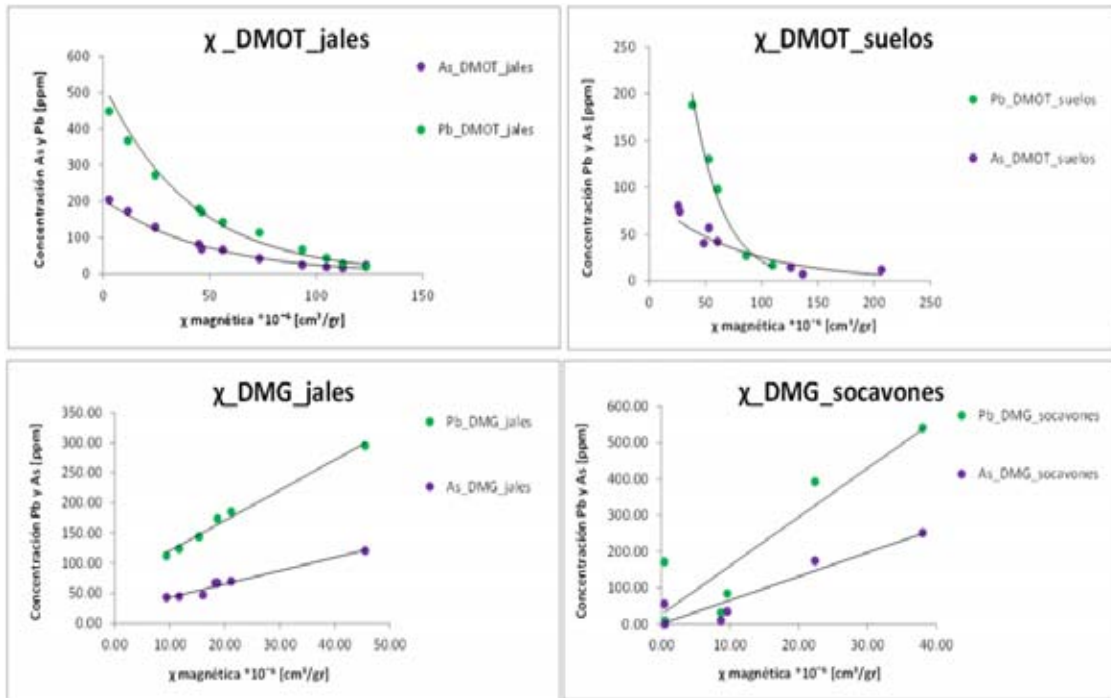


Figura 4.15 Tendencias generales entre Pb, As y Fe en el DMOT y DMG (muestras seleccionadas que son parte de la tendencia de la mayoría de los datos).

En la figura 4.15 se observa como para el caso del DMOT, el Pb y el As tienen una relación inversa con la  $\chi$ , pues a mayor  $\chi$ , menores concentraciones de Pb y As. Mientras que para el DMG, las relaciones del As y Pb con la  $\chi$  son directas, es decir, a mayor  $\chi$  mayor concentración de Pb y As.

#### 4.10 Gráficos 3D

Las relaciones 3D se realizaron utilizando la  $\chi$ , además del pH por ser una propiedad de fácil medición en campo y presentar buenas correlaciones con la  $\chi$ , las concentraciones y propiedades físico-químicas medidas. Estos gráficos (figuras 4.16, 4.18, 4.20, 4.24, 4.26, 4.28) se realizaron con la finalidad de comparar las concentraciones con las normas ambientales así como los niveles de toxicidad relacionados a determinados rangos de  $\chi$ , y así identificar los jales tóxicos directamente en campo. (Ver ANEXO 8. Gráficos 3D). Además, de observar las relaciones  $\chi$ -Fe (figuras 4.23 y 4.30) y las variaciones entre las tendencias de las relaciones  $\chi$ -EPT's (figuras 4.22 y 4.31) en ambos distritos.



Para acotar mejor los rangos de  $\chi$  de interés, se procedió a realizar una interpolación por el método de Kriging (figuras 4.17, 4.19, 4.21, 4.25, 4.27, 4.29), esto con el fin de identificar los valores más altos de las mediciones de propiedades físico-químicas o de las concentraciones por FRX relacionadas a la  $\chi$  y al pH.

En los gráficos de las normas ambientales y de las interpolaciones el eje X representa a la  $\chi$ , el eje Y al pH y el eje Z al contenido de EPT's.

En los gráficos se observó que los valores aproximados de  $\chi < 80 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{gr}$  corresponden a los suelos en el caso del DMOT y,  $\chi < 60 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{gr}$  para el DMG pues los valores de  $\chi$  mayores a este rango corresponden a los socavones del DMG.

## DMOT

### $\chi$ -pH-As

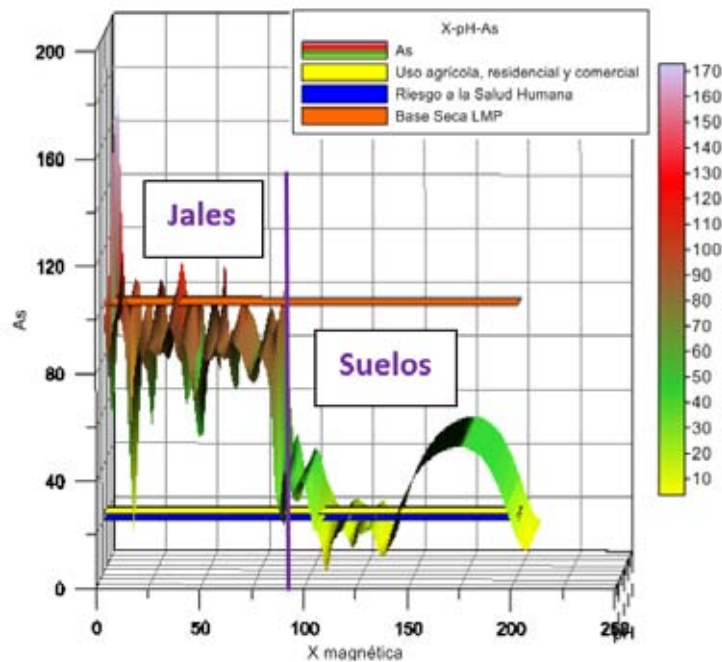


Figura 4.16 Relación  $\chi$ -pH-As para el DMOT.

Se observa en general que a menor  $\chi$ , mayor concentración de As. Además, a mayor pH, mayor concentración de As. Por lo que, nos interesan baja  $\chi$  y alto pH. La mayor concentración de As está relacionada a  $\chi \leq 80$ .

Por otro lado, es claro que los valores de As sobrepasan los límites de las normas de la SEMARNAT y PROFEPA sobre los distintos daños y riesgos por las altas concentraciones de EPT's citados en el apartado 1.3. El límite del riesgo en uso industrial (260ppm) está muy por encima de las concentraciones reportadas.

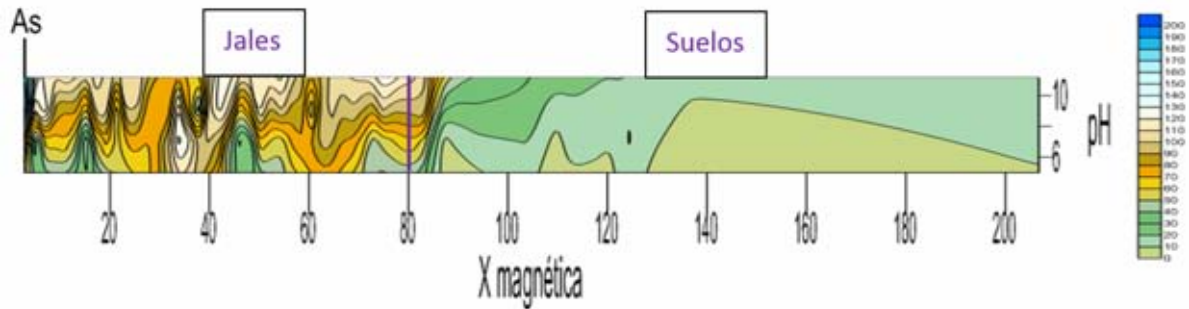


Figura 4.17 Interpolación de los valores de  $\chi$ , pH y As para el DMOT. Se observa que el As muestra una relación de mayor concentración con valores altos de pH.

#### $\chi$ -pH-Pb

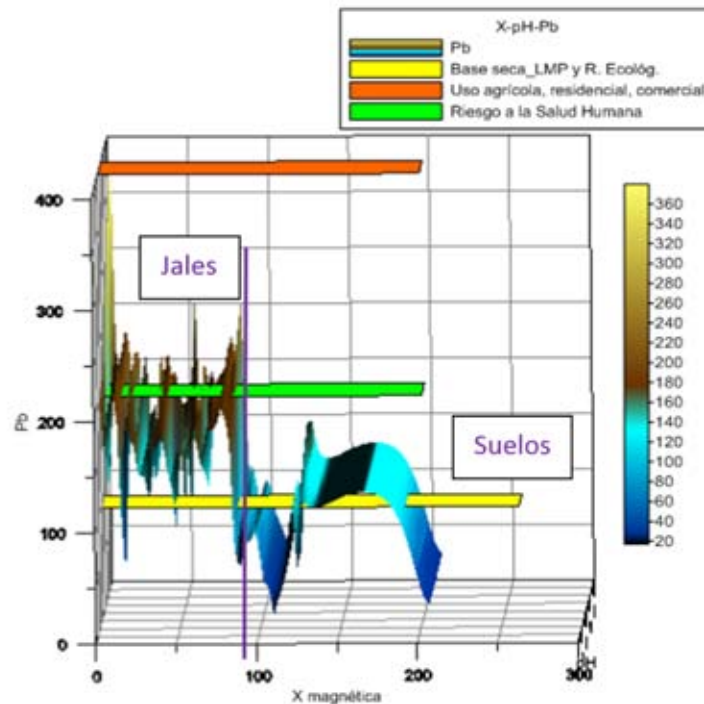


Figura 4.18 Relación  $\chi$ -pH-Pb para el DMOT.

Puede observarse que el Pb presenta un comportamiento muy similar al del As (sólo que con concentraciones mayores de Pb), pues a menor  $\chi$ , mayor concentración de Pb, además que a mayor pH, mayor Pb. Por lo que de igual manera es de nuestro interés una baja  $\chi$  y alto pH.

Es claro ver que los valores de Pb también sobrepasan los límites de las normas de la PROFEPA sobre los y riesgos por las altas concentraciones de EPT's y se requieren los estudios de movilidad de acuerdo a las normas de la SEMARNAT. Lo anterior, citado en el apartado 1.3.

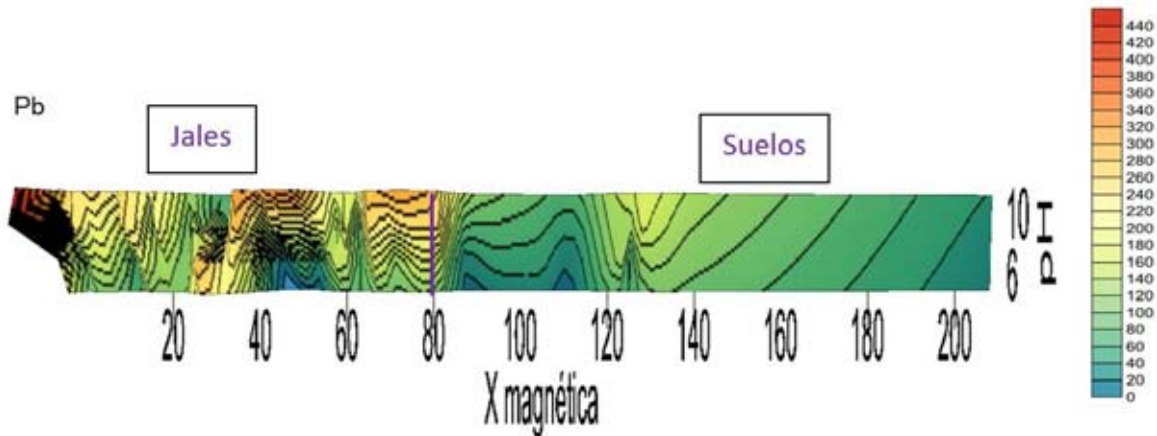


Figura 4.19 Interpolación de los valores de  $\chi$ , pH y Pb para el DMOT.

Se puede ver que las concentraciones más altas de Pb están relacionadas a altos valores de pH. La mayor concentración de Pb se observa en el mismo rango de  $\chi$  que el As, es decir,  $\chi < 80$  además, para el caso del Pb a partir de  $\chi \sim 125$ , la concentración de Pb es  $> 100$ .

### $\chi$ -pH-Cr

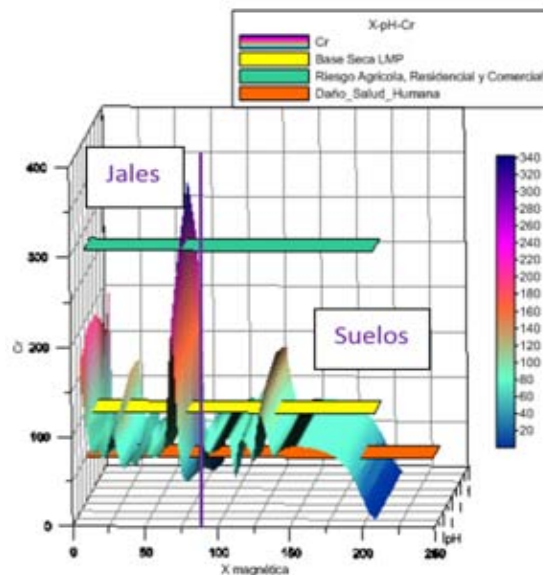


Figura 4.20 Relación  $\chi$ -pH-Cr para el DMOT.

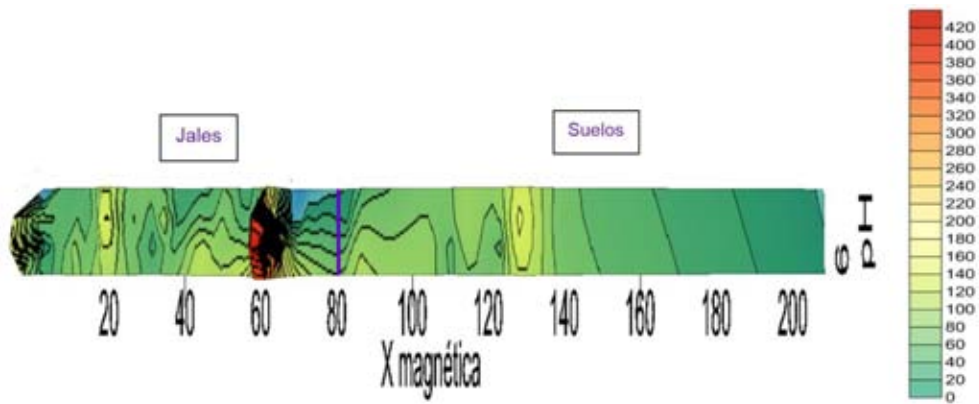


Figura 4.21 Interpolación de los valores de  $\chi$ , pH y Cr para el DMOT.

En la gráfica de la figura 4.20, se observan dos picos de mayor concentración y otros dos de concentración media. Los primeros se encuentran relacionados a una  $\chi < 15$  y  $50 > \chi < 75$ . Las concentraciones medias están asociadas a  $\chi \sim 25$  y  $\chi \sim 125$ . En general nos interesan las concentraciones relacionadas a  $\chi \leq 75$ . Por otro lado, en la gráfica de la figura 4.21, se muestra que los intervalos de  $\chi$  pertenecientes a las mayores concentraciones, son  $50 > \chi < 70$ . Juntando ambas gráficas (figuras 4.20 y 4.21), el rango de interés de  $\chi$  es  $\chi \leq 80$ .

#### $\chi$ -pH-Pb,As,Cr

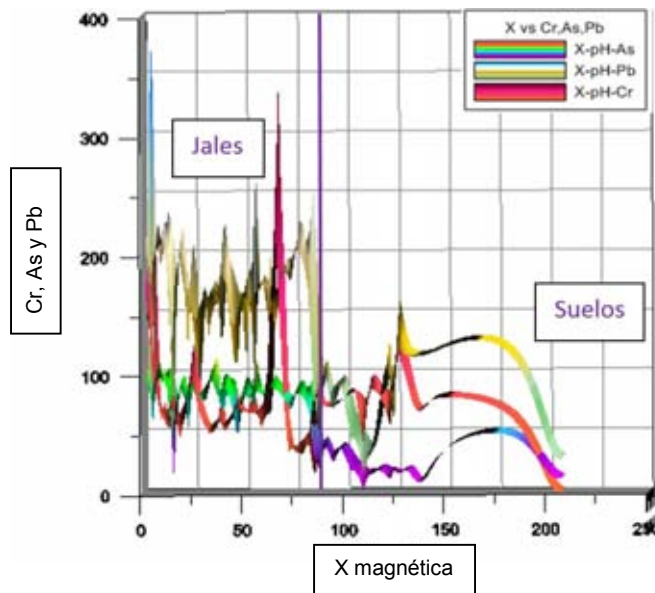


Figura 4.22 Concentraciones de los EPT's en el DMOT: Cr curva rosa, As curva morada y Pb café con amarillo.

## $\chi$ vs $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$

Se separaron las muestras de jales y suelos para detectar mejor la ubicación de los picos anómalos en la relación  $\chi$ -Fe.

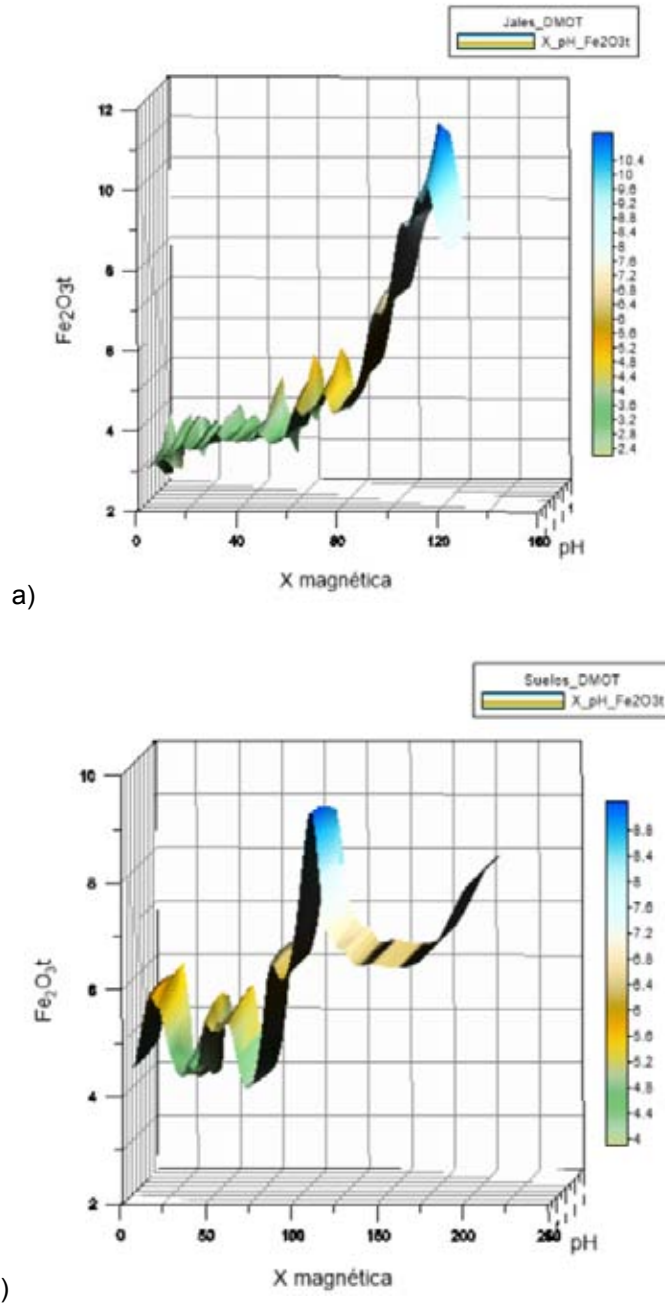


Figura 4.23 Se observa que las muestras de jales tienen mejor relación  $\chi$ -Fe para los jales del DMOT que para los suelos, sin embargo, ambas tendencias son directas.

## Guanajuato

### $\chi$ -pH-As

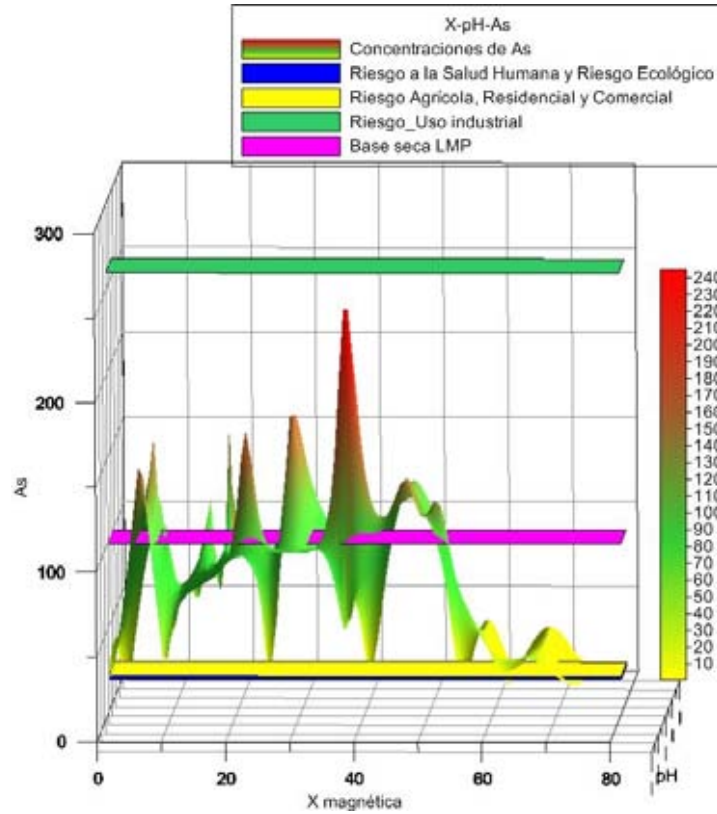


Figura 4.24 Relación  $\chi$ -pH-As para el distrito de Guanajuato.

Se observa que de igual forma que para el caso del Pb, a menor pH se tiene el mayor pico de concentración de As en este caso.

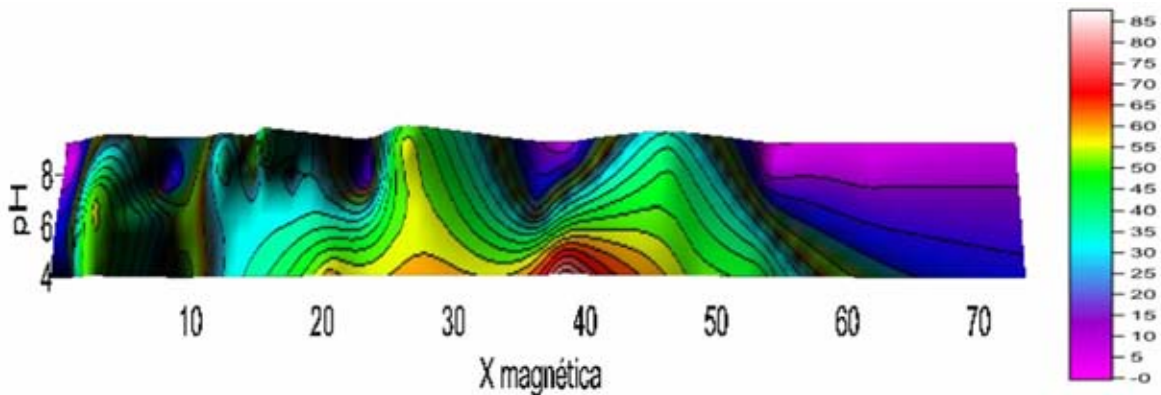


Figura 4.25 Interpolación entre los valores de  $\chi$ , pH y As para el distrito de Guanajuato.

Se observa un gráfico de distribución de la concentración de As muy parecido al gráfico de la concentración del Pb. De igual forma que en el caso del Pb, se obtienen concentraciones interesantes cuando  $\chi < 10$  y cuando  $25 > \chi < 50$ .

### $\chi$ -pH-Pb

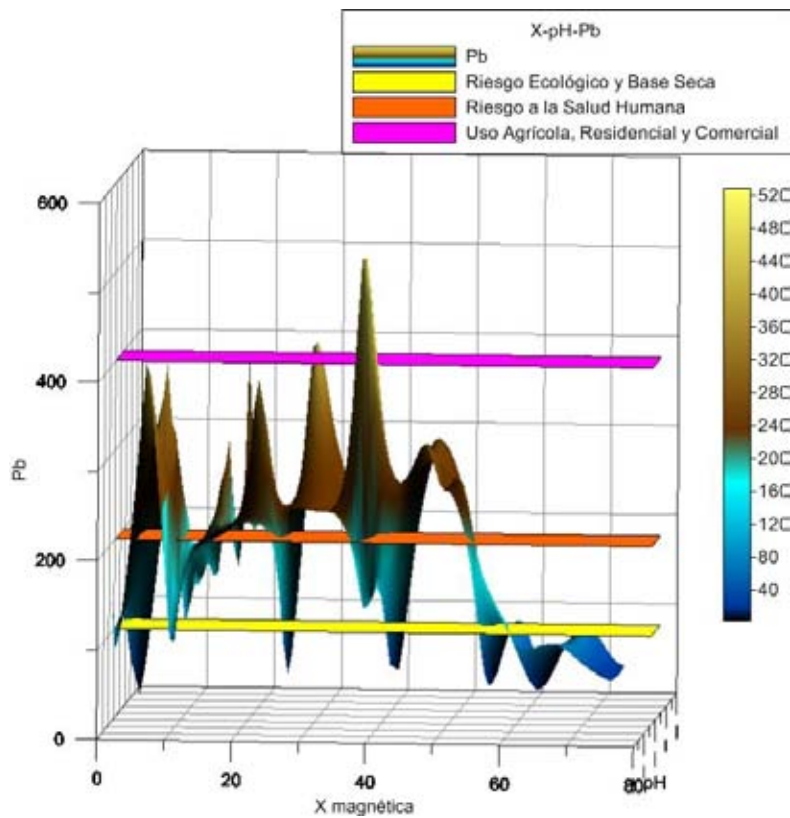


Figura 4.26 Relación  $\chi$ -pH-Pb para el distrito de Guanajuato.

Se observa que las concentraciones de Pb están muy por encima de los límites marcados por las normas de SEMARNAT y PROFECO, citadas en el apartado 1.3. Además, se aprecia una tendencia general que a mayor  $\chi$ , mayor concentración de Pb. Se obtienen concentraciones altas entre  $\chi < 10$  y cuando  $25 > \chi < 60$ ; mientras que el pico de mayor concentración de Pb se encuentra entre  $25 > \chi < 50$ . En general, nos interesan las susceptibilidades asociadas a  $\chi \leq 50$ .

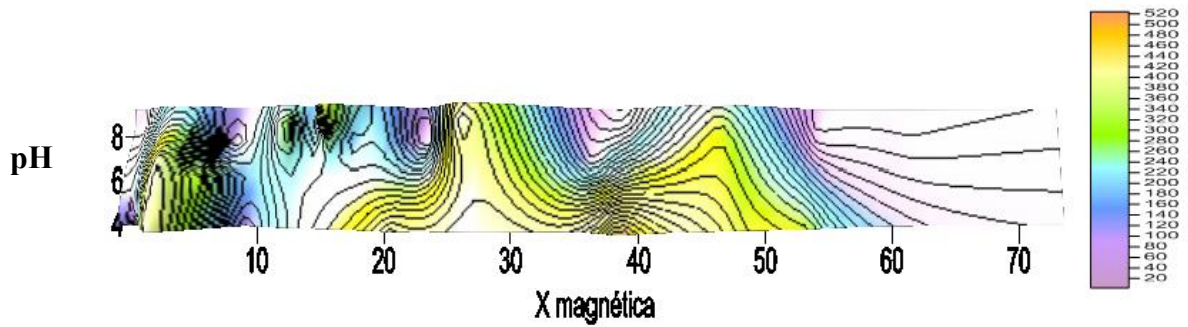


Figura 4.27 Interpolación entre los valores de  $\chi$ , pH y Pb para el distrito de Guanajuato. Los valores de concentración de Pb más altos se aprecian asociados en general a pH ácido.

$\chi$ -pH-Cr

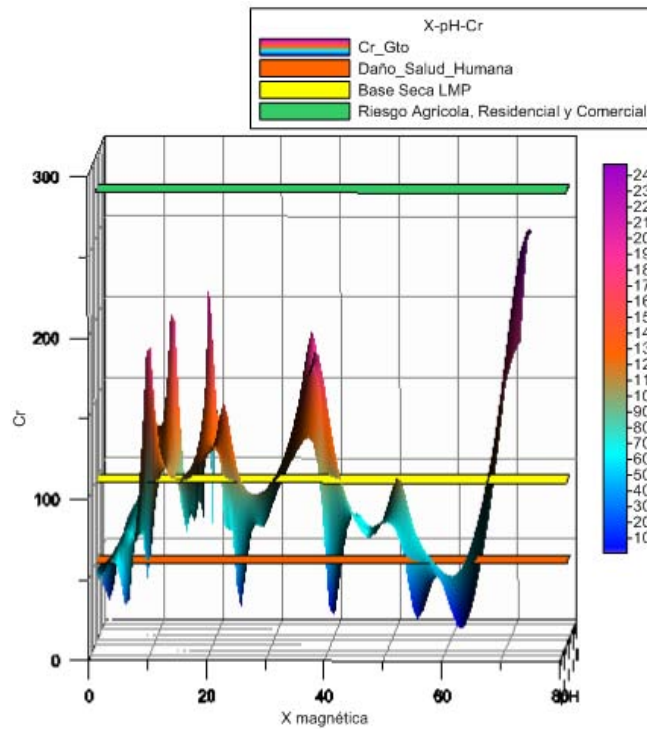


Figura 4.28 Relación  $\chi$ -pH-Cr para el distrito de Guanajuato.

Se observa que el mayor pico de la concentración del Cr está asociado a un valor de pH>7 y una  $\chi$ >70; otro pico de menor importancia se encuentra en el intervalo  $10 > \chi > 20$ , correspondiente también a un valor de pH>7.



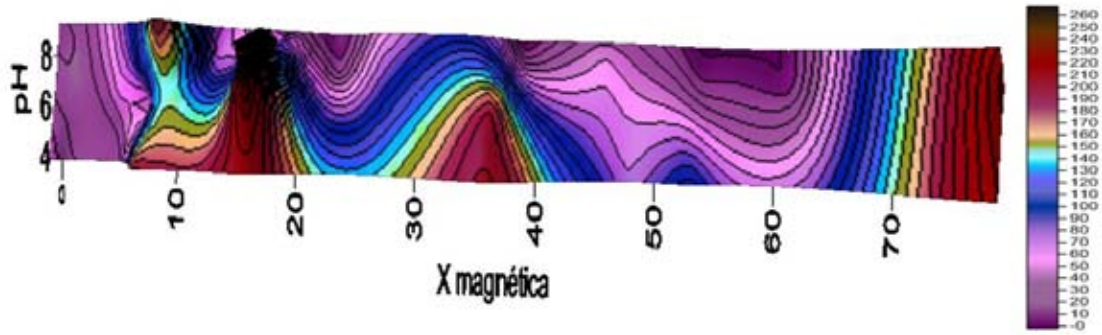
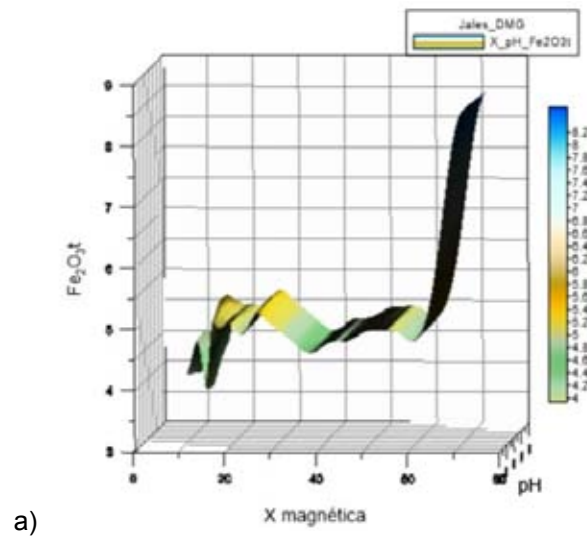


Figura 4.29 Interpolación de los valores de  $\chi$ , pH y Cr para el distrito de Guanajuato.

Se observa que las mayores concentraciones de Cr están relacionadas a rangos de  $\chi$ :  $10 > \chi < 20$ ,  $30 > \chi < 40$  y  $\chi > 70$ . Además de que se observa más claramente que el pH no presenta una tendencia preferencial en relación a la concentración de Cr.

#### $\chi$ vs $Fe_2O_3t$



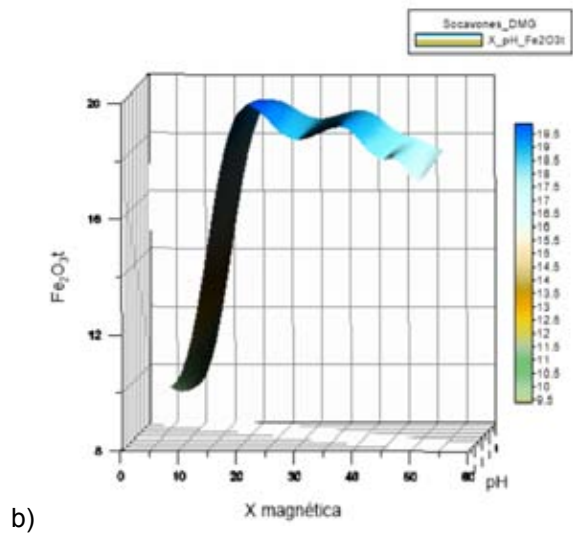


Figura 4.30 Relaciones  $\chi$ -Fe del DMG: a) Jales y b) Socavones.

Se observa que las muestras de los socavones tienen mejor relación  $\chi$ -Fe que los jales del DMG.

$\chi$ -pH-As,Pb,Cr

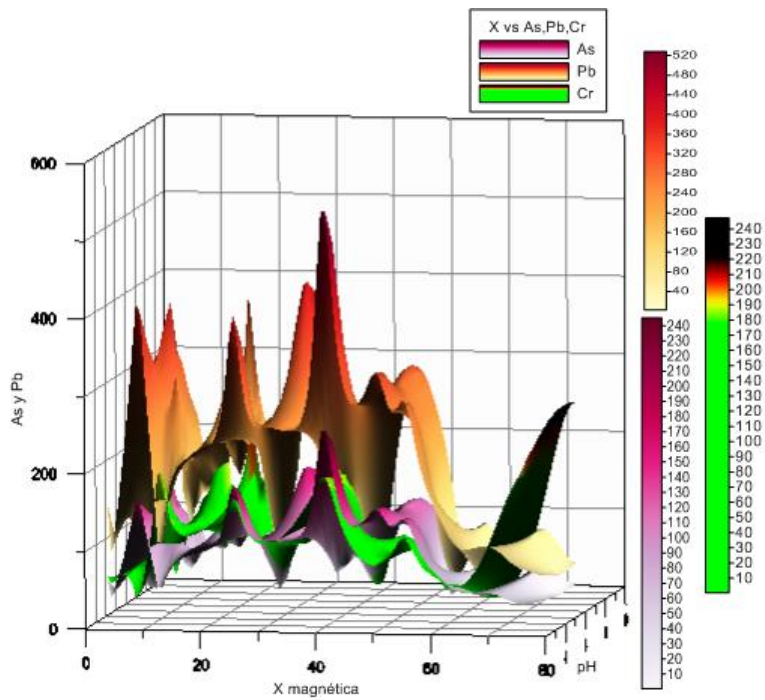


Figura 4.31 Relación entre la  $\chi$ , el pH y las concentraciones de As, Pb y Cr para el distrito de Guanajuato.

Se observa que el Cr guarda una relación directa al igual que en el DMOT con el As y Pb, no es una relación directamente proporcional pero sí muy próxima entre ellos; con menor concentración comparado con el As y mucho menor comparado con el Pb. en el caso del Cr el pico que se observa al final de su gráfica ( $\chi$  muy alta) corresponde a dos muestras anómalas en diversos casos (de la E7 y otra del segundo muestreo en Tlalpujahua), muestras que se explican con las diversas fases minerales existentes.

#### 4.11 Curvas de histéresis y termomagnéticas

Se espera que el valor de la susceptibilidad magnética sea mayor conforme aumente el contenido de Fe. Sin embargo, en las muestras analizadas no es siempre el caso. Se localizaron algunas muestras que se comportan de forma inversa y se procedió a obtener curvas de histéresis y termomagnéticas para analizar sus fases minerales y poder explicar este comportamiento.

En el DMOT se identificaron las muestras reportadas en la tabla 4.11. Mientras que en Guanajuato, se identificaron las muestras reportadas en la tabla 4.12.

<b>Muestra</b>	$\chi \cdot 10^{-6}$ [cm <sup>3</sup> /gr]	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t [%wt]	<b>Observaciones</b>
<b>E3H5</b>	109.8	9.3	Alta $\chi$ y alto Fe
<b>E3H6</b>	206.7	8	La $\chi$ más alta y alto Fe
<b>E5H3</b>	52.9	2.6	Dentro de la tendencia
<b>E5H4</b>	24.5	3.1	Dentro de la tendencia
<b>E7H5</b>	104.8	9.1	Alta $\chi$ y alto Fe
<b>E7H6</b>	112.5	9.3	Alta $\chi$ y alto Fe
<b>E7H7</b>	112.9	11.6	Alta $\chi$ y el Fe más alto
<b>E8H4</b>	123.4	8.38	Alta $\chi$ y alto Fe
<b>DIA2_M1</b>	137	6.35	Alta $\chi$ y bajo Fe
<b>DIA2_M3H2</b>	122	6.82	Alta $\chi$ y bajo Fe
<b>ARROYO_2ESTR.</b>	126	6.69	Alta $\chi$ y bajo Fe
<b>E8H8</b>	40.6	4.22	Dentro de la tendencia
<b>E12H2</b>	73.4	5.8	Dentro de la tendencia

Tabla 4.11 Muestras anómalas y dentro de la tendencia en la relación  $\chi$ -Fe del DMOT. Se reportan 9 de las muestras anómalas de la relación  $\chi$  vs  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$  y dos muestras que caen dentro de la tendencia lineal de la relación mencionada, para el DMOT.

<b>Muestra</b>	$\chi \cdot 10^{-6}$ [cm <sup>3</sup> /gr]	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t</b> [%wt]	<b>Observaciones</b>
<b>H4M1</b>	22.35	19.9	Baja $\chi$ y el Fe más alto
<b>H4M2</b>	47.09	18.1	$\chi$ media y alto Fe
<b>H4M3</b>	51.86	17.3	$\chi$ media y alto Fe
<b>H4M4</b>	38.05	19.2	$\chi$ media y alto Fe
<b>E6H3 CIMA</b>	72.75	8.6	La $\chi$ más alta y alto Fe (dentro de la tendencia)
<b>H5M4</b>	9.58	12.1	Baja $\chi$ y Fe medio
<b>E6H3 BASE</b>	61.13	4.8	Alta $\chi$ y bajo Fe

Tabla 4.12 Muestras anómalas y dentro de la tendencia en la relación  $\chi$ -Fe del DMG. Se reportan 7 de las muestras anómalas de la relación  $\chi$  vs  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$  y una muestra que caen dentro de la tendencia lineal de la relación mencionada, para el distrito de Guanajuato.

En el DMOT, se escogieron las muestras:

- E3H6 y E7H7, muestras que representan la  $\chi$  más alta y la mayor concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ , respectivamente.
- E8H8 Y E12H2, muestras que caen en la tendencia de la correlación.
- E2H1, E3H1, E7H1, E9H1, E5H1, E8H1 y E11H1 muestras medidas en pruebas anteriores y que se encuentran dentro de la tendencia de la correlación.

En Guanajuato, se escogieron las muestras:

- E4H1 (H4M1, mayor concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ ), E6H3base (alta  $\chi$ , baja concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ ), E6H3cima (mayor valor de  $\chi$ ) y H4M3 (alta  $\chi$  y alta concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ ).

Se observa que el mayor pico de la relación  $\chi$ -Fe pertenece a las muestras H4M1-H4M4 del socavón de la mina San Ignacio, las cuales contienen el mayor % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ . Mientras que las muestras E6H3

cima (la  $\chi$  más alta) y E6H3 base pertenecen a Burrones. La muestra H5M4 (de las  $\chi$  más bajas y alto Fe) pertenece a la Valenciana.

En el caso de las curvas termomagnéticas, se tienen por cada gráfica 2 curvas: la curva de calentamiento (color rojo) y, la curva de enfriamiento (color azul). Estas curvas presentan los cambios de las diversas fases minerales reportadas en la tabla 4.13.

Muestra	Curva	Temperaturas de Curie				Mineralogía	Observaciones y rangos de las Tc
		Fase 1 [°C]	Fase 2 [°C]	Fase 3 [°C]	Fase 4 [°C]		
E3H6 (Tlalpujahuá)	Calentamiento	573	193	533		a) Magnetita b) Titanomagnetita rica en Ti	
E7H7	Calentamiento	198	638			Titanohematita rica en Ti	
E12H2	Calentamiento	515	545			Titanomagnetita rica en Ti	
E8H8	Calentamiento	359	389	529		Titanomagnetita rica en Ti	
E5H3	Calentamiento	75	105	155	665	a) TM60 b) Titanohematita rica en Ti	
E5H4	Calentamiento	542	572			a) Titanomagnetita pobre en Ti b) Titanohematita pobre en Ti	

Tabla 4.13 Cambios de las diversas fases minerales reportadas. (Rivas-Ortíz, 2006).

Además, de Corona-Chávez et al., 2010 se presenta la tabla 4.14 en la que se aprecia la mineralogía de determinadas muestras realizadas mediante microscopía de luz reflejada.

Muestra	Mineralogía	cuarzo	opacos
EIII-H1	Py, Gt,	49	2
EIII-H2	Py, H, Gt	50	1
EIII-H3	Py, Gn, H	63	2
EIII-H5	I, Tm, Gn, H, Gt	7	1
EIII-H6	I, Tm, Mt, Py, Gn, Gt	7	1
EIV-H2	I, Mt, Py, H	31	2
EIX-H3	H, Gt	36	3
EIX-H4	Py, Cp, Mt, H, Gt	34	4
EX-H2	Py, Cp, Mt, H, Gt	57	5
EX-H4	Cp, H, Gt	59	4
EV-H2	Py, I, H, Gt	54	3
EV-H3A	Py, I, H	32	3
EV-H4	Py, Gn, I, Gt	57	3
EV-H5	Py, Po, Mg, Gn, H, Gt	48	3
EV-H6	Po, Gn, Gt	31	4
EVII-H1	Py, H, Gt	52	3
	Py, Cp, Apy, Au, Fr, A,		
EVII-H3	Cv, Gt	48	3
EVII-H4	Py, Cp, A, Fr, H, Gt	48	4
EVII-H5	I, H, Gt	56	2
EVII-H6	I, Gn, H	60	2
EVII-H7	I, Gn, H, Gt	50	2

Tabla 4.14 estimación modal mineralógica por microscopía de luz reflejada de los minerales opacos: óxidos y sulfuros de 6 perfiles de jales del DMOT. (Corona-Chávez et al., 2010). Donde Py: Pirita, Cp: Calcopirita, Apy: Arsenopirita, Gn: Galena, I: Ilmenita, Tm: Titanomagnetita, Mt: Magnetita, Fr: Freibergita, A: Aguilarita, Au (Oro rico en plata, electrum), H: Hematita, Gt: Goethita, Cv: Covelita.

Se presenta la relación de la forma de las curvas de histéresis medidas en el laboratorio en la tabla 4.15. Además de dos ejemplos de las curvas termomagnéticas y de histéresis obtenidas en las figuras 4.32 y 4.33.

Muestra	Forma de la curva de histéresis	Observaciones
E3H6	Pot-bellied	
E12H2	Pob-bellied	
E7H7	Wasp-waisted	
E8H8	Pot-bellied	
H4M1	Pot-bellied	Ambas curvas son las más delgadas y alargadas, por lo que, es un indicador de inestabilidad magnética y/o del poco aporte de material ferri y antiferrimagnético. Además los ciclos reflejan un amplio aporte de material
H4M3	Wasp-waisted	

		paramagnético que a su vez representa una baja presencia de minerales ferrimagnéticos.
<b>E6H3-base</b>	Pot-bellied	
<b>E6H3-cima</b>	Pot-bellied	

Tabla 4.15 Forma de las curvas de histéresis medidas para el DMOT y el DMG.

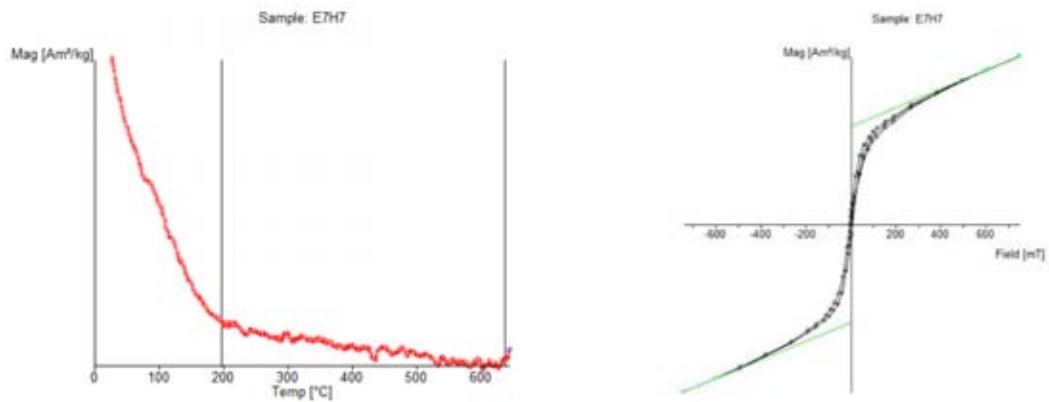


Figura 4.32 Ejemplo de curvas termomagnética y de histéresis para la muestra E7H7 del DMOT.

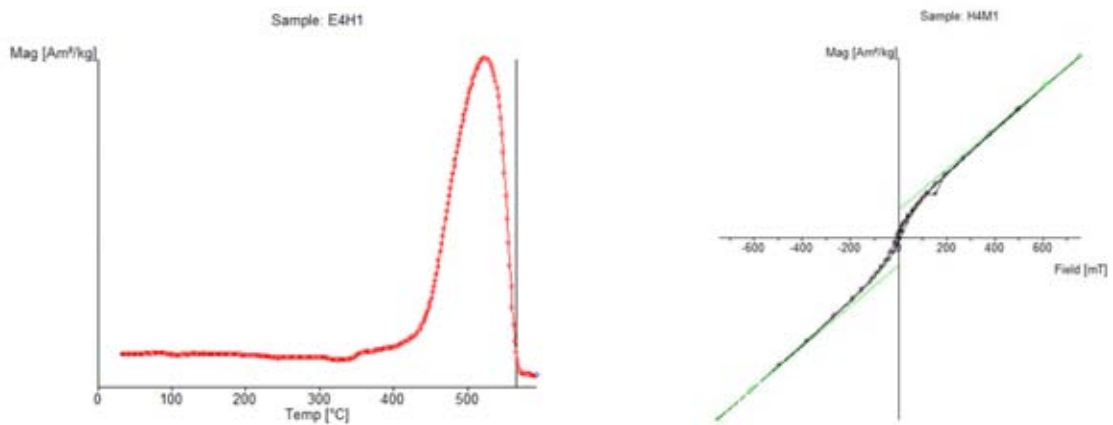


Figura 4.33 Ejemplo de curvas termomagnética y de histéresis para la muestra H4M1 del DMG.

El resto de las gráficas se encuentran en el ANEXO 10. Curvas de histéresis y termomagnéticas.

## 4.12 Mapas

### DMOT

Se realizaron las interpolaciones de la  $\chi$  (figura 4.34), el mapa de pendientes (figura 4.35) y los mapas de las interpolaciones de las concentraciones de EPT's (figuras 4.36 a 4.38) con las normas ambientales representadas por distintas viñetas de acuerdo a sus leyendas.

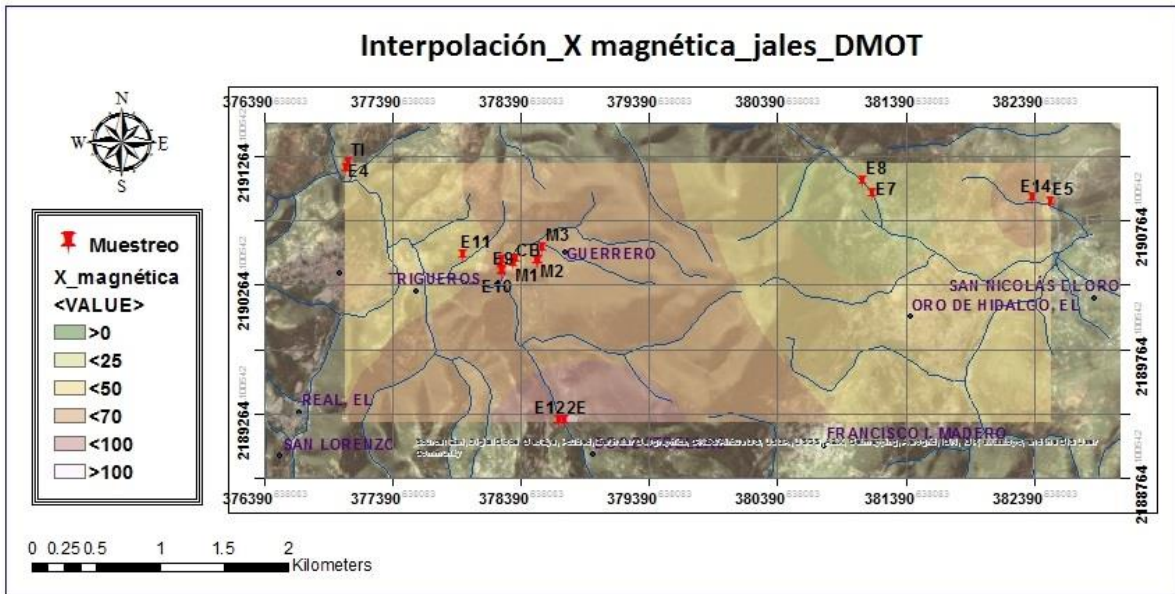


Figura 4.34 Mapa de la interpolación de  $\chi$  para los jales del DMOT. En color verde las menores susceptibilidades y hacia el blanco rosáceo las mayores.



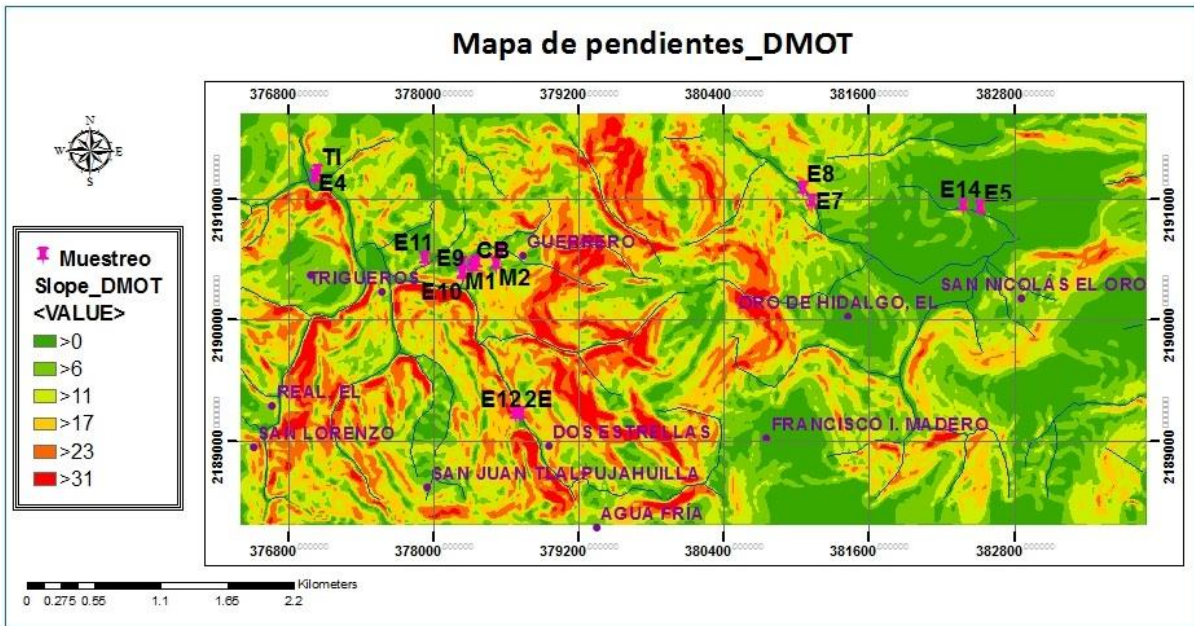


Figura 4.35 Mapa de pendientes del DMOT. En color verde las pendientes más suaves y en rojo las mayores.

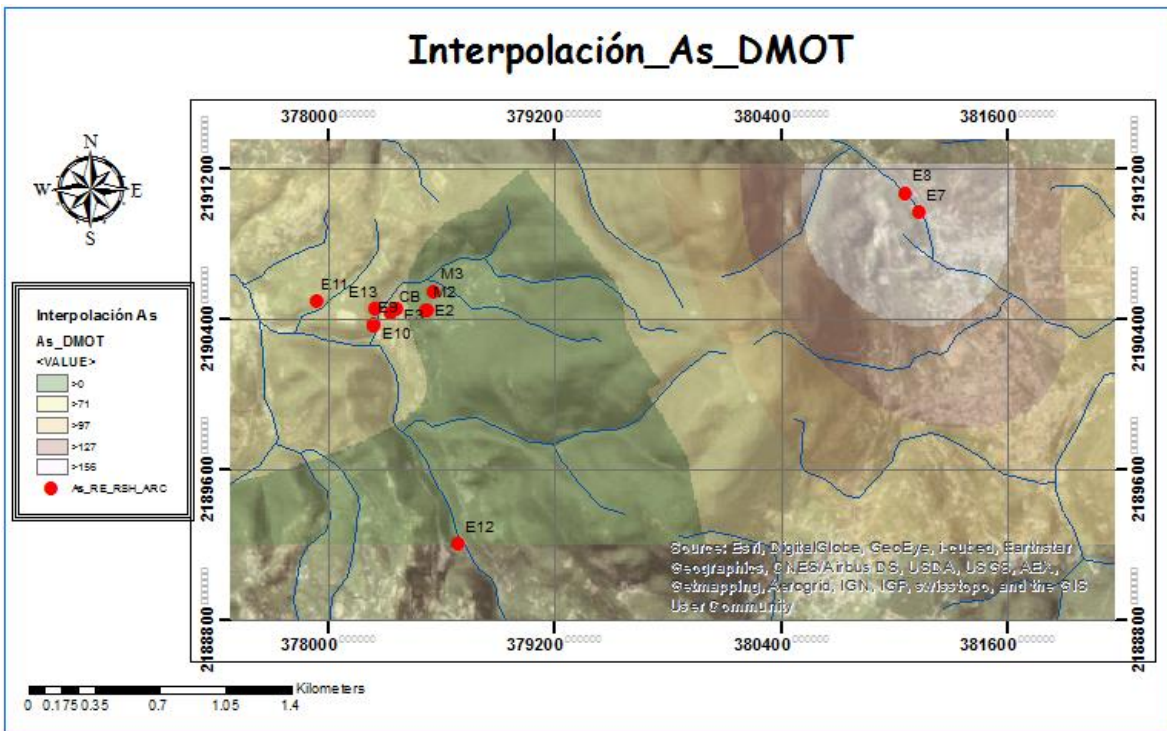


Figura 4.36 Mapa de la interpolación del As del DMOT. RE: Riesgo Ecológico; RSH: Riesgo a la Salud Humana; ARC: Límites para Uso Agrícola, Residencial y Comercial.

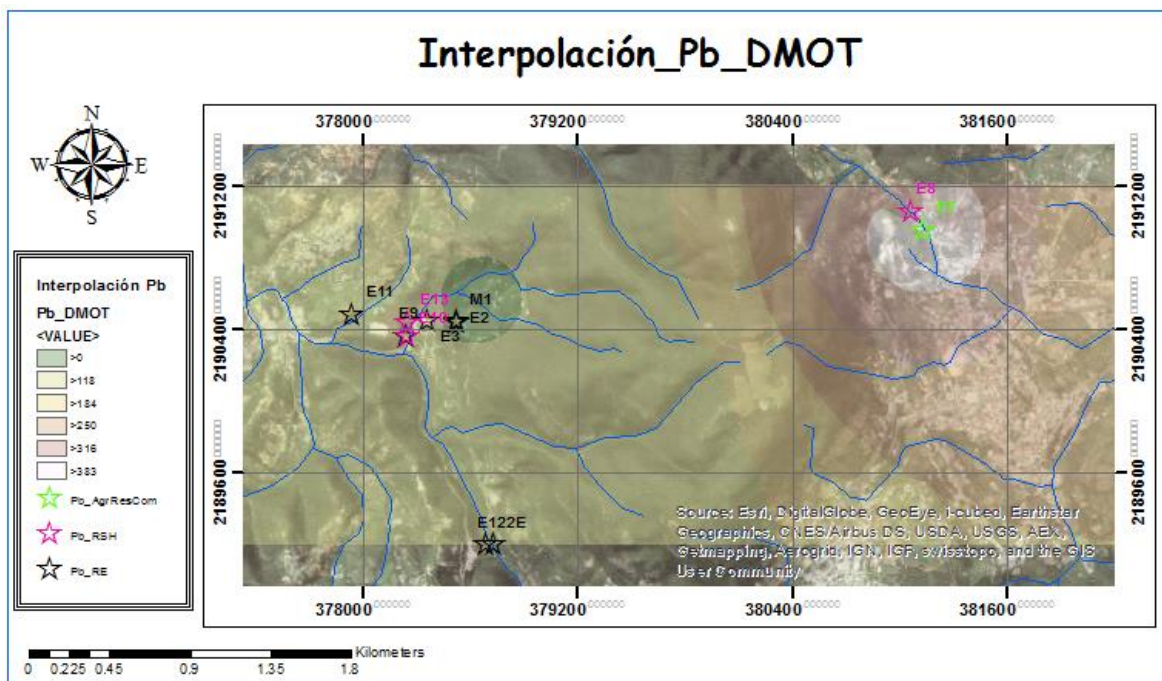


Figura 4.37 Mapa de la interpolación del Pb del DMOT. Las estrellas de color verde corresponden a los límites ambientales para el uso agrícola, residencial y comercial.

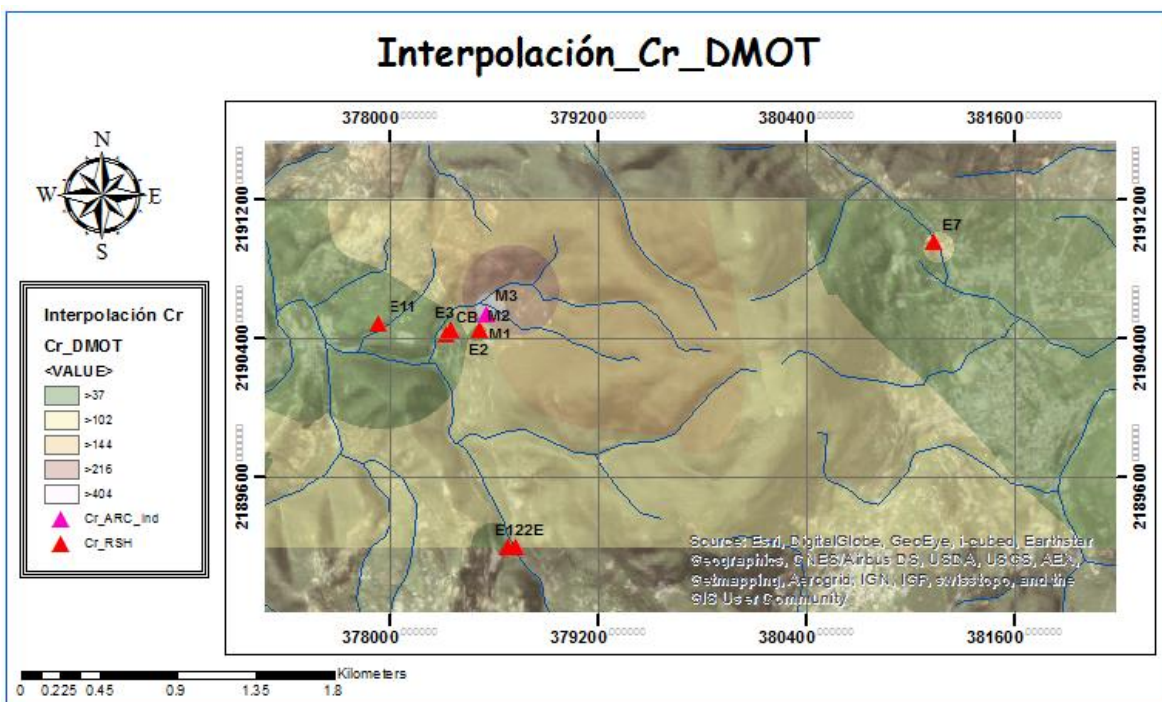


Figura 4.38 Mapa de la interpolación del Cr del DMOT. Los triángulos de color rosa corresponden al límite de uso agrícola, residencial y comercial; los triángulos rojos corresponden al Riesgo a la Salud Humana.

## Guanajuato

Se realizaron las interpolaciones de la  $\chi$  (figura 4.39) y el mapa de pendientes (figura 4.40). Para este distrito no se realizaron los mapas de las interpolaciones de las concentraciones debido a que se tenían solo 4 estaciones de muestreo.

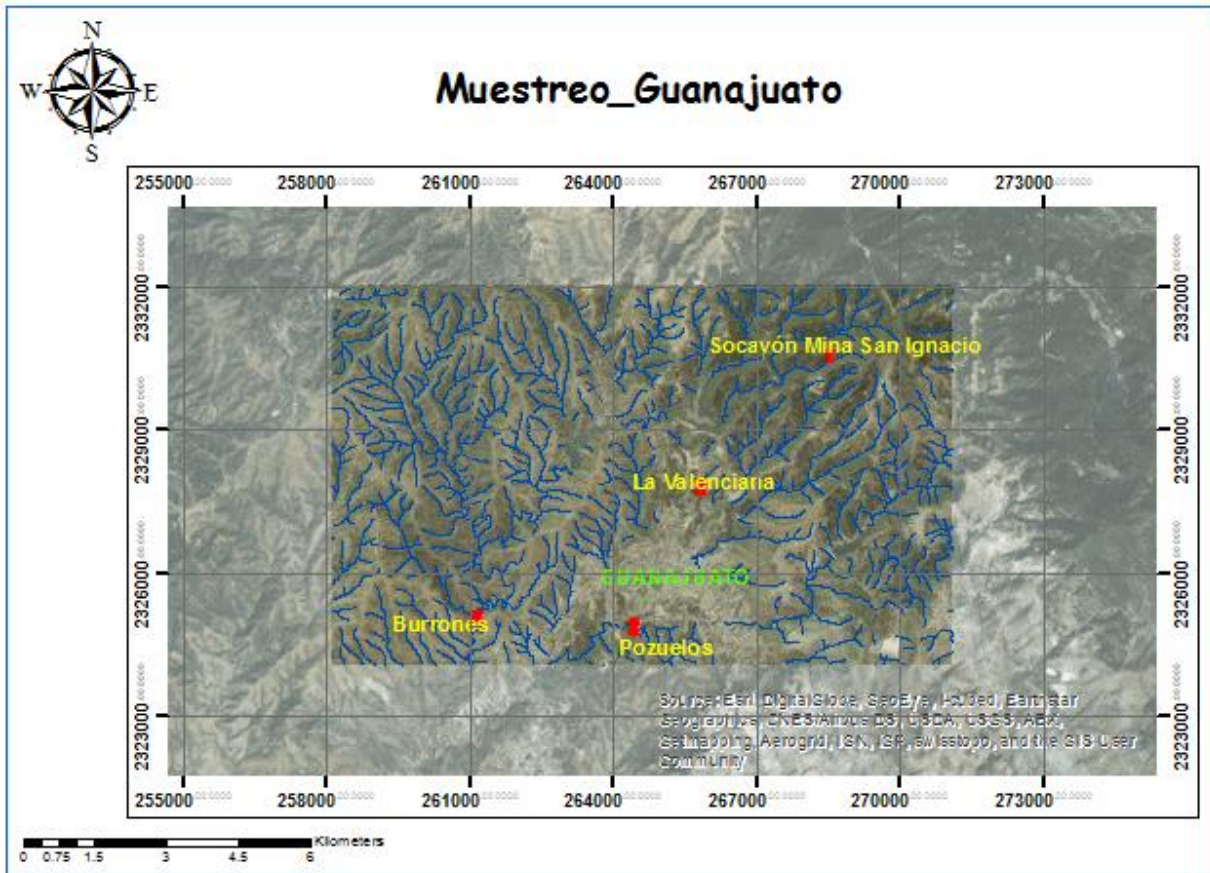


Figura 4.39 Mapa del muestreo en el distrito minero de Guanajuato (DMG).

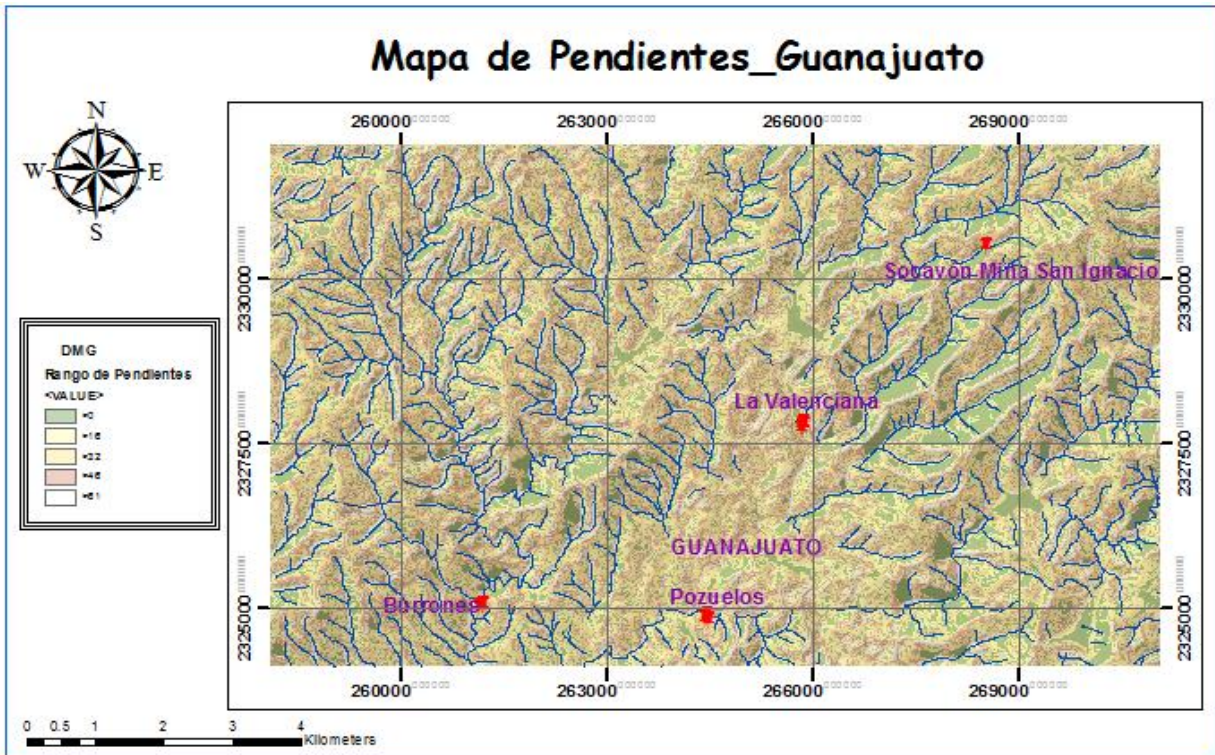


Figura 4.40 Mapa de pendientes del distrito minero de Guanajuato. De color verde las pendientes más suaves y hacia los tonos rosas las más pronunciadas.

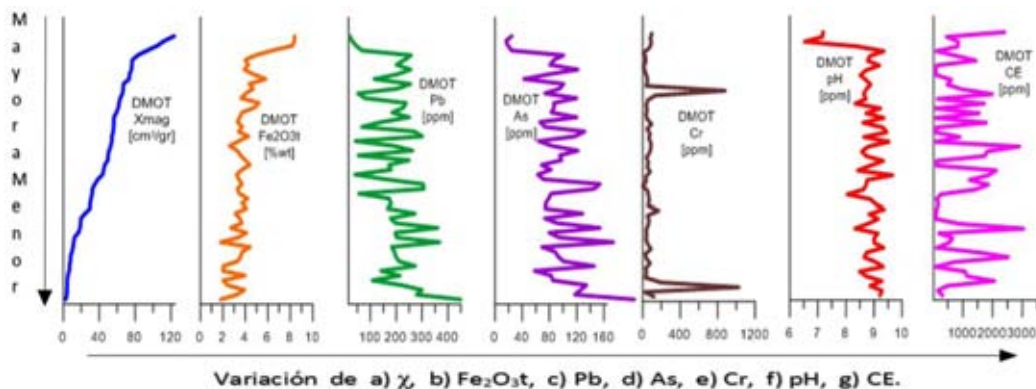
## 5. DISCUSIÓN

Se han reportado en los jales del DMOT valores de pH neutro, por lo que las concentraciones de EPT no parecen ser generadoras de drenaje ácido. A través de la cartografía de la región y del análisis de superficies es posible ver que los volúmenes actuales no corresponden al volumen original, lo cual, sugiere que hubo un proceso de remoción en las áreas de los jales aproximadamente mayor al 20% por procesos naturales de erosión (Corona-Chávez et al., 2010). Sin embargo, se sabe que la roca encajonante de este distrito es calcárea por lo que se favorecen las reacciones de neutralización del pH de los jales en prácticamente todo el DMOT.

Por otro lado, en Guanajuato la situación es muy particular, pues de estudios anteriores (Mendoza-Amézquita et al., 2006; y Ramos-Gómez et al., 2012), se sabe que las condiciones geológicas son muy diferentes al DMOT, particularmente por las rocas encajonantes del distrito, las cuales son rocas ígneas tales como basalto, diorita-tonalita, andesitas. Estos estudios sugieren que no existe riesgo ambiental en términos de lixiviación y movilidad de los metales pesados.

En el presente estudio se pretende detectar zonas con altos contenidos de EPT's realizando primordialmente la medición de  $\chi$  en campo, apoyándose de lecturas de pH y CE.

A continuación se presenta un gráfico que muestra de la disminución del valor de  $\chi$ , con el fin de observar el comportamiento del resto de las mediciones realizadas. Se puede observar que la relación  $\chi$ -Fe es casi directa, sin embargo, hay algunas discrepancias de especial atención. Para poder determinar qué muestras presentaban estas discrepancias, se consultaron las gráficas 3D del apartado 4.10.



Perfiles de jales del DMOT, presentando un decremento de la  $\chi$  hacia la parte inferior del perfil. Los horizontes de los demás perfiles se ajustaron a los horizontes ordenados de acuerdo a la  $\chi$ .

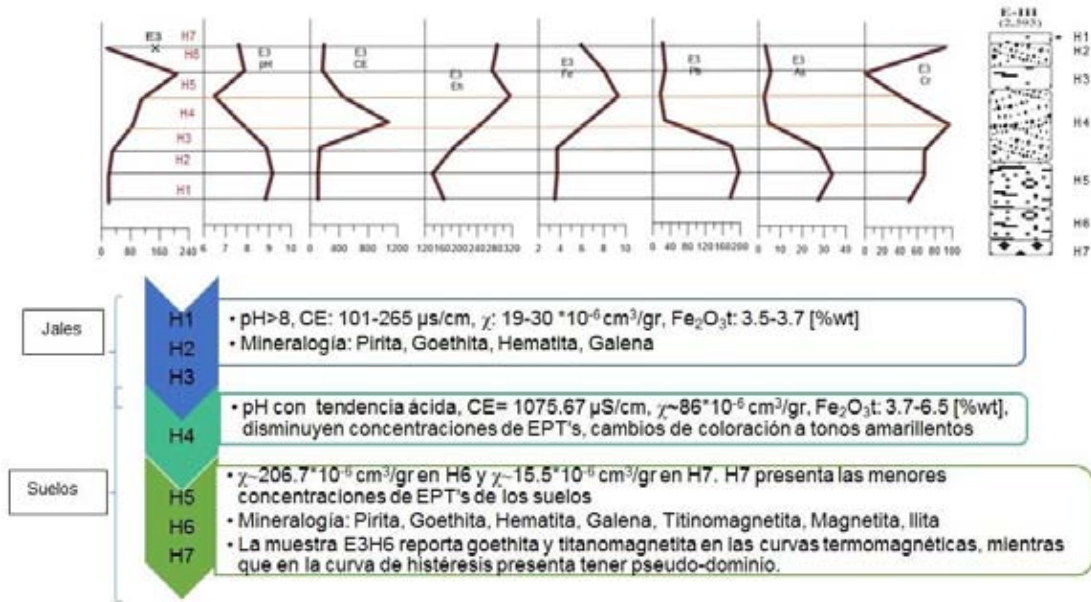
En el análisis de las discrepancias, se observó que en el DMOT se presentó una relación  $\chi$ -Fe directa muy marcada. Se observó que al realizar la separación de jales y suelos se detectó que las diferencias marcadas integran las últimas 3 muestras de la E3 (estación 3), que corresponden a suelos, mientras que la E7 es de jales.

En el caso de los suelos, la muestra E3H6 presentó un descenso diferente a la tendencia general en la curva, pues en el mayor valor de  $\chi$  (E3H6) se tiene una concentración de Fe menor que la anterior muestra con menor  $\chi$  (E3H5), pues la muestra E3H6 presenta  $\chi \sim 206.7 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{gr}$  y la muestra E3H5 presenta  $\chi \sim 109.8 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{gr}$ . El mismo caso ocurre en la estación 7 (E7).

Al igual que en los jales del DMOT, en el DMG se presenta un comportamiento similar en la relación  $\chi$ -Fe debido a las fases minerales presentes en las muestras; a diferencia que en Guanajuato la localidad de Pozuelos representa mucha variación pues se tienen dos horizontes con suelos y reacciones de oxidación muy evidentes además de que la geoquímica del mismo distrito se comporta de manera más heterogénea en comparación al DMOT. En los socavones la relación  $\chi$ -Fe es directa, solo en las muestras del socavón de la mina San Ignacio ya no se aprecia la relación tan marcada como en el socavón de La Valenciana, esto podría deberse a los tamaños distintos de partícula magnética presentes en las muestras y a la distinta mineralogía.

#### i) DMOT

En la siguiente figura, se muestra la variabilidad de los valores de la Estación 3 del DMOT; se observan claramente las diferencias entre los horizontes de jales y los de suelos, pues hay un aumento muy marcado en los valores de  $\chi$  y CE, así como una disminución en la concentración de EPT's y de pH. Esto se observa desde el H3 (último de jales) y el H4 (primero de suelos) y así a lo largo del perfil. Con base en este tipo de observaciones de los muestreos en campo, las muestras se analizaron de acuerdo a su afinidad textural como se explicó anteriormente, en jales y suelos para el DMOT y, en jales y socavones para el DMG.



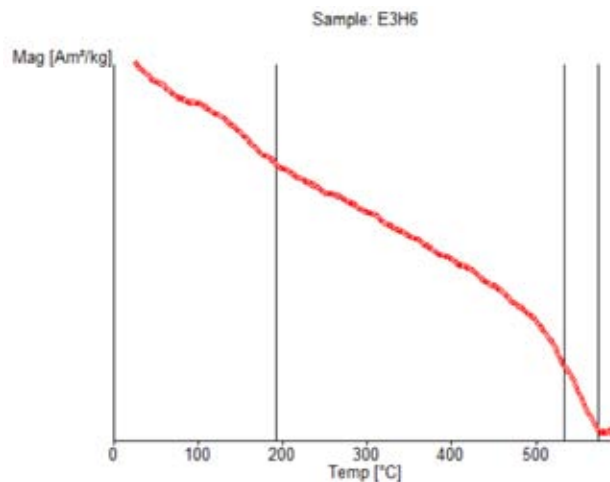
Variabilidad de las mediciones de la Estación 3 del DMOT. En la columna estratigráfica, H1 corresponde a textura franca, E2 y E4 a textura arcilla-limosa, E3 a franco-arcilla-arenosa, E5 y E6 a franco-arcillosa y E7 sin textura (Corona-Chávez et al., 2010).

En las relaciones entre la  $\chi$  y el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para las muestras de jales del DMOT se observan picos contrarios al Pb y As particularmente. El pH presenta una mejor correlación con el Pb y As, que con la  $\chi$  y el Fe. Estas relaciones se cumplen para los jales y suelos del DMOT. El diferente comportamiento de las propiedades químicas-magnéticas de las muestras se debe a la transición jales-suelo y al cambio de granulometría que pasa de ser arcillas desde la parte media a arcillo arenosa en las partes basales de cada perfil, además de los distintos dominios magnéticos presentes en las muestras. Es importante mencionar que las gráficas de los perfiles no muestran relación con la profundidad, solo entre horizontes.

En el caso de la muestra E3H6 se realizaron las curvas de histéresis y termomagnéticas, debido a que es la muestra con mayor valor de  $\chi$ . La tabla siguiente, muestra las temperaturas de las fases magnéticas encontradas en esta muestra, además de la mineralogía magnética asociada a las mismas. De la misma manera se presentan las curvas termomagnéticas medidas para esta muestra.

Muestra	Curva	Temperaturas de Curie				Mineralogía
		Fase 1 [°C]	Fase 2 [°C]	Fase 3 [°C]	Fase 4 [°C]	
E3H6 (Tlalpujahuá)	Calentamiento	573	193	533		a) Magnetita  c) Titanomaghemita y titanomagnetita

Tabla \_\_. Mineralogía magnética asociada a las temperaturas de Curie medidas para la muestra E3H6 del DMOT.

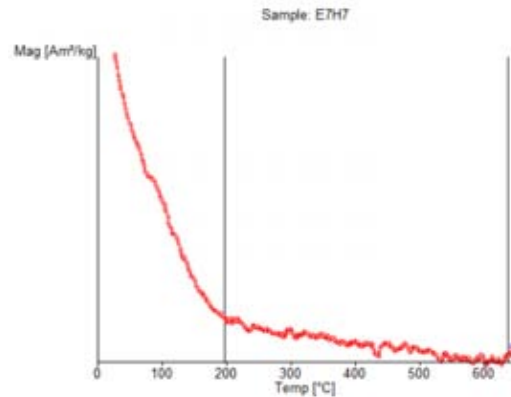


Curva termomagnética de calentamiento medida de la muestra E3H6.

Además de la mineralogía reportada en la tabla de la muestra E3H6, Corona-Chávez et al., 2010 reportó para la misma muestra la presencia de magnetita y titanomagnetita, al igual que la lectura en la curva termomagnética; mientras que para la muestra E3H5 presenta hematita. Debido a la presencia de magnetita en la muestra E3H6 se tiene hasta el doble del valor de  $\chi$  en comparación con la muestra E3H5 que es un horizonte anterior en el mismo perfil muestreado.

El otro caso de discrepancia en los datos en el DMOT se presenta en la E7, como se muestra a continuación.





Curva termomagnética de calentamiento medida de la muestra E7H7 del DMOT.

Se observan dos fases minerales, una a 198°C y la segunda a 638°C. Por lo que, se observó la presencia de titanohematita y hematita. Corona-Chávez et al., 2010 reporta hematita para las últimas 3 muestras de la E7; es por esto, que los valores de  $\chi$  de los últimos 3 horizontes (H5-H7) son prácticamente iguales y los mayores de los jales del DMOT, pero distintos a los valores de  $\chi$  y mineralogía del resto del perfil (E7). Lo particular de esta muestra es que provoca el único pico de discrepancia en la relación  $\chi$ -Fe en las muestras de jales del DMOT.

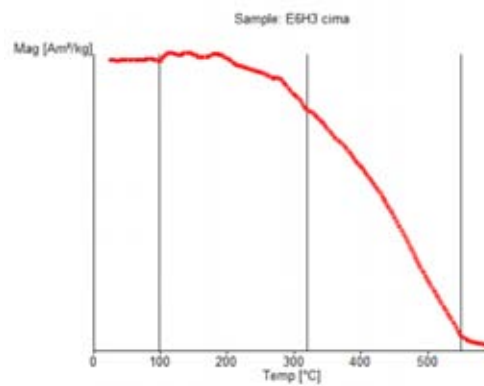
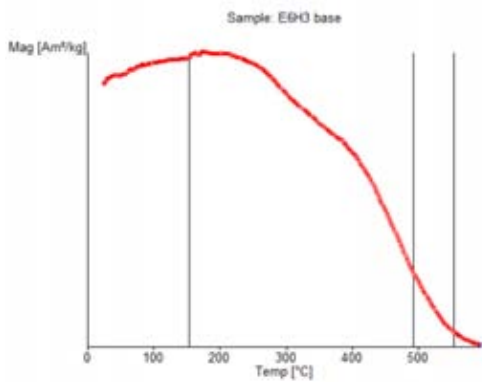
Ambos ejemplos muestran como las fases magnéticas afectan las lecturas de  $\chi$ . Sin embargo son solo algunas muestras las que presentan este comportamiento diferente al resto, lo cual, explica estos cambios apoyando el hecho de que la metodología funciona en general para el DMOT.

## ii) DMG

Para el Distrito Minero de Guanajuato (DMG), se revisaron las particularidades del muestreo tales como granulometría, textura, localidades y observaciones de campo. En el caso de la localidad de Burrones, no existe información que corrobore si realmente son jales, sin embargo, se decidió realizar el estudio ahí también con el fin de determinar la toxicidad de estas muestras. Este muestreo se realizó en la parte alta de un cerro que circunda la presa Burrones.

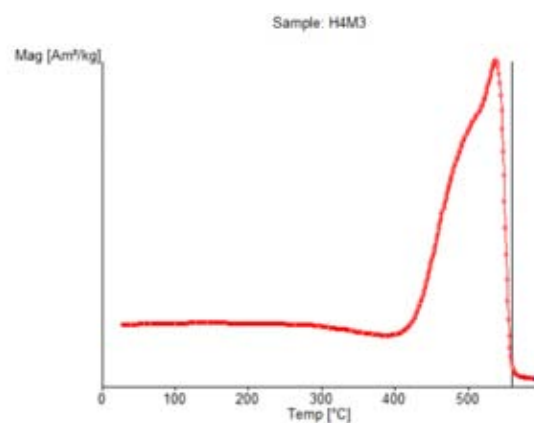
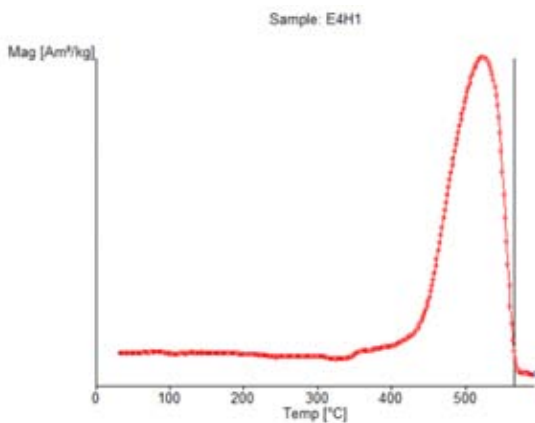
De las observaciones de campo se tiene que el pH es alcalino en todos los casos (>8) y las conductividades eléctricas son muy bajas (~100  $\mu$ S/cm); la granulometría y textura parecerían indicar que si son jales, sin embargo, al realizar las mediciones por FRX del contenido de EPT's se observó que son muy bajos, lo cual indica que estos jales no son tóxicos, podría ser que haya habido mucha lixiviación por lo que podrían hacerse estudios en las partes inferiores de esta localidad, es decir al nivel de la presa o aún más debajo de la cortina. Pero la observación de mayor interés fue el hecho de que los tres valores más altos de  $\chi$  en el DMG pertenecen a esta localidad. Por lo cual, se realizaron las curvas de histéresis y termomagnéticas de dos muestras: E6H3base y E6H3cima, que se presentan a continuación.

Muestra	Curva	Temperaturas de Curie				Mineralogía
		Fase 1 [°C]	Fase 2 [°C]	Fase 3 [°C]	Fase 4 [°C]	
E6H3base (Gto.)	Calentamiento	153	553	493		Titanomagnetita
E6H3cima (Gto.)	Calentamiento	99	549	319		Titanomagnetita



Para ambas muestras se reportan titanomagnetita y pirrotita, lo cual explica porque la diferencia entre ambas susceptibilidades es baja, pues la E6H3cima tiene una  $\chi$  de  $72.75 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{gr}$ , mientras que la E6H3base presenta una  $\chi$  de  $61.13 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{gr}$ .

Por otro lado, se compararon estas muestras de mayor  $\chi$  con las muestras de mayor contenido de Fe, es decir, las del socavón de la mina San Ignacio. Del socavón, se midieron dos muestras que se muestran en las gráficas siguientes: E4H1 y H4M3, pertenecientes a la misma estación.



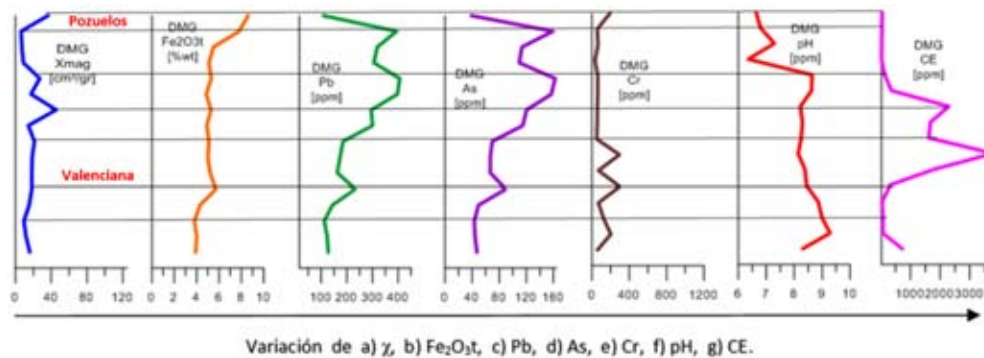
Las muestras E4H1 (565°C) y H4M3 (560°C) reportaron la presencia de titanomagnetita (forma de las curvas parecidas al efecto Hopkinson indicativo de la magnetita). Sin embargo, sus valores de  $\chi$  son menores que la muestra E6H3cima aun teniendo más fierro que esa muestra.

Además, en las curvas de histéresis se observó que ambas curvas son las más delgadas y alargadas, lo cual, es indicativo de inestabilidad magnética y/o del poco aporte de material ferri y antiferrimagnético. Además los ciclos reflejan un amplio aporte de material paramagnético que a su vez representa una baja presencia de minerales ferrimagnéticos.

Por lo que, en el DMG al igual que en el DMOT, las alteraciones en algunas de las lecturas de  $\chi$  se explican por la presencia de distintas fases magnéticas en las muestras.

Debido a lo anterior y a las observaciones geoquímicas, el DMG se separó en muestras de socavones y jales; para el caso de jales la localidad de Burrones se trabajó por separado sólo para determinar las tendencias de las relaciones de la  $\chi$  con los EPT's y el Fe, esto debido a la incertidumbre de su origen mencionado anteriormente y a las bajas lecturas de propiedades físico-químicas que se observaron desde el muestreo en campo. Sin embargo, estas muestras también fueron utilizadas en las interpolaciones para la determinación de los rangos de  $\chi$  de interés.

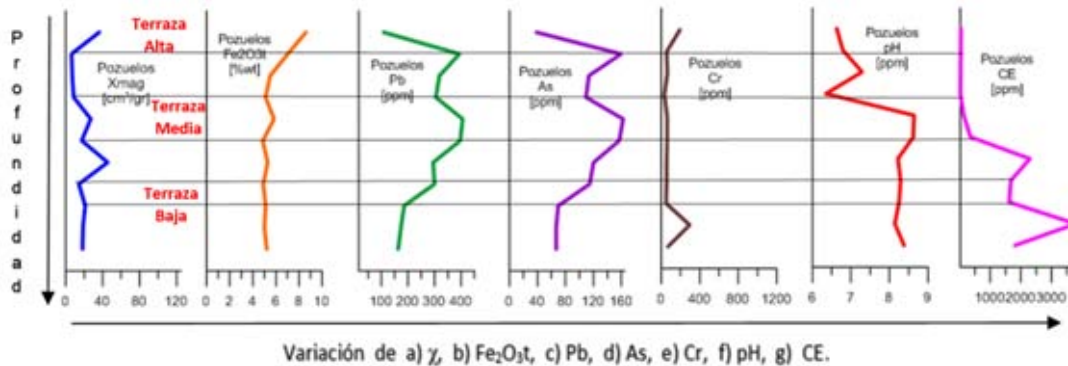
En los jales del DMG (Pozuelos y Valenciana), se aprecia que el comportamiento del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es directamente proporcional a la  $\chi$  en la mayor parte de las muestras. En este caso se observa como el Pb y el As siguen un mismo comportamiento, que a su vez es similar al del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  principalmente. En este caso, el comportamiento del pH y el Cr es inverso a la  $\chi$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Pb y As. Sin embargo, en la figura 4.10 se observa que la tendencia de la relación  $\chi$ -Fe entre las localidades de Pozuelos y Valenciana son inversas; por ejemplo, entre más alta es la  $\chi$  mayor es la concentración de algún elemento en La Valenciana, mientras que en Pozuelos a mayor  $\chi$  menor es la concentración de algún elemento. Es importante mencionar que la conducta de los jales de Pozuelos es similar al del DMOT, pues las concentraciones de  $\text{Pb} > 400\text{ppm}$ ,  $\text{As} > 160\text{ppm}$ ,  $\text{Cr} \sim 200\text{ppm}$  y la  $\text{CE} > 3000\mu\text{S/cm}$  son comparables en ambos casos. En las muestras de La Valenciana, los valores obtenidos son menores a excepción del pH. Esta información refleja el hecho de que en el método de cianuración además de usar cianuro de potasio, se usa también acetato de Pb, Zn y cal; y esto influye también en el contenido de metales pesados en los jales que provienen del método de cianuración.



Tendencias de los EPT's en relación a la  $\chi$  y el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$  en los jales del DMG.

Las relaciones inversas en las localidades del DMG probablemente se deben a que forman terrazas de erosión estratificada con 75 años de abandono indicativas de diversas etapas de depósito, además de que son desechos provenientes de la mina La Sirena y sedimentos del río Guanajuato. Otro factor importante es que para explotar la mena en los jales de La Valenciana se usó el método de flotación, mientras que para los jales de Pozuelos se utilizó también cianuración al igual que en el DMOT. Y estos métodos desarrollaron clasificaciones texturales distintas que condicionan la distribución en los minerales. Estas texturas van de grano grueso (50% mayor a  $200\mu\text{m}$ ) a arcillas, lo cual, tiene repercusión en todas las mediciones descritas más adelante a detalle.

La figura siguiente se presentan las tendencias de los EPT's en relación a la  $\chi$  y el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$  en los jales de la localidad de Pozuelos del DMG; en ella se observan los tres perfiles muestreados en Pozuelos en orden topográfico, con los niveles topográficos más altos en la parte superior de la imagen. Se observa que las primeras cuatro muestras en cada perfil corresponden a la terraza alta de la localidad de Pozuelos, a partir de la quinta muestra hay un aumento en los valores de pH y, a partir de la terraza media en la CE también. Esto se debe a que en las primeras dos muestras (H3M1, H3M2) se tienen suelos oxidados, por lo que el valor de la CE es mucho menor al resto del perfil (la textura es más gruesa en esta parte que hacia abajo del perfil), así como las concentraciones de Pb y As, mientras que es donde se tiene más Fe. Desde la muestra H3M3, hay un aumento en los valores de Pb y As y, a partir de la terraza media (H1M1 en adelante) los valores de CE y pH también aumentan, esto debido a que la textura es arcillosa y se retienen las concentraciones de Pb y As, así como los productos lavados de la oxidación. Posteriormente, hacia la parte inferior de los jales, en el canal del río Pozuelos (H2M1) el Pb y As disminuyen y la CE aumenta, pues en estas zonas los jales fueron enriquecidos en arcillas minerales, donde de acuerdo a Ramos-Arroyo & Siebe Grabach, 2005, hay acumulación de solutos y se presenta reducción de oxi-hidróxidos y sulfatos además de que la difusión de oxígeno es limitante para la oxidación.



Tendencias de los EPT's con relación a la  $\gamma$  y el contenido de  $Fe_2O_3t$  en los jales de la localidad de Pozuelos del DMG.

Es importante mencionar que la localidad de Pozuelos muestra una gran variabilidad espacial en los valores de las distintas mediciones reportadas, esto debido a las siguientes razones:

- 1) El tipo de mena determina las cantidades de sulfuros por tanto, también de metales en los jales y en esta localidad el origen geológico de la concentración de metales son brechas y stockwork, con litología encajonada en el conglomerado Guanajuato con contenidos de  $CaCO_3$  bajos (0-10%) dato corroborado en campo pero que también reporta (Ramos-Arroyo & Siebe-Grabach, 2005).
- 2) En estos jales aún se encuentra pirita, debido a que la textura fina no permite una adecuada aireación ni aporte de oxígeno. Además de que el valor de  $CaCO_3$  fue del 0% en la terraza alta por ejemplo, el pH es neutro y la CE es baja pues parte de los sulfuros se oxidaron. Esta zona es de lavado, mientras que la terraza media es de acumulación.
- 3) El conglomerado Guanajuato presenta naturaleza fracturada, por lo que permite la infiltración de fluidos en los jales y, mientras el talud alto es muy poroso y con buena filtración, el talud bajo son estratos arcillosos. Los estratos de textura gruesa pierden humedad fácilmente y por lo general no se oxidan, mientras que los de textura fina si se oxidan por su mayor capacidad de retención de humedad.
- 4) La vegetación en la parte del talud alto favorece el proceso de oxidación, pues incrementa la capacidad de retención de humedad y la aireación del sustrato. Es por eso que en campo se observó que cerca de las zonas cercanas a las raíces de plantas las coloraciones amarillas y rojizas se relacionan al desarrollo de microambientes en las zonas de raíces, donde la oxidación de los sulfuros es más intensa.

La terraza alta de Pozuelos específicamente los primeros dos horizontes y la localidad de Burrones se trataron por separado para la determinación de las tendencias debido a las particularidades antes mencionadas en cada perfil. Sin embargo, se detectaron formas de identificarlos en campo y detectar su toxicidad o no toxicidad. Por ejemplo en el caso de Burrones, se propone que para identificar

estos jales no tóxicos se debe cumplir la relación a  $\chi < 50$  y  $\text{pH} > 8$ ; mientras que para la terraza alta de Pozuelos, se determinaron  $20 < \chi < 50$  y  $\text{pH} < 8$  para identificar estos jales tóxicos. Estos modelos predictivos se determinaron gracias a las interpolaciones realizadas de los EPT's correlacionados con la  $\chi$  y el pH. Así, se muestran las tendencias de los EPT's en relación a la  $\chi$  y el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en los jales de la localidad de Burrones del DMG.

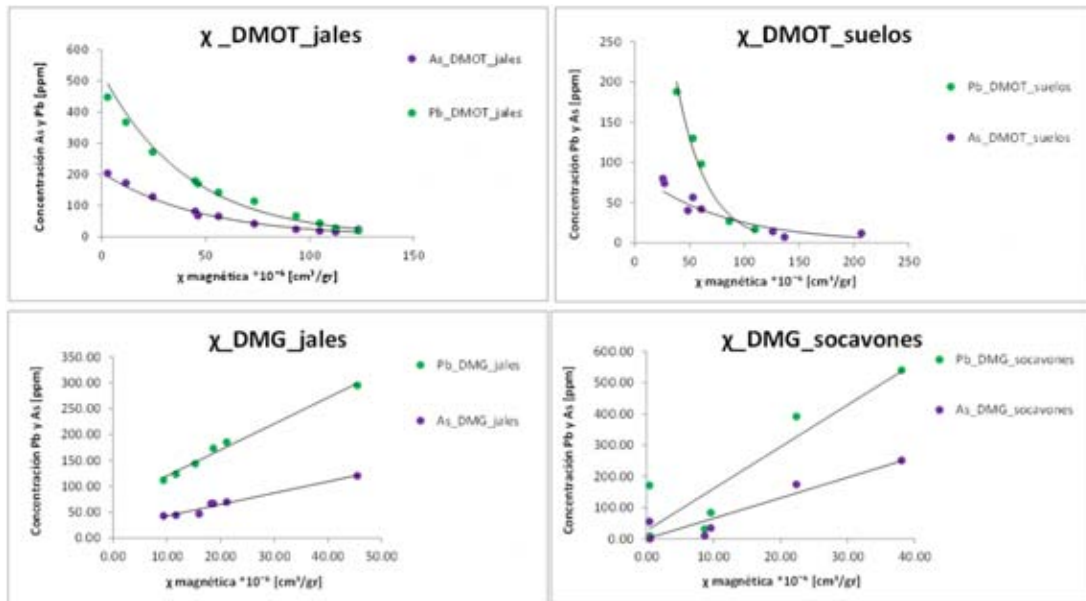
Es importante mencionar que de la localidad de Burrones no hay ningún tipo de información existente y, debido a que sus concentraciones de EPT's son muy bajas, sería interesante muestrear las zonas bajas, cercanas a la presa o bajo la cortina para corroborar si hubo lixiviación y migración de metales.

En los socavones del DMG, se observan los cambios más pronunciados en la relación  $\chi$ -Fe en las muestras H4M3, H5M3 y H5M5. En particular, estas muestras son de composiciones distintas, pues la H4M3 pertenece al socavón de la mina San Ignacio por lo que son sulfuros oxidados, mientras que la H5M3 y la H5M5 corresponden a La Valenciana; la primera, corresponde a caolín con impurezas de minerales de Fe y la H5M5 son rocas alteradas con minerales de Fe oxidados. En particular, la muestra H5M3 presenta en las curvas termomagnéticas, titanomagnetita y pirrotita cambiando a magnetita. Esto se aprecia también en los valores de CE pues la muestra H5M3 es  $> 21000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que en la H5M5  $\sim 32 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Sin embargo, la figura 4.12 muestra las tendencias de los EPT's en relación a la  $\chi$  y el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  presentan una relación directa en los socavones del DMG. En este caso el Cr si presenta buena relación con la  $\chi$ .

### iii) Comparación entre el DMOT y DMG

En la figura siguiente se presentan las tendencias generales entre Pb, As y Fe en el DMOT. Se observa que el Pb y el As presentan una tendencia negativa en relación a la  $\chi$  para los jales y suelos en el DMOT; mientras que en el DMG se tienen dos comportamientos descritos; en donde, Pozuelos presenta el mismo comportamiento que el DMOT, mientras que La Valenciana presenta una tendencia positiva para los jales y socavones, solo el Fe presenta una tendencia positiva como el DMOT.

En el DMOT las concentraciones se observan mayores para los jales a menores valores de  $\chi$ , y las concentraciones son mayores en los jales que en los suelos; mientras que en el DMG se observan mayores concentraciones para los socavones que para los jales en relación a la  $\chi$ , y en los jales las mayores concentraciones están relacionadas a valores altos de  $\chi$ .



Tendencias generales entre Pb, As y Fe en el DMOT y DMG.

En ambos distritos, se encontró mediante las curvas termomagnéticas y de histéresis, que la señal magnética se ve afectada por las fases mineralógicas presentes en las muestras. Por estas razones se recurrió a la medición de estas curvas, con el fin de obtener información complementaria para determinar la mineralogía de las muestras anómalas y, así brindar una explicación a las discrepancias en las relaciones  $\chi$ -Fe.

La mayor parte de las curvas de histéresis no presentan forma alargada ni delgada, lo cual, refleja una contribución importante de minerales magnéticos duros y estables en la mayoría de las muestras analizadas. Es decir, las curvas denotan aporte de material magnéticamente más estable al menos en las curvas más amplias. La forma de cintura de avispa (wasp-waisted) reduce el espectro de minerales opacos, sin embargo, solo dos muestras reportaron este comportamiento. Esto puede ser un indicador de la dominancia de fases ferro-ferrimagnéticas con diferentes coercitvidades, así como la mezcla de titanomagnetitas y titanohematitas que precisamente se reportaron en las curvas termomagnéticas de las muestras elegidas por las discrepancias que mostraron en la relación  $\chi$ -Fe. Una vez explicadas las discrepancias de las muestras elegidas en las relaciones  $\chi$ -Fe, se observó que el método permite identificar las altas concentraciones de EPT's muy claramente para el DMOT en el cual, a menores valores de  $\chi$  presenta mayor concentración de EPT's. En el caso del DMG se presenta la relación inversa al DMOT, es decir, a mayor  $\chi$  mayores concentraciones de EPT's. Estas relaciones se respetan sin importar si son jales y suelos en el DMOT, o jales y socavones en el DMG. Los rangos de  $\chi$  en el DMG caen dentro del rango de las altas concentraciones del DMOT, por lo que para ambos casos son de nuestro interés los bajos valores de  $\chi$ . Tales como se acotaron en el apartado 4.10. Por lo que es de esperarse que al estudiar otro distrito minero se acoten los mismos rangos de  $\chi$ .

Por otro lado, en los mapas generados a partir de las interpolaciones se observa que el Pb y el As presentan sus menores concentraciones sobre las pendientes más altas, mientras que las mayores concentraciones se encuentran asociadas a zonas con menor cambio en la topografía, es decir, más planas. Pero además, estas altas concentraciones de Pb y As están asociadas al distrito de El Oro. La  $\chi$  presenta, por el contrario, sus valores más altos hacia las zonas de las pendientes más altas que imperan en Tlalpujahuá. El Cr presenta una distribución parecida a la  $\chi$ . Para el DMG no se realizaron interpolaciones debido a que se muestrearon solo cuatro estaciones.



## 6. CONCLUSIONES

Para poder realizar la metodología propuesta en el presente trabajo se debe hacer inicialmente una exploración general inicial con el fin de establecer los parámetros y por tanto recopilar información, para así, hacer análisis químicos que incluyan al menos lecturas de pH y CE, además de  $\chi$  y por medio del análisis geoquímico y magnético en campo, escoger las muestras que se crean indicativas de altos contenidos de EPT's para corroborar sus contenidos mediante análisis de fluorescencia de rayos X o alguna otra técnica que reporte el contenido de EPT's.

Por lo tanto, para realizar estos estudios en un distrito nuevo, se deben llevar a cabo dos pasos principalmente:

1. Muestreo de los horizontes más representativos apoyándose de un control estratigráfico para saber si se muestrean jales o suelos o socavones, además de tener control del tamaño de grano mediante técnicas manuales en campo para el reconocimiento granulométrico así como la estimación del contenido de calcita, entre otros factores como la medición de las propiedades físico-químicas (caso Burrones).
2. En gabinete seleccionar muy pocas muestras para el análisis de fluorescencia de rayos X, de acuerdo a la metodología, sería más indicativo tomar 2/3 partes de las muestras con bajas  $\chi$  y 1/3 parte de las muestras con altas  $\chi$ . Esto con el fin de corroborar si se comportan las muestras como la predicción realizada al trabajar con los distritos de El Oro-Tlalpujahuá (DMOT) y Guanajuato (DMG).

## **Referencias:**

- (Corona-Chávez et al., 2010)

Corona Chávez, P., Martínez Medina, M., Maldonado Villanueva, R., Robles Camacho, J., Ramos Arroyo Y.R., Lozano SantaCruz, R., y Schaaf, P., 2010. Variaciones geoquímicas y mineralógicas en los jales de oro del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Sesión Especial Geoquímica y Geología Ambiental de Residuos Mineros en México.

- (Uribe-Salas, 2008; 2009)

Uribe Salas, J.A. 2008. *Historia de la Minería en Michoacán*. Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Sociedad Mexicana de Mineralogía, Museo Tecnológico del Siglo XIX “Las Dos Estrellas”, 2 vols. Morevallado Editores, Morelia Michoacán.

Uribe Salas, J.A. 2009. *Historia económica y social de la Compañía Minera “Las Dos Estrellas” en El Oro y Tlalpujahua, 1898-1938*. México, Universidad Autónoma Metropolitana, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

- (Corona-Chávez & Uribe-Salas, 2009)

Corona Chávez, P., y Uribe Salas, J. A. 2009. *Atlas cartográfico del distrito Minero El Oro-Tlalpujahua*, México, UMSNH, COECYT, Morevallado Editores, Morelia, Michoacán, México, 105 pp.

- (Mendoza-Amézquita et al., 2006)

Mendoza Amézquita, E., Armienta Hernández, M.A., Ayora, C., Soler, A., y Ramos Ramírez, E., 2006. Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 23(1), pp. 75-83.

- (Ramos-Gómez et al., 2012)

Ramos Gómez, M., Avelar J., Medel Reyes, A., Yamamoto, L., Godinez, L., Ramírez, M., Guerra, R., y Rodríguez, F., 2012. Movilidad de metales en jales procedentes del Distrito Minero de Guanajuato, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, v. 28 (1), pp. 49-59.

- (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006)

Ramos-Arroyo, Y.R. y Siebe-Grabach, C.D. 2006. Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23 (1), pp. 54-74.

- (Verosub y Roberts, 1995)

Verosub, K.L. y Roberts, A.P., 1995. Environmental magnetism: Past, present, and future. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), vol. 100 (B2), pp. 2175-2192.

- (G. G. Matasova et al., 2005)

Matasova, G.G., Kazansky, A.Y., Bortnikova, S.B., Airijants A.A., 2005. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. Vol. 5, pp. 75-89.

- (Boer & Dekkers, 1998)

B. de Boer, C., y J. Dekkers, M., 1998. Thermomagnetic behaviour of haematite and goethite as a function of grain size in various non-saturating magnetic fields. *Geophysical Journal International*, 133, pp. 541-552.

- (Tarling, 1983)

Tarling, D.H., 1983. *Paleomagnetism*, Principles and Applications in Geology, Geophysics and Archaeology. *Chapman and Hall*.

- (Day, 1975).

Day, R., 1975. Some curious thermomagnetic curves and their interpretation. *Earth and Planetary Science Letters*, 27, pp. 95-100.

- (Böhnell et al., 2002).

Böhnell H., McIntosh, G., y Sherwood, G., 2002. A parameter characterizing the irreversibility of thermomagnetic curves. *Physics and Chemistry of the Earth* 27, pp. 1305-1309.

- (Petrovský & Kapicka, 2006)

Petrovský, E., y Kapicka, A., 2006. On determination of the Curie point from thermomagnetic curves. *Journal of Geophysical Research*, vol. 111.

- (Essentials of Paleomagnetism: Third Web Edition, 2014)

Tauxe, L., Banerjee, K., Butler F., R., y van der Voo, R., 2014. Essentials of Paleomagnetism: Third Web Edition.

- (Meléndez Pizarro y Camacho Dávila, 2009)

Meléndez-Pizarro, C.O. y Camacho-Dávila, A.A., 2009. Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X. *Aventuras del Pensamiento*. Enero-marzo.

- (Jackson et al., 1990)

Jackson, M.J., Worm, H.U. y Banerjee, S.K., 1990. Fourier analysis of digital hysteresis data: rock magnetic applications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*.

- (Gutiérrez-Ruiz et al., 2007).

Gutiérrez-Ruiz, M., Romero, F.M. y González-Hernández, G., 2007. Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 24(2), pp. 170-184.

- (Rivas-Ortiz, 2006)

Rivas Ortiz, J.F., 2006. Análisis de magnetismo de rocas en paleosuelos pleistocénicos de origen volcánico y eólico, como una herramienta alterna en la interpretación paleoambiental. Tesis para obtener el grado académico de maestro en ciencias. Ciudad Universitaria, D.F. Febrero de 2006.

- (Panorama minero del Estado de Michoacán, septiembre del 2011)

Panorama minero del Estado de Michoacán, septiembre del 2011. Secretaría de Economía (SE).

- (Panorama minero del Estado de México, septiembre del 2011)

Panorama minero del Estado de México, septiembre del 2011. Secretaría de Economía (SE).

- (summary mail, 1994)

Summary of Comments to Question about Wasp-waisted of Constricted Hysteresis Loops, 1994.  
From Eda Petrovsky, Geophysical Institute, Prague.

- (Rufino-Lozano et al., 2005)

Lozano, R. Bernal, J.P., 2005. Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), pp. 329-344.

- (Cornelis y Cornelius, 1996).

Cornelis K. y Cornelius S.H., Jr., 1996. Manual de Mineralogía, vol. 2. Editorial Reverté.

- (Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System)

Dearing, J., 1999. Environmental Magnetic Susceptibility, using Bartington MS2 System.

- (Willard et al., 1974; Bates, 1983)

Willard, H.H, Merrit, L.L., Dean, J.A., 1974. Instrumental methods of analysis. 5<sup>th</sup> edition Van Nostrand.

Bates, R.G., 1983. Determination of pH. Wiley, New York.

- Martínez-Medina, 2009

Martínez-Medina, M., 2009. Diagnóstico del impacto ambiental causado por la minería en el Distrito Minero El Oro-Tlalpujahuá mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

- (de la O.-Villanueva et al., 2013)

De la O.-Villanueva, M., Meza-Figueroa, D., Maier, R.M., Moreno, D., Gómez-Álvarez, A., Del Río-Salas, R., Mendivil, H., Montijo, A., 2013. Procesos erosivos en jales de la Presa I de Nacozari de García, Sonora y su efecto en la dispersión de contaminantes. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. 65, núm. 1, pp. 27-38.

- (Martín-Romero & Gutiérrez-Ruíz, 2010)

Martín-Romero, F., Gutiérrez-Ruíz, M., 2010. Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. 62, núm. 1, pp. 43-53.

## ANEXO 1. Fluorescencia de Rayos X

La FRX es una herramienta de análisis o técnica de espectrometría atómica cualitativa y cuantitativa, que se basa en las transiciones energéticas de electrones de los átomos que se producen cuando una radiación electromagnética de cierta energía incide con el material en estudio. Al incidir el haz de energía se produce una excitación del átomo, el cual pasa de un estado basal (estable) a otro de mayor energía (inestable) resultando transiciones en diferentes estados energéticos en el átomo, los cuales son únicos para cada especie atómica en particular. Al ser expulsado el electrón del átomo y ser remplazado por otro electrón de energía diferente (otro nivel), hay una diferencia de energía, la cual se emite en forma de radiación de rayos X. Es decir la FRX. La energía de rayos X emitida es convertida a longitud de onda específica (única para cada elemento), que a su vez, permite hacer una clara identificación de los elementos presentes en el material que se analiza. (Meléndez Pizarro y Camacho Dávila, 2009).

En el proceso de absorción de la energía de rayos X en la muestra, los electrones se desalojan de las capas más internas (llamadas *K*, *L*, *M*). Un electrón expulsado (por ej. de la capa *K*) debe reemplazarse y es muy probable que la vacante sea cubierta por un electrón procedente de la capa siguiente más externa (capa *L*) y no de otra capa más alejada. Este proceso crea una nueva vacante que es cubierta por otro electrón de la capa siguiente y así sucesivamente. Estos electrones que pasan a capas internas se desplazan de altos a bajos niveles energéticos y como resultado de ellos emiten energía en forma de radiación X característica. Los agrupamientos de líneas espectrales se clasifican en espectros *K*, *L*, o *M* según las capas de menor nivel energético que los electrones más externos pasan a ocupar. Estos rayos X característicos se denominan *rayos X secundarios*, y el fenómeno de emisión se conoce como *fluorescencia de rayos X*. (Cornelis y Cornelius, 1996). Estas emisiones de radiación X con longitudes de onda específicas que acompañan a las transiciones electrónicas de capas más externas a capas más internas, producen distintas radiaciones dependiendo de la capa de la que proceden y a la que van, por ejemplo, las transiciones electrónicas de la capa *L* a la capa *K* producen radiación  $K\alpha$  y las transiciones de la capa *M* a la *K* producen radiación  $K\beta$ .

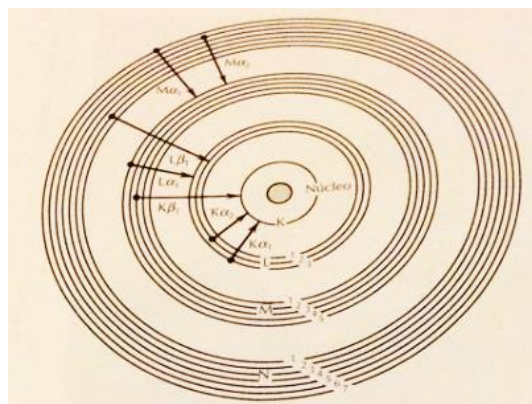


Ilustración esquemática de la producción de los espectros característicos K y L como resultado de los electrones que caen en cascada desde niveles de mayor a menor energía en la estructura atómica. Las líneas de emisión de rayos X se representan con una letra mayúscula que indica la capa cuya vacante se cubre. A continuación, la letra griega  $\alpha$  indica que el electrón que llena la vacante se origina en la siguiente capa de mayor energía; la letra  $\beta$  indica que el electrón procede de dos capas situadas más arriba, y así sucesivamente. Los números subíndices señalan las subcapas específicas (1 para s, 2 para p) de las que procede el electrón que cubre la vacante. (Cornelis y Cornelius, 1996).

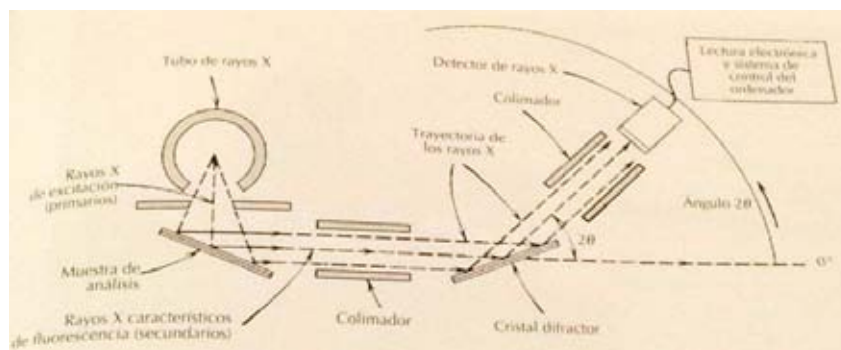
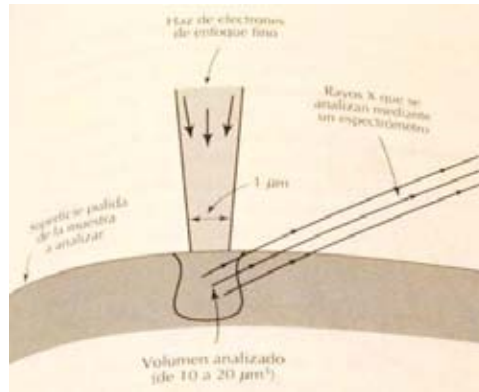


Ilustración esquemática de los componentes principales de un analizador de FRX (Cornelis y Cornelius, 1996). El espectrómetro de FRX está sujeto a variaciones de tipo mecánico (goniómetro), eléctrico (corriente eléctrica) y electrónico (sistema de medición) que debe controlarse para tener suficiente precisión en los resultados analíticos (Pablo-Galán, 1978).

En el análisis geoquímico por espectrometría de FRX la concentración del elemento analizado es calculada de la interacción de la radiación característica X según los modelos y algoritmos que incluyen en una u otra forma el efecto interelemental o efecto de varios componentes de la roca sobre el elemento analizado (Pablo-Galán, 1979).



Representación esquemática del pequeñísimo volumen irradiado por electrones incidentes sobre la superficie pulida de una muestra. Los rayos X característicos que se generan se dispersan y se analizan mediante un espectrómetro (con un cristal difractor, como en la fluorescencia de rayos X) o mediante un sistema de análisis de energía dispersa. (Cornelis y Cornelius, 1996).

## ANEXO 2. Análisis Multivariado

En un sentido amplio, el análisis multivariado se refiere a todos los métodos estadísticos que analizan simultáneamente medidas múltiples de cada individuo u objeto sometido a investigación. En sentido estricto, muchas técnicas multivariantes son extensiones del análisis univariante (análisis de distribuciones de una sola variable) y del análisis bivariante (clasificaciones cruzadas, correlación, análisis de la varianza y regresiones simples utilizadas para analizar dos variables). Por ejemplo, una regresión simple (con una variable predictor) se extiende al caso multivariante para incluir varias variables predictor.

El supuesto fundamental del análisis multivariado es la normalidad de los datos, en referencia al perfil de la distribución de los datos para una única variable métrica y su correspondencia con una distribución normal, punto de referencia de los métodos estadísticos. Si la variación respecto de la distribución normal es suficientemente amplia, todos los test estadísticos resultantes no son válidos, dado que se requiere la normalidad para el uso de los estadísticos de la  $t$  y de la  $F$ . La normalidad multivariada (combinación de dos o más variables) implica que las variables individuales son normales en un sentido univariante y que sus combinaciones también sean normales.

Este procedimiento está diseñado para resumir dos o más columnas de datos numéricos. Calcula resúmenes estadísticos para cada variable, así como correlaciones y covarianzas entre las variables.

En la tabla de resumen estadístico (capítulo 4), se calcula un número de diversos estadísticos que se usan comúnmente para resumir una muestra de  $n$  observaciones. La mayoría de estos estadísticos caen dentro de 3 categorías: medidas de tendencia central (caracterizan el centro de los datos), medidas de dispersión (caracterizan la dispersión de los datos) y medidas de forma (caracterizan la forma de los datos en relación a una distribución normal). Los estadísticos incluidos son: recuento (número de muestras incluidas en el análisis), promedio (media muestral), desviación estándar (índice numérico de la dispersión de las muestras, es decir, cuánto éstas se alejan de la media muestral), coeficiente de variación (compara el menor o mayor grado de homogeneidad de una variable respecto de otra), mínimo, máximo, rango, sesgo estandarizado (intervalo de  $-2,+2$  de cumplimiento con la normalidad estadística) y curtosis estandarizada (intervalo de  $-2,+2$  de cumplimiento con la normalidad estadística).

El intervalo de confianza hace referencia a los intervalos de confianza de la media y de la desviación estándar de cada variable. Los intervalos del 95% se refieren a que ese 95% contendrán el verdadero valor del parámetro a estimar.



Por otro lado, los coeficientes de correlación miden la fuerza de la relación lineal entre dos columnas en una escala de -1 (relación negativa perfecta o inversa) a +1 (relación positiva perfecta), el signo - o + indica la dirección de la relación y el 0 indica una ausencia de relación. Entre mayor sea el valor absoluto de la correlación más fuerte es la relación lineal entre las dos variables. Dentro de las tablas de correlación, para cada par de variables se muestra: 1.  $r_{ij}$ , el coeficiente de correlación de momento del producto Pearson (el t estadístico se compara con una t distribución con  $n-2$  grados de libertad) estimado entre la variable fila  $i$  y la variable columna  $j$ ; 2.  $n_{ij}$ , el número de casos usados para estimar esa correlación; y 3.  $P_{ij}$ , un valor-P que puede ser usado para probar la hipótesis de que la correlación entre dos variables es igual a 0. Valores-P bajos (menores que 0.05 si se opera a un nivel de significancia del 5%) corresponden a correlaciones estadísticamente significativas.

El tamaño muestral tiene un impacto en la conveniencia y la potencia estadística de la regresión múltiple. Muestras pequeñas (menos de 20) son apropiadas sólo para el análisis de regresión simple con una única variable independiente. Incluso en estas situaciones, sólo se pueden detectar relaciones muy fuertes con cierto grado de certidumbre. De la misma forma, las muestras muy grandes de 1000 observaciones o más, hacen los test de significancia estadística demasiado sensibles, indicando que casi cualquier relación es estadísticamente significativa.

### ANEXO 3. Calibraciones, equipo X-Calibur

Como elemento mayor se calibró el Fe como  $Fe_2O_3$ t usando los estándares de calibración del conjunto de muestras IGLs:

Estándar	C dada [%wt]	C medida [%wt]
IGLa-1	5.930	6.033
IGLc-1	0.029	0.004
IGLd-1	0.024	0.017
IGLsy-1	4.130	5.400
IGLsy-2	3.820	4.725
IGLsy-4	5.430	5.787
IGLs-1	13.010	11.843

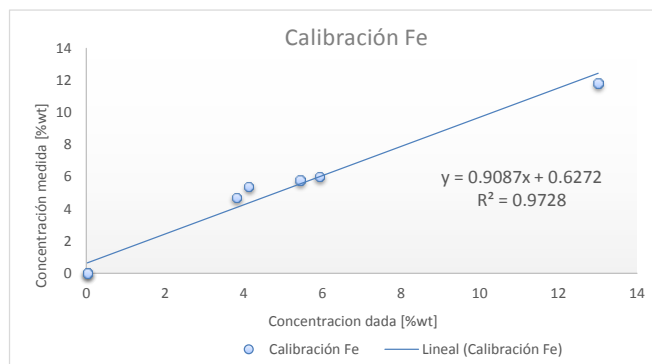


Tabla y figura de la calibración del Fe.

Dentro de los EPT's de interés se calibraron:

As

Estándar	C dada [ppm]	C medida [ppm]
15ppm	15	23
30ppm	30	35
45ppm	45	47
60ppm	60	59
75ppm	75	72
84ppm	84	80

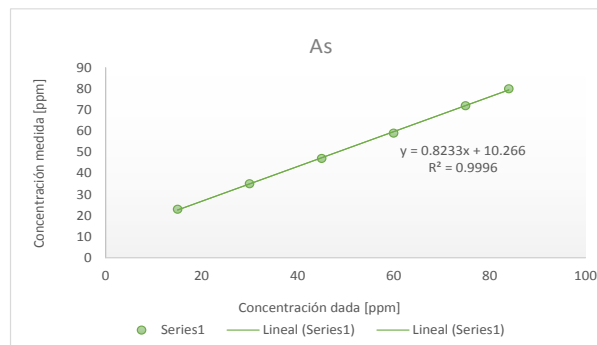


Tabla y figura de la calibración del As.

En la siguiente tabla se muestran mediciones en las muestras IGL's del Pb y los gráficos correspondientes a cada prueba:

	Concentración estimada *	Concentración calculada **	Concentración calculada ***
	[ppm]	[ppm]	[ppm]
IGLa-1	10.2	9.6	8.0
IGLc-1	2.9	0.5	0.7
IGLd-1	0.5	0.1	0.1
IGLs-1	26.9	26.2	28.0
IGLgb-3	5.9	3.3	1.6
IGLsy-1	19.3	16.8	21.3
IGLsy-2	12.8	17.7	15.7
IGLsy-4	7.7	5.7	6.6

Tabla de la calibración del Pb.

- \* Lozano IGL
- \* LUGA
- \* Como muestra desconocida (unknown)

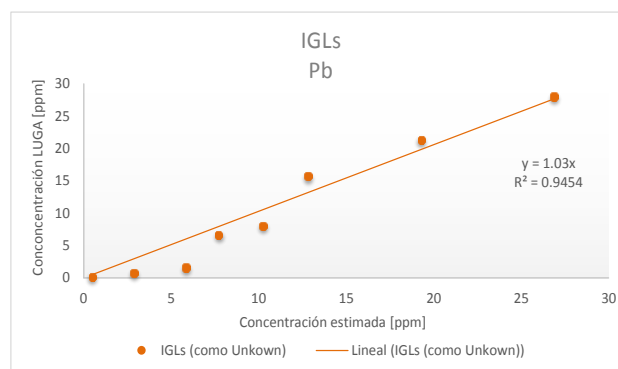


Figura de la correlación entre la Concentración reportada (Rufino Lozano et al., 2004) y la medida en el LUGA (Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental).

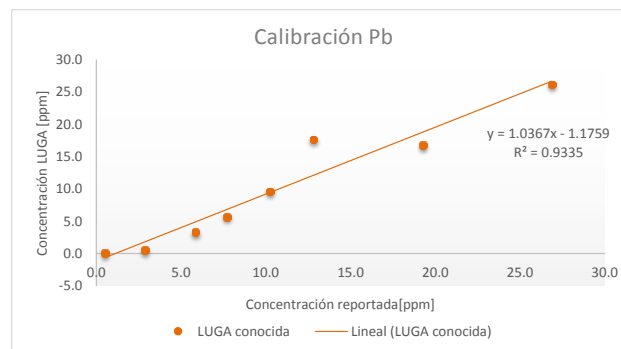


Figura de la correlación entre la Concentración estimada (Rufino Lozano et al., 2004) y la Concentración estimada por el equipo de la muestra introducida como muestra desconocida.

En el caso del Cr dos muestras IGL se utilizaron en la calibración y se utilizó una muestra de concentración conocida:

Muestra	C reportada [ppm]	C medida [ppm]
IGLa-1	29.2	49.9
E11H5	118.0	128.7
IGLs-1	215.1	203.2

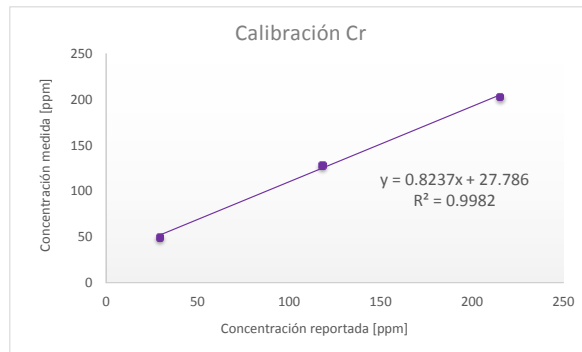


Tabla y figura de la calibración del Cr.

#### ANEXO 4. Susceptibilidad Magnética y parámetros magnéticos

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	Pb	30xFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	Low-frec-Susc	Hi-frec-Susc
3.2	167	96	84.1	43.46
3	177	90	100.1	55.66
2.1	120	63	82.9	52.9
2.4	175	72	24.5	24.5
3.4	214	102	35.3	35.3
4.8	25	144	46.5	46.5
1.4	273	42	2.8	2.8
1.3	160	39	4	4
1.4	173	42	4.1	4.1
7.4	24	222	169	104.8
10.3	26	309	112.5	112.5
7.7	32	231	112.9	112.9
1.4	110	42	4.5	4.5
1.8	210	54	38.5	18.7
1.5	228	45	11.6	11.6
6	38	180	179.3	93.46
1.7	177	51	7	7
7	19	210	123.4	123.4
3.9	149	117	136.6	66.7
3.1	215	93	67.8	32.4

Tabla de las Pruebas de cambios de frecuencias y su relación con el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t y el Pb.

El sensor MS2B es un oscilador de estabilidad termal muy alta para el cual, el inductor es el principal componente para determinar la frecuencia. Cuando el inductor contiene solo aire, el valor de  $\mu_0$  determina la frecuencia de oscilación, mientras que cuando el inductor se coloca bajo la influencia del espécimen a ser medido, el valor de  $\mu_r$  determina la frecuencia de oscilación. Este sensor opera en base al principio de inducción de corriente alterna. Cuando se suministra alimentación (energía) al circuito oscilador en el sensor se genera una baja intensidad (80 A\*m aproximadamente) en el campo magnético alterno. Ésta información de frecuencia es regresada en forma de pulso al medidor MS2B donde es convertida en un valor de susceptibilidad ( $\chi$ ). Las mediciones realizadas se llevaron a cabo a baja frecuencia (0.465 KHz) en el sistema CGS cada 0.1segundos y como es por masa cada valor se entiende que es por  $10^{-6}$  [cm<sup>3</sup>/gr]. Aunque en este equipo el material conductor metálico puede ser medido, se divide en una forma granular para reducir la contribución diamagnética aparente que puede deberse a las corrientes (corrientes eléctricas inducidas en conductores al cambiar el campo magnético en el conductor), por lo que la granulometría de los jales es adecuada para la medición de la susceptibilidad magnética ( $\chi$ ). (Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System).

El equipo cuenta con dos opciones de frecuencia: alta y baja. Se realizaron diversas pruebas para revisar la efectividad de la señal en las mediciones.

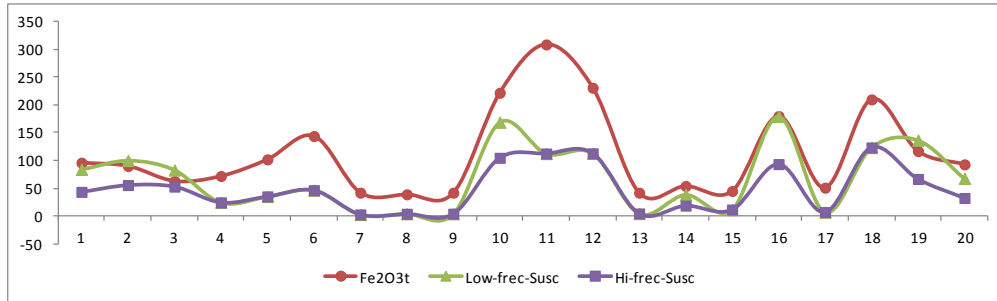


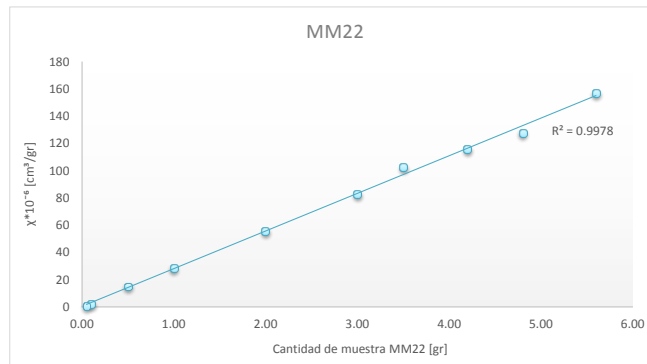
Figura de las Pruebas para la elección del rango de frecuencias; se puede observar que a menores frecuencias la señal es mucho mejor aproximada a diferencia de las altas frecuencias.

Con el fin de evaluar la variación de la susceptibilidad magnética en relación a la concentración de jales en los contenedores, se realizaron distintas mediciones de masa y susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) con dos muestras estudiadas anteriormente en el laboratorio, la MM09 (de menor susceptibilidad) y la MM22 (de mayor susceptibilidad, casi el doble que la MM09). Y se comprobó que la cantidad de muestra y la susceptibilidad magnética guardan una relación directamente proporcional, esto para susceptibilidades altas y bajas. Para ello se realizaron diluciones de cada muestra con carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) haciendo uso del equipo XACQUAN de la marca Magou y del susceptibilímetro MS2.



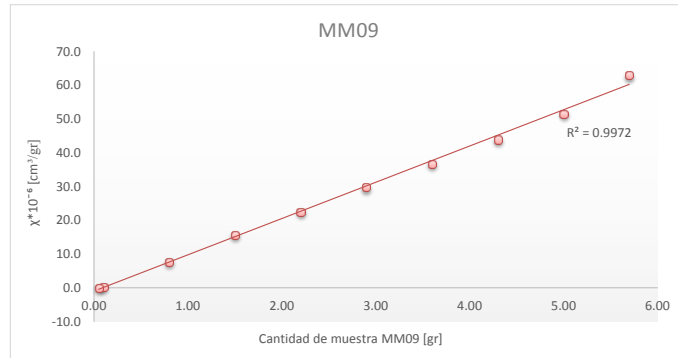
Figura del Magnetosusceptibilímetro XACQUAN de la marca Magou.

MM22	
Muestra [gr]	$\chi$
5.60	157.0
4.80	127.9
4.20	116.1
3.50	102.6
3.00	83.0
2.00	55.7



1.00	28.5
0.50	15.0
0.10	2.1
0.05	0.9

MM09	
Muestra [gr]	$\chi$
5.70	63.0
5.00	51.6
4.30	44.0
3.60	36.7
2.90	29.8
2.20	22.5
1.50	15.7
0.80	7.7
0.10	0.2
0.05	0.0



Tablas y figuras de las pruebas de diluciones de muestras MM09 y MM22, concentración vs  $\chi$ .

#### Susceptibilidad Magnética específica de minerales

Mineral/Material (tamaño de partícula)	Fórmula	Fe (%)	Susceptibilidad magnética específica de masa ( $10^{-6} \text{ m}^3\text{Kg}^{-1}$ )
<i>Metales ferromagnéticos</i>			
Hierro	$\alpha\text{Fe}$	100	276000
Cobalto	Co		204000
Níquel	Ni		68850
<i>Ferrimagnéticos</i>			
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	72	
(0.012-0.069 $\mu\text{m}$ )			513-1116
			500-1000
(0.09-2000 $\mu\text{m}$ )			596 +/- 77
(1-250 $\mu\text{m}$ )			440-716
			390-580
Maghemita	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	70	410, 440

			286-371
Titanomagnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$		169-290
Titanohematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{FeTiO}_3$		281-315
Pirrotita	$\text{Fe}_7\text{S}_8$		50, 53
Greigita	$\text{Fe}_3\text{S}_4$		
Antiferromagnéticos			
Hematita	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	70	1.19-1.69
			0.58-0.78
			0.49-0.65
Goethita	$\alpha\text{FeOOH}$	63	0.35, 0.38, 0.7, <1.26
Paramagnéticos (20°C)			
Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$	37	1.7, 2
Ulvoespinela	$\text{Fe}_2\text{TiO}_4$		
Olivino	$4[(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4]$	<55	0.01-1.3
Siderita	$\text{FeCO}_3$	48	1.0
Biotita	Silicato de Mg, Fe, Al	31	0.05-0.95
Piroxeno	$(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	<12	0.04-0.94
Chamosita	Clorita oxidada		0.9
Nontronita	Arcilla rica en Fe		0.863
Anfíbol	Silicato de Mg, Fe, Al		0.16-0.69
Epidota	Silicato de Ca, Fe, Al	31	0.25-0.31
Pirita	$\text{FeS}_2$	47	0.3
Lepidocrocita	$\gamma\text{FeOOH}$	63	0.5-0.75, 0.69
Proclorita	Mineral de mica		0.157
Vermiculita	Silicato complejo		0.152
Illita	$\text{KAl}_4(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$		0.15
Bentonita	Silicato complejo		0.058
Smectita	Silicato complejo		0.05, 0.027
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	30	0.03
Attapulgita	Silicato complejo		0.02
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$		0.011

Tabla de algunos minerales y su valor de susceptibilidad magnética (resumido del manual Environmental Magnetic Susceptibility, Bartington MS2 System).



## ANEXO 5. FRX vs Susceptibilidad Magnética

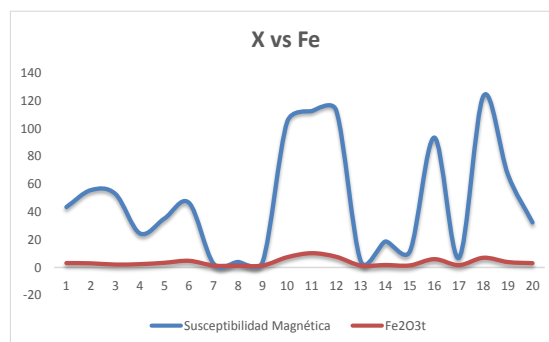
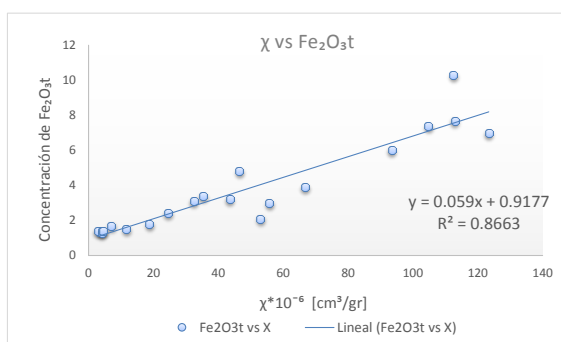
Este anexo comprende las primeras gráficas realizadas del DMOT, cuando se separó El Oro de Tlalpujahuá.

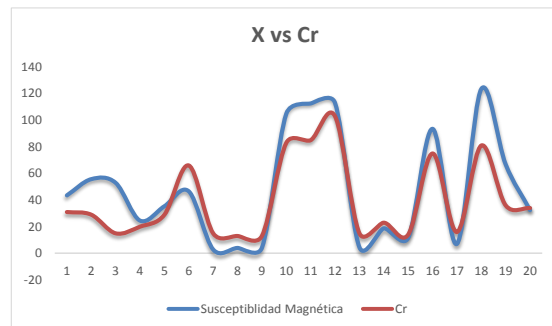
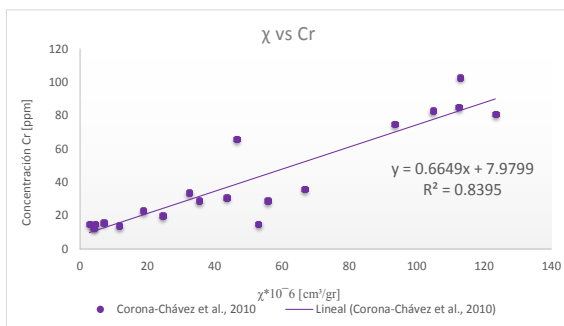
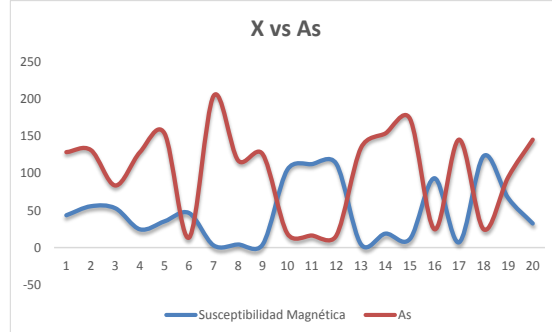
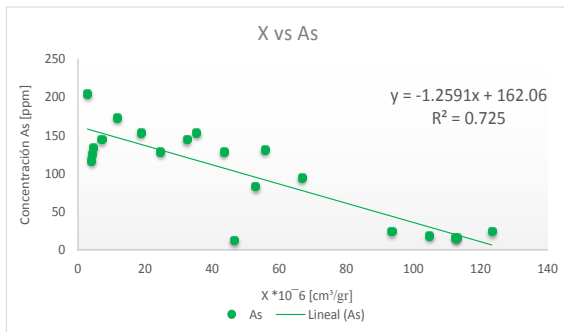
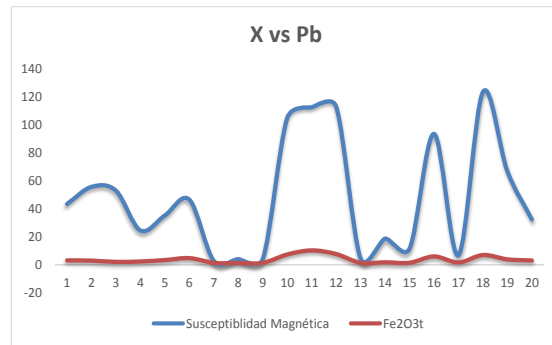
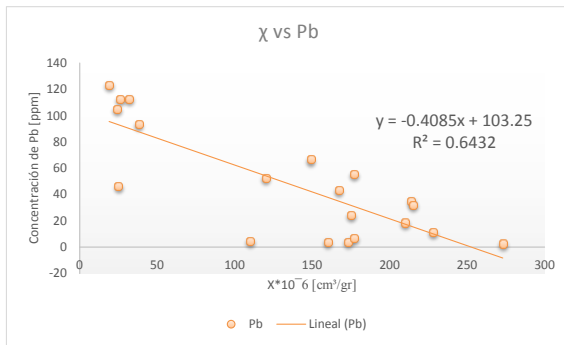
Una vez obtenidos los distintos valores de susceptibilidad y concentración de EPT's y Fe de todas las muestras, se pretende obtener las curvas de calibración para los distintos elementos, con el fin de que con el solo hecho de medir la susceptibilidad magnética  $\chi$  de las muestras en campo, se puedan determinar las regiones que podrían tener mayores concentraciones de EPT's.

### El Oro

En un principio, se realizaron los gráficos que relacionan los valores de concentración de EPT's y Fe reportados por Corona-Chávez et. al., 2010 y los obtenidos con el equipo X-Calibur (medidos en el laboratorio) para cada uno de los elementos y en cada región de estudio. Esto con el fin de ver la variación entre los datos reportados en el 2010 y los medidos en el 2013.

### Corona-Chávez et al., 2010



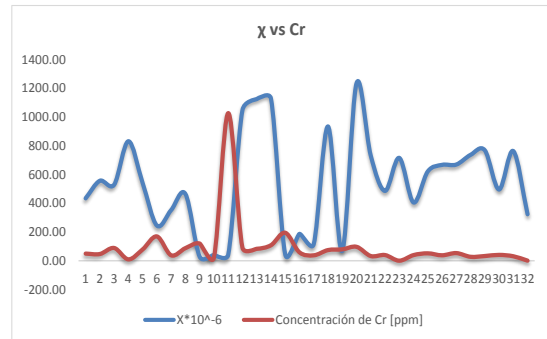
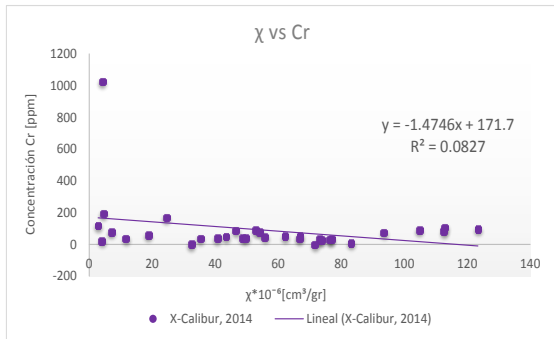
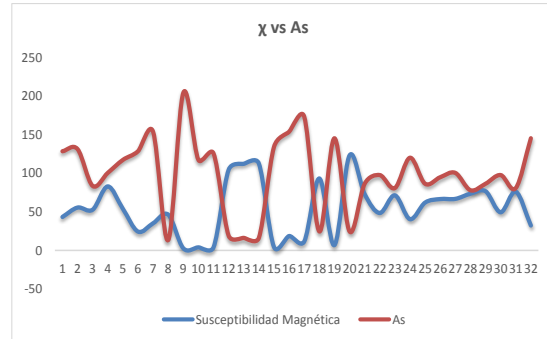
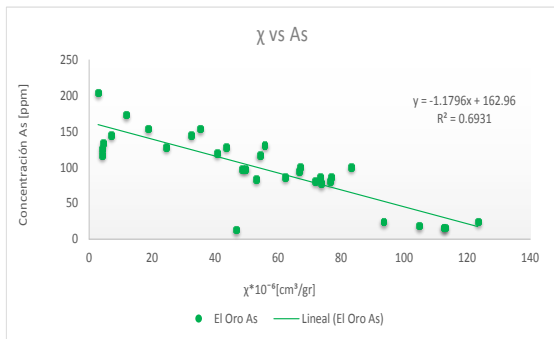
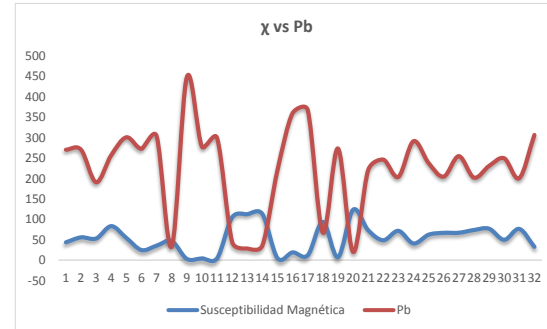
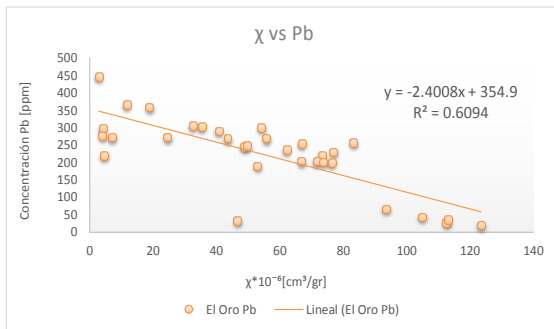
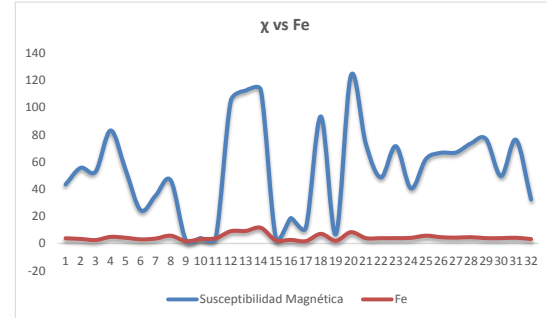
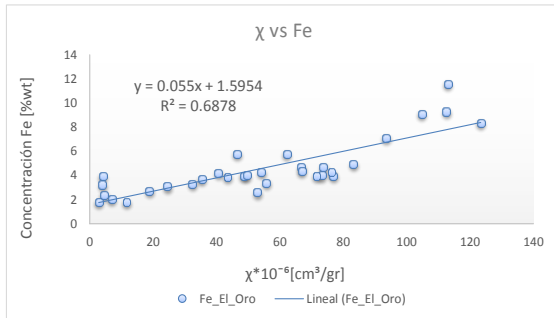


Como puede observarse en el gráfico anterior, la correlación que existe entre la susceptibilidad magnética medida y la Concentración de Pb reportada en 2010 no es tan baja. Se identificó la muestra E5H6 como la que provoca la mayor dispersión, pues removiéndola se obtiene una  $R^2=0.8009$ ; las muestras que siguen en dispersión son la E7media y la E7H3, removiéndolas se obtiene una  $R^2=0.872$ .

Se puede observar en el gráfico la correlación entre los valores de  $\chi$  y la concentración de As reportada. Como muestras más dispersas se identificaron la E5H6 y la E14H2. Removiéndolas se obtiene una  $R^2=0.8099$ .

Como puede observarse, el Cr tiene una muy buena correlación con la  $\chi$ . Las muestras un poco más dispersas son la muestra E5H6 y la E5H3, removiendo ambas, se obtiene una  $R^2=0.9232$  (gráfico de la derecha).

## X-Calibur, 2014



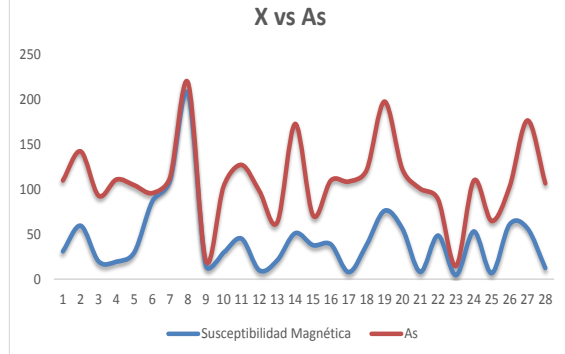
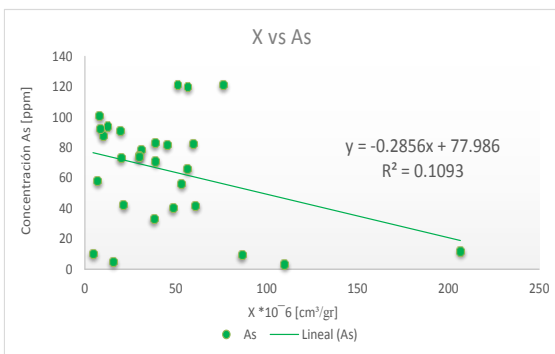
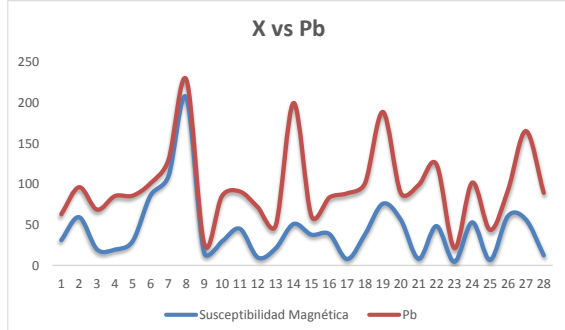
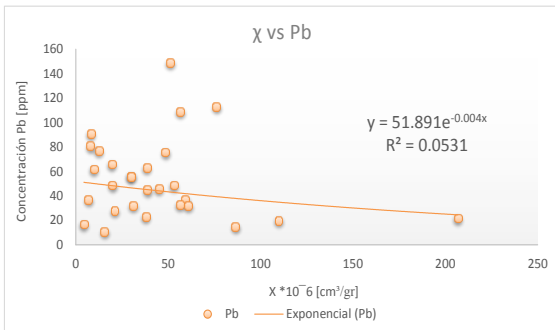
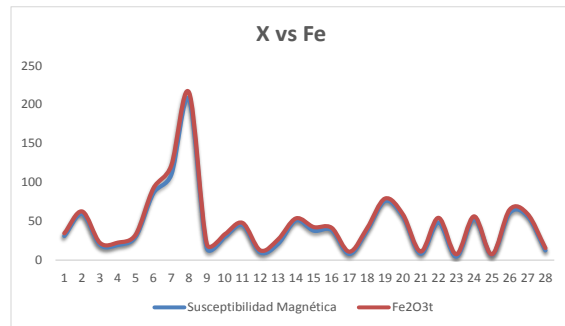
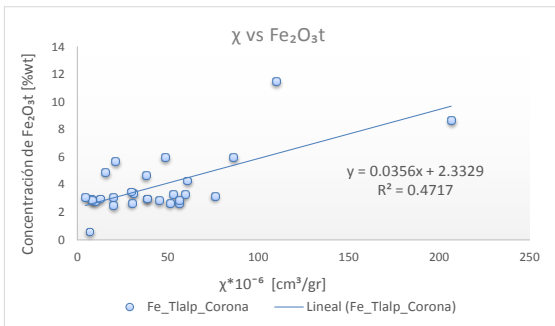
Se puede observar que la correlación entre la  $\chi$  y la concentración de Pb no es tan baja, pero si se observa la dispersión de algunas muestras en específico, tales como la E5H3B, E5H6 y E7media, removiéndolas se obtiene una  $R^2=0.8049$ .

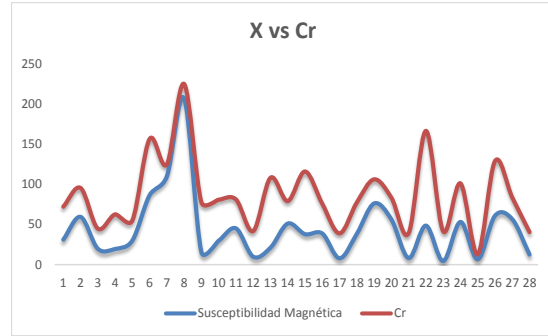
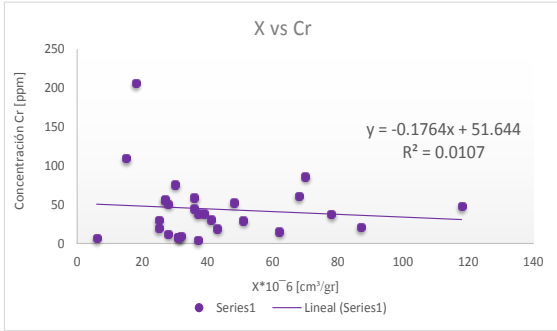
Del mismo modo que para el Pb, en el As también se eliminó la muestra E5H6 y puede observarse que la correlación mejora hasta casi  $R^2=0.8$ .

Para obtener una mejor correlación en las muestras del Cr, se eliminaron las muestras más dispersas, es decir, la muestra E5H3A, E5H3B, E5H4, E5H6, E7H3, E7H4, E8H1, E8H7 y E14H8.

## Tlalpujahua

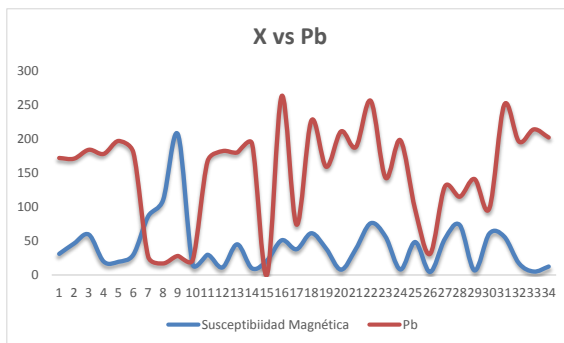
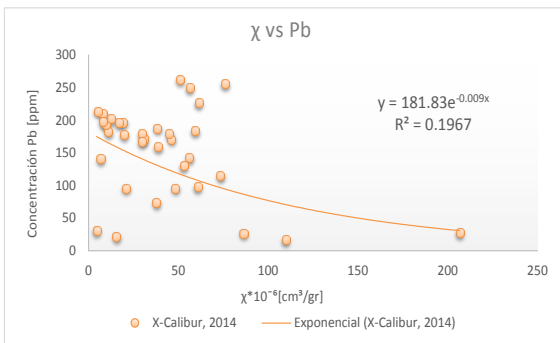
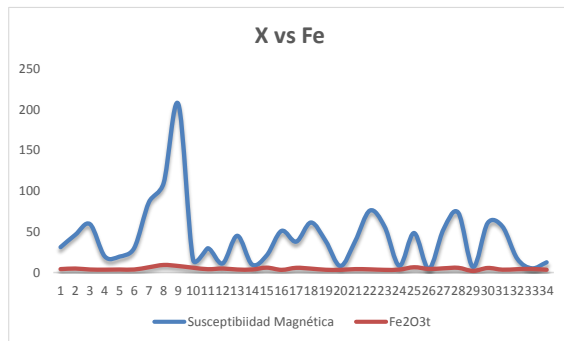
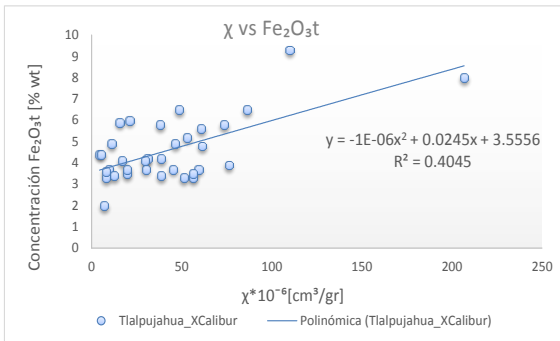
### Corona-Chávez et al., 2010

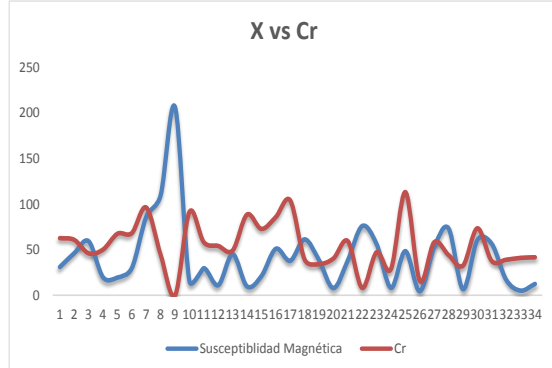
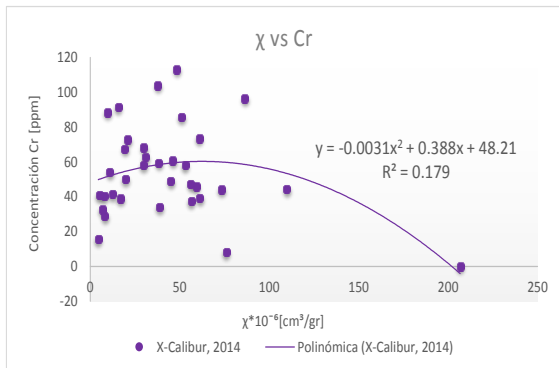
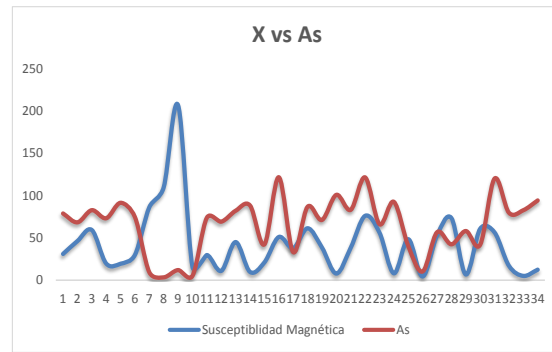
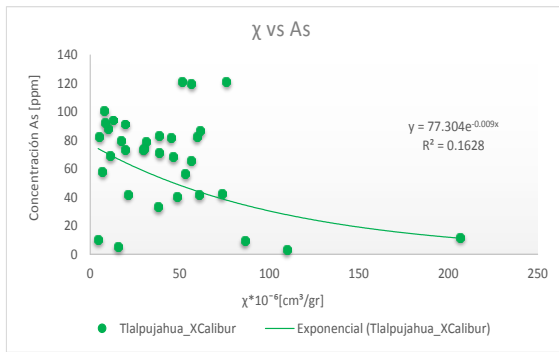




Se observa una muy mala correlación para los datos de Pb en Tlalpujahua aun removiendo algunas muestras la correlación que se obtiene sin afectar o decidir la tendencia de los datos es de  $R^2 < 2$ . De la misma manera sucede para el As y el Cr.

### X-Calibur, 2014





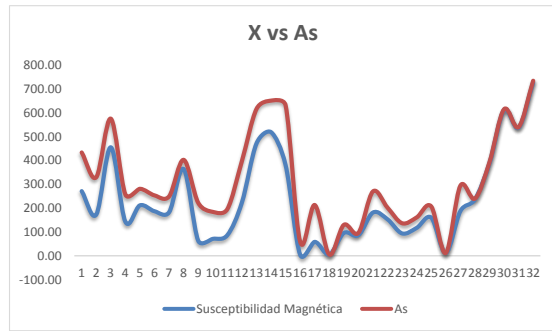
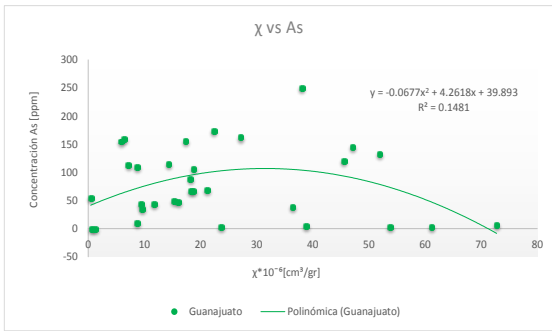
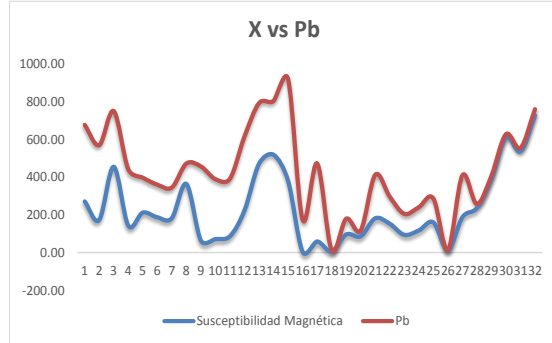
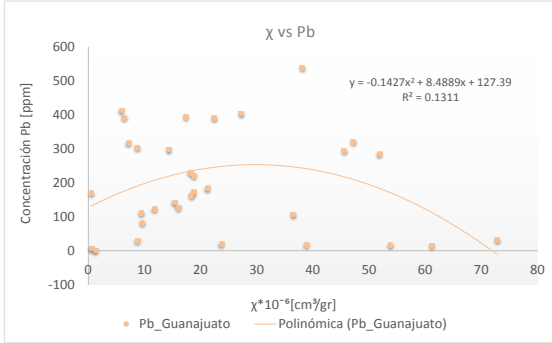
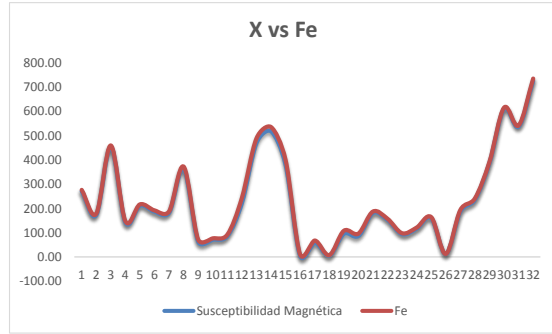
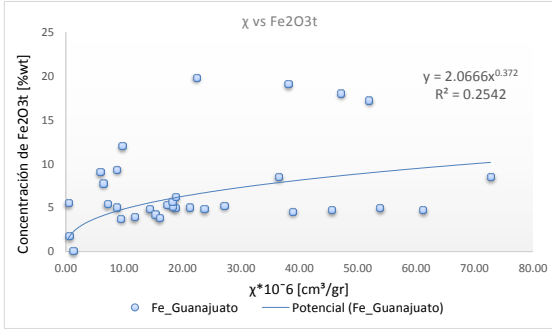
Como se puede observar en el gráfico anterior, los valores extremos de los perfiles son los problemáticos para el ajuste de la curva, esto porque se sabe que al principio de los perfiles se tiene materia orgánica o maleza y al final pues muchas veces hay arroyos o zanjas de aporte fluvial y esto deslava las bases de los perfiles aportando así otros elementos o en su defecto quitándolos, lo cual provoca alteración en la medición de ciertos elementos; por lo que las muestras que se removieron fueron la E3H7, E9H4, E10H1, E11H2, E11H6 y E13H1. Al remover estas muestras se logra tener una  $R^2=0.6165$ .

Las mismas muestras que perjudican la correlación en el Pb se observan en el As, a excepción que la muestra E3H6 también perturba al As

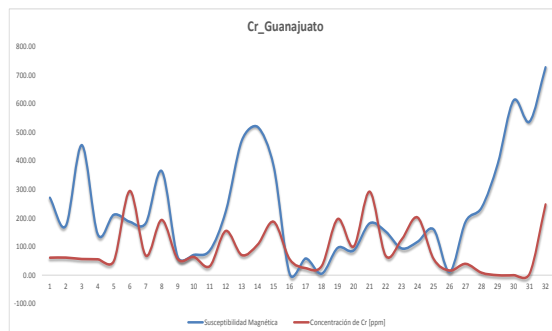
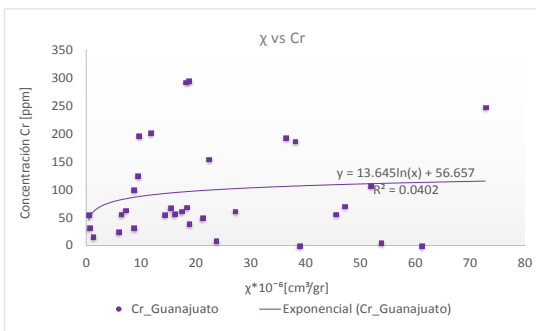
En el caso del Cr se puede observar que hay valores anómalos también en mitades de los perfiles, no solo en los extremos como en el caso del Pb y el As.

## Guanajuato

Se observa que las correlaciones entre la susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) y las concentraciones de los elementos son muy bajas.



En el caso del Cr se observa la siguiente correlación:



## ANEXO 6. Propiedades fisicoquímicas, lecturas en campo y en laboratorio.

En este apartado se comparan los valores reportados de las mediciones de pH y CE por Corona-Chávez et al., 2010 de algunas muestras del DMOT con las mediciones de esas mismas muestras hechas en laboratorio. Esto con la finalidad de ver si se reporta algún cambio por los años de almacenamiento de las muestras o alguna contaminación que hayan podido tener.

En el caso de Guanajuato, se realizaron las comparaciones entre las mediciones realizadas en laboratorio y las tomadas en campo del pH y la Conductividad Eléctrica (CE). El Eh se trabajó por separado debido a que no hay valores reportados de campo.

Las unidades de medición de la CE son [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] y las de Eh son [mV].

### DMOT

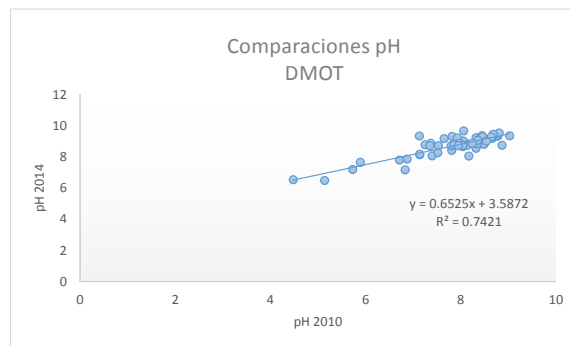


Figura 4.3 Comparaciones de las lecturas de pH reportadas por Corona-Chávez et al., 2010 vs las lecturas obtenidas en el laboratorio (2014).

Para el DMOT la correlación entre los datos reportados por Corona-Chávez et al., y los medidos en laboratorio de las mismas muestras, es bastante aceptable para el pH; sin embargo en el caso de la CE, no existe correlación entre las mediciones.

### Guanajuato

En el caso de este distrito se tienen lecturas hechas en campo contra las cuales se pueden comparar las mediciones hechas en laboratorio. No son muchas pero debe tomarse en cuenta que las



mediciones corresponden a las distintas localidades de muestreo, no pertenecen solo a una localidad en específico ni a un mismo perfil.

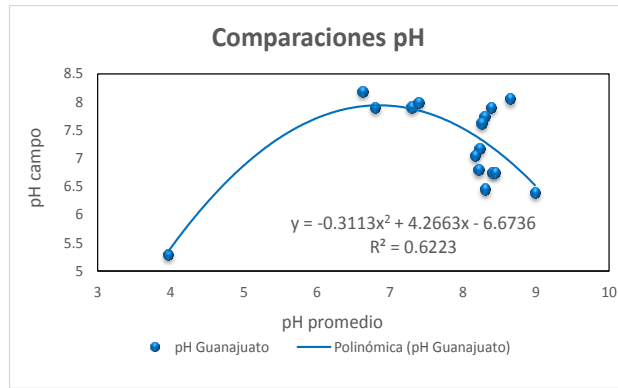


Figura de las comparaciones de las lecturas de pH de campo vs las lecturas obtenidas en el laboratorio.

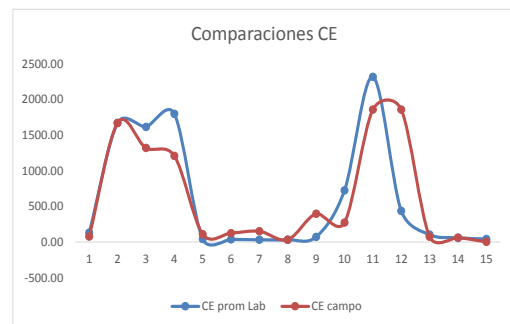
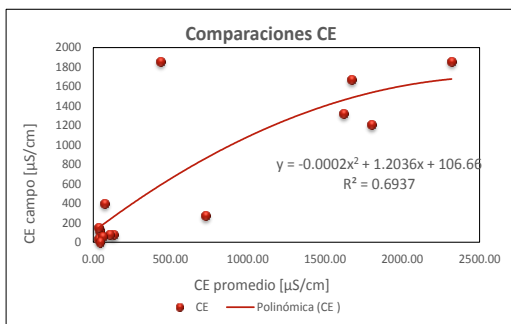


Figura 4.5 Comparaciones de CE del distrito de Guanajuato.

Se debe mencionar que se eliminó la muestra H5M3 correspondiente a La Valenciana, debido a que la medida de la CE se sobresaturó en campo (>3999 mV) e incluso la medida en laboratorio dio un valor de 21853.33, lo cual es muy alto. Al eliminar la muestra, la correlación mejoró mucho.

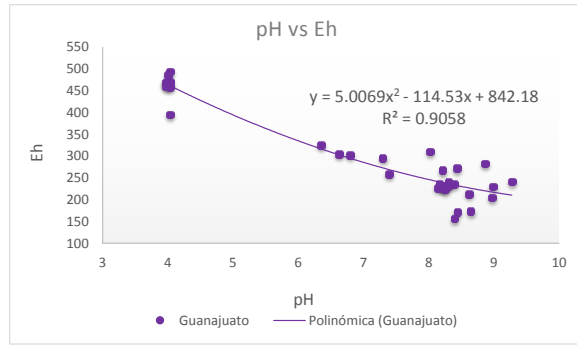


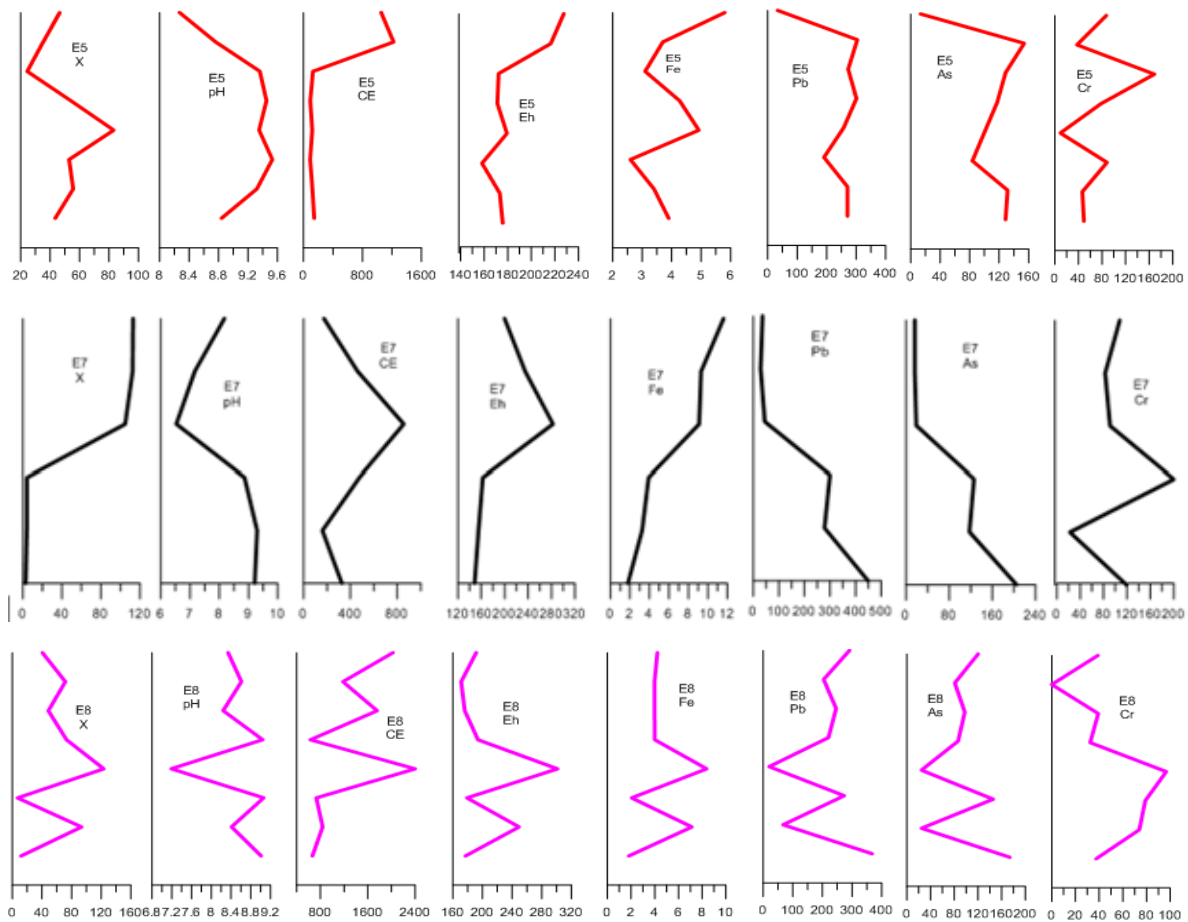
Figura 4.6 Correlación entre el pH y el Eh.

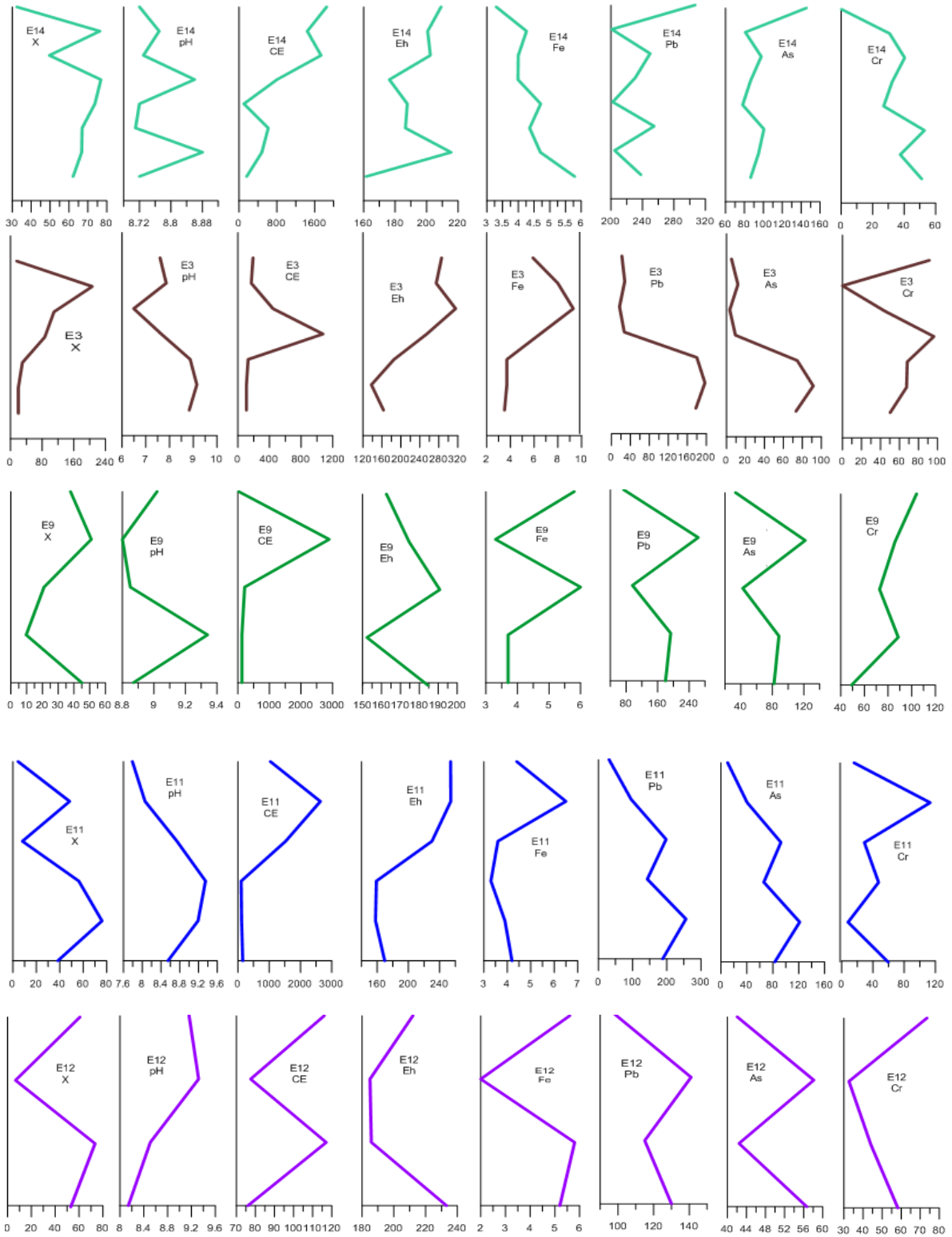
La relación pH-Eh solo pudo realizarse en el distrito de Guanajuato (figura 4.6), pues en el DMOT no se tomaron lecturas de Eh. Sobre todo, esta medición se realizó para corroborar en tiempo real que los datos leídos en el laboratorio con los pHímetros eran correctos.

## ANEXO 7. Distribución de EPT's y propiedades fisicoquímicas en perfiles

Se realizaron gráficos representativos de la distribución de EPT's y propiedades físico-químicas en los perfiles formados por un mínimo de cuatro muestras de ambos distritos. Esto, con el fin de conocer la distribución de estas propiedades en relación a la profundidad en cada perfil, así como, la relación que presentan estas propiedades en un mismo horizonte en relación a horizontes en un mismo nivel pertenecientes a los distintos perfiles.

### DMOT





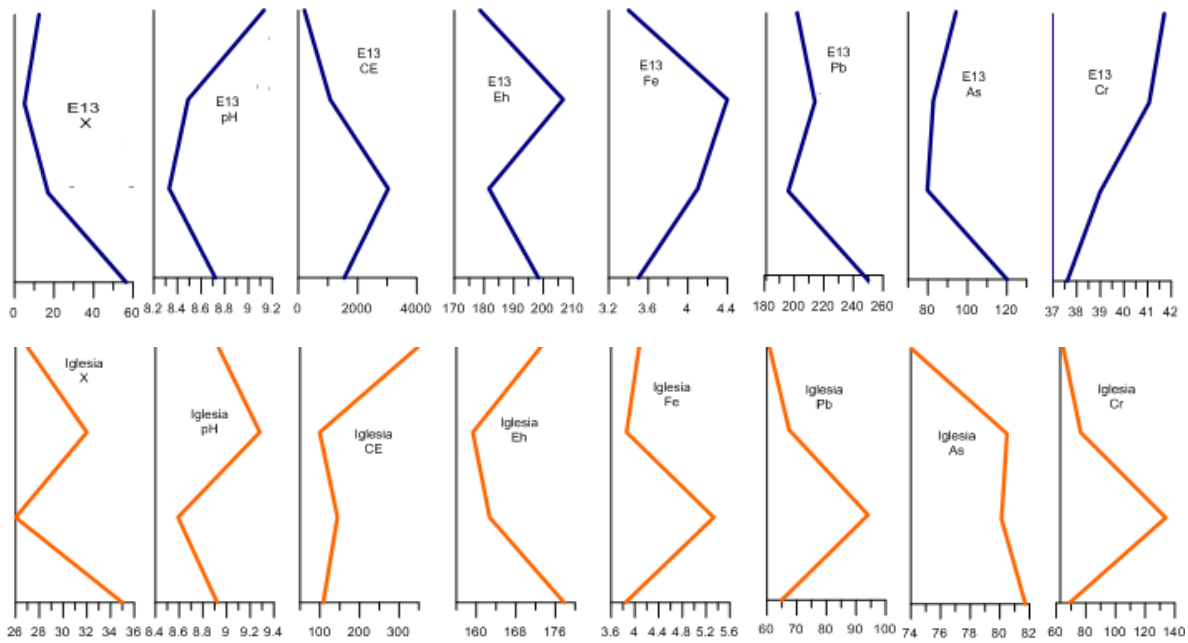


Figura 4.7 Relación de las distintas propiedades fisicoquímicas y  $\chi$  en cada muestra con relación a la profundidad en el DMOT.

Se observa que para la mayoría de las muestras en cada perfil, el Pb y el As muestran una relación directa, sus gráficas son prácticamente idénticas; mientras que ambos elementos presentan una relación inversa con respecto al Fe, a excepción de las muestras tomadas en la iglesia.

Al relacionar la  $\chi$  con la cantidad de Fe, se observa que en las estaciones E7, E8, E3, E12 muestran una relación directa en la mayoría de las muestras a lo largo de sus perfiles, mientras que en las estaciones E5, E14, E9, E11, E13 y en la Iglesia la relación entre la  $\chi$  y el Fe es inversa en la mayor parte de estos perfiles.

La tendencia general es que a mayor  $\chi$ , mayor Fe y menos As y Pb, sin embargo, hay casos en los que estas relaciones no se cumplen.

## Guanajuato

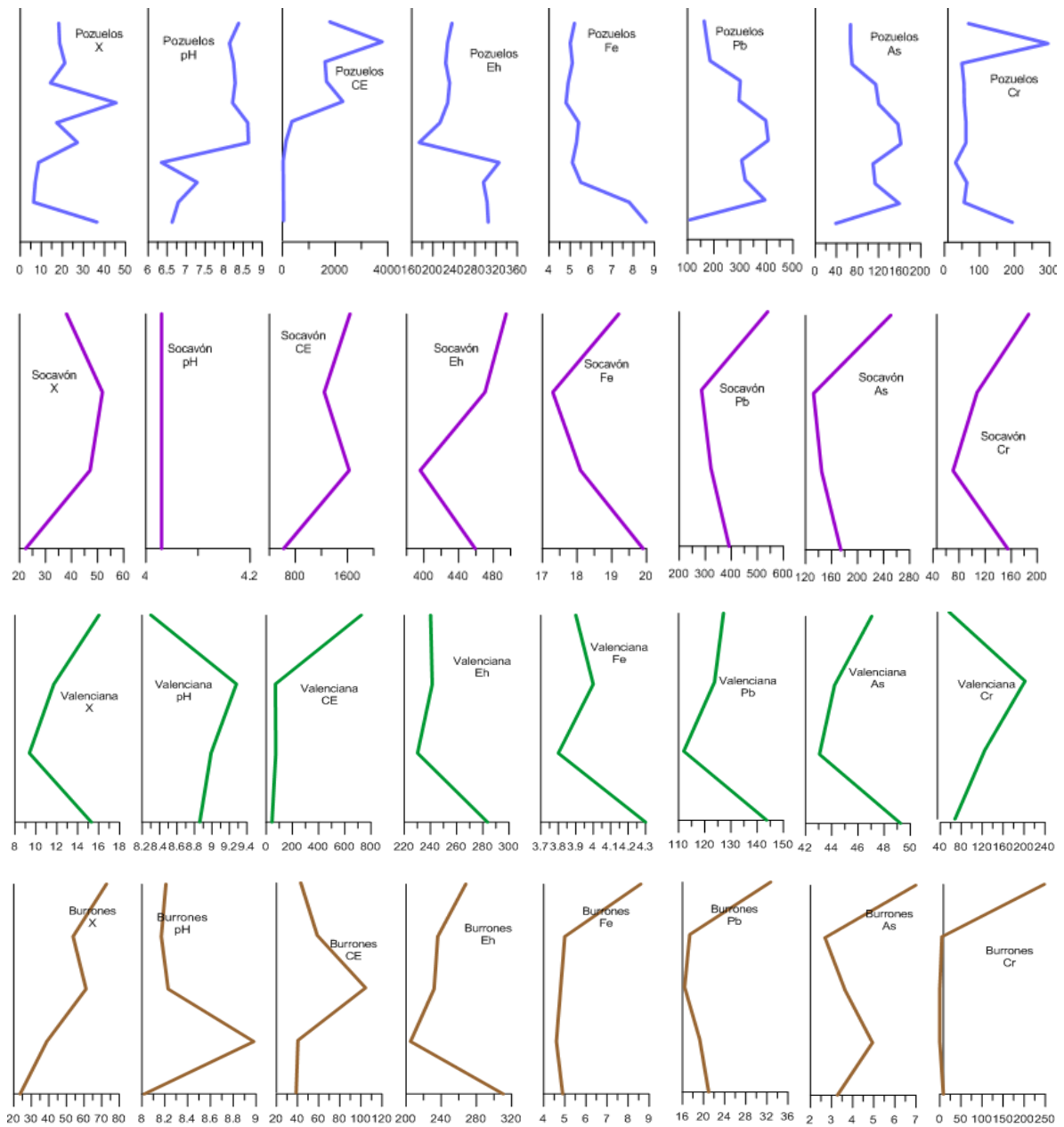


Figura 4.8 Relación de las distintas propiedades fisicoquímicas y  $\chi$  en cada muestra con relación a la profundidad en Guanajuato.

De la misma manera que en el DMOT, en el distrito de Guanajuato se observan gráficas prácticamente iguales para el Pb y el As. Sin embargo, en este distrito ambos elementos con respecto al Fe presentan una relación inversa solo en la localidad de Pozuelos, y directa en las otras tres localidades.

Al relacionar la  $\chi$  y el contenido de Fe, se observa que la relación es inversa en la mayor parte del perfil del Socavón, y directa en la mayoría de las muestras de los perfiles de La Valenciana, Burrones y Pozuelos.

Igual que en el DMOT la tendencia general es que a mayor  $\chi$  más Fe, sin embargo en las muestras del socavón de la mina San Ignacio puede observarse como ésta relación es totalmente inversa; lo cual, propone que quizás las fases minerales presentes en las muestras alteren los resultados enmascarando el valor de la susceptibilidad magnética. La FRX reporta el Fe total en la muestra, pues  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es por comodidad para reportar el Fe en estos estudios, más no da detalles de fases minerales presentes; mientras que la  $\chi$  puede verse afectada por estas fases.

## ANEXO 8. Gráficos 3D

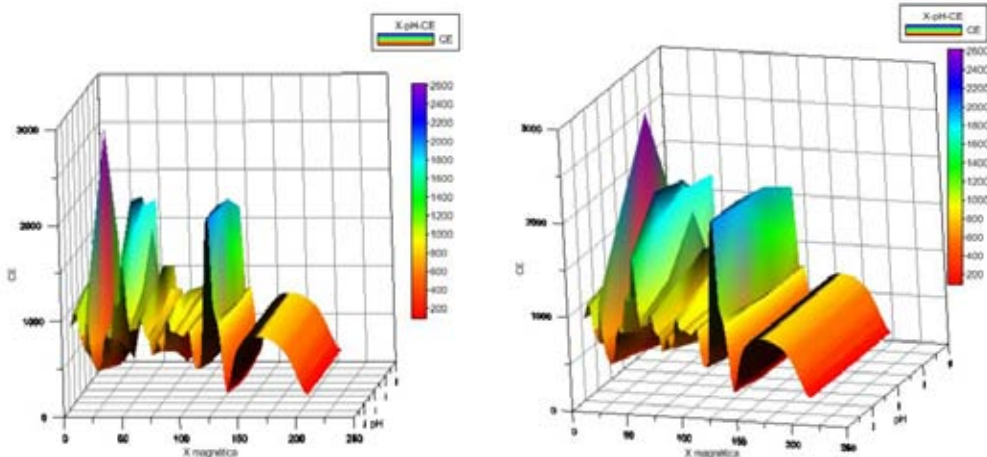
A continuación se presentan correlaciones en 3D  $\chi$ -pH con cada uno de los elementos y las propiedades fisicoquímicas. Como se pudo observar en el análisis multivariado, en el caso del DMOT el pH se relaciona con el Pb y el As, además del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con un nivel de significancia del 95%, mientras que en Guanajuato esto se cumple para el As y el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; el Cr no presenta este nivel de significancia pero es una propiedad útil y fácil de medir directamente en campo.

Las gráficas 3D realizadas posteriormente, relacionan la  $\chi$  y el pH, con la finalidad de reconocer los rangos de  $\chi$  pertenecientes a las muestras, y tener una idea del grado de acidez o alcalinidad de los mismos.

En algunos casos los gráficos 3D en las rejillas no eran tan claros y se procedió a realizar una interpolación por el método de Kriging con el fin de identificar una tendencia de los valores más altos de las mediciones de propiedades físico-químicas o de las concentraciones por FRX, igualmente relacionando la  $\chi$ -pH-mediciones.

### DMOT

#### $\chi$ -pH-CE



Figuras 4.9 Relación  $\chi$ -pH-CE para el DMOT.

Se observa que el mayor pico de la CE está relacionado a un pH 7-8. Sin embargo, los valores más altos de CE no presentan una tendencia muy clara en relación al pH.



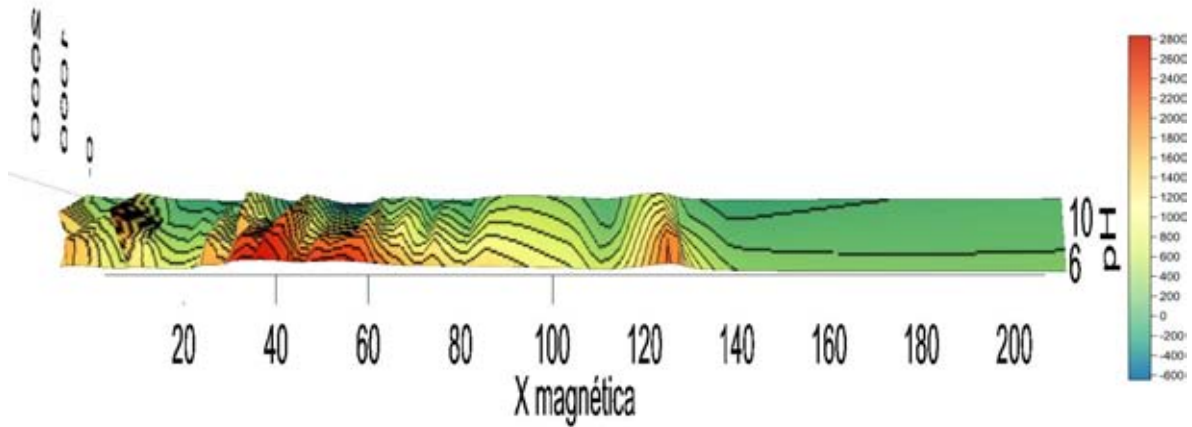


Figura 4.10 Interpolación de los valores de  $\chi$ , pH y CE para el DMOT.

En este gráfico puede observarse que los picos de la CE se encuentran en  $\chi \sim 20, 50, 120$ . Algunos valores intermedios de CE se relacionan a valores de  $\chi < 25, 40-75$ . En este gráfico si es posible observar que las mayores CE corresponden a niveles bajos de pH.

#### $\chi$ -pH-Eh

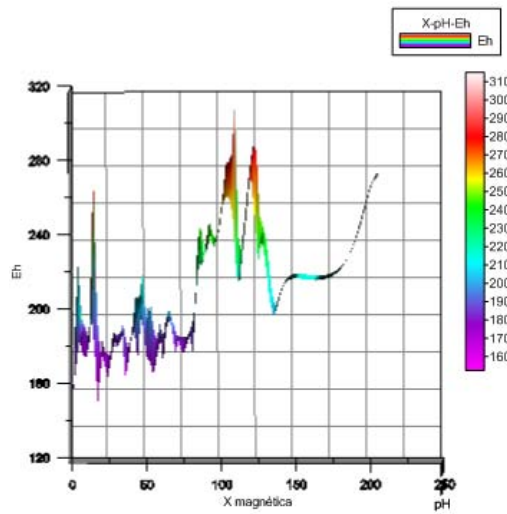


Figura 4.11 Relación  $\chi$ -pH-Eh para el DMOT.

Como puede observarse los valores altos de pH corresponden a los valores altos de Eh al igual que la localización de la máxima concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

## $\chi$ -pH-Fe

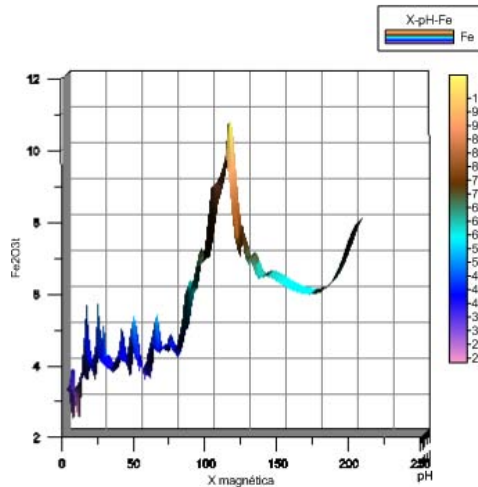


Figura 4.12 Relación  $\chi$ -pH-Fe para el DMOT.

Como se puede observar, la concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$  presenta dos picos principales de concentración los cuales se encuentran relacionados a una  $\chi$  entre 100-125 y el segundo pico con una  $\chi > 200$  con tendencia creciente.

Se puede observar que en general con una  $\chi > 100$  se tienen valores de concentración del Fe  $> 6$  [%wt].

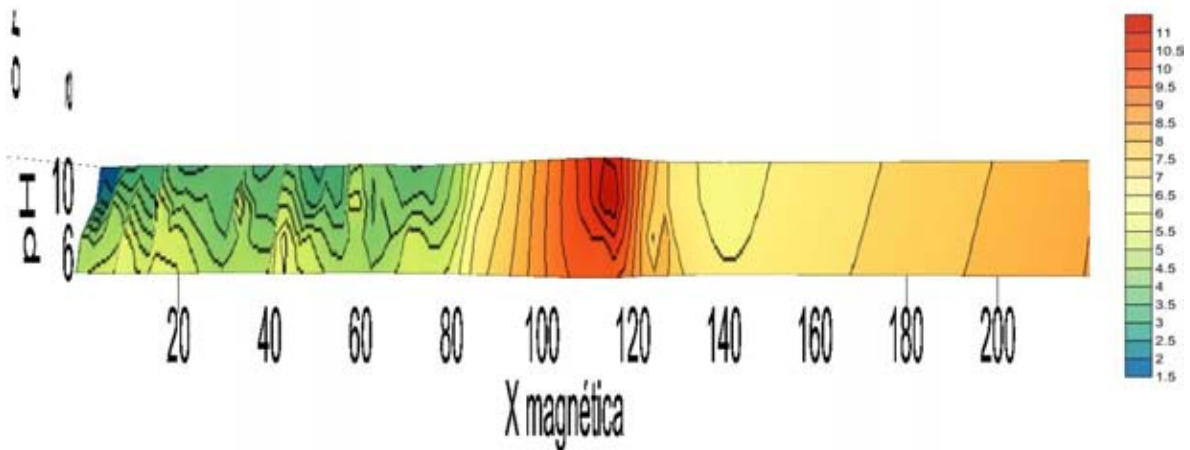


Figura 4.13 Interpolación de los valores de  $\chi$ , pH y Fe para el DMOT.

De manera general, se observa una tendencia general que a mayor pH, mayor contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$  y mayor  $\chi$ . Sin embargo, se tiene un pico aproximadamente en  $\chi \sim 125$ , el cual, provoca una incoherencia en los datos posteriores, pues a mayor susceptibilidad, menor cantidad de hierro. Esto se explicará con las fases del hierro en las curvas termomagnéticas y de histéresis del apartado 4.8.

Puede observarse que el pH no tiene una tendencia clara en relación a la concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

## Guanajuato

### $\chi$ -pH-CE

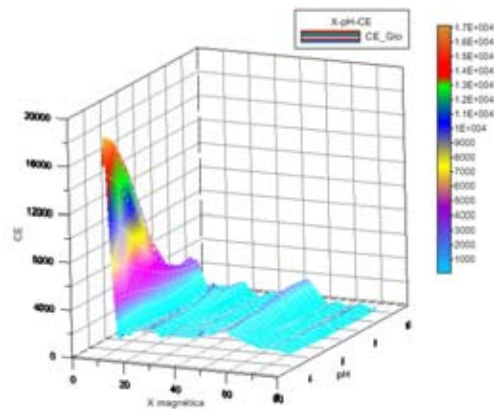


Figura 4.21 Relación  $\chi$ -pH-CE para el distrito de Guanajuato.

Se observa que las CE más altas están asociadas a valores muy bajos de  $\chi$  y pH ácido.

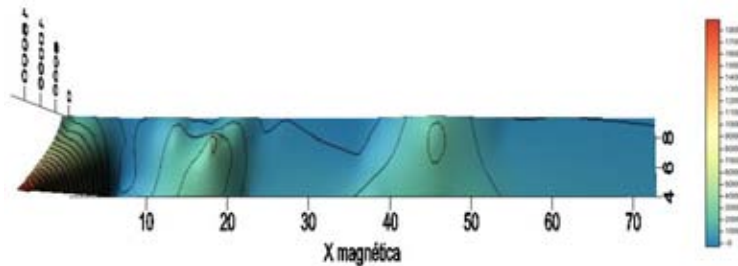


Figura 4.22 Interpolación de los valores de  $\chi$ , pH y CE para el distrito de Guanajuato.

Se observa que los picos de la CE se encuentran relacionados a valores de  $\chi < 5$  (mayor pico),  $10 > \chi \sim 20$ ,  $40 > \chi < 50$ . Por otro lado, se observa que aunque la mayor CE está asociada a un pH ácido, en general, esta propiedad no presenta una tendencia muy definida en relación con la CE.

### $\chi$ -pH-Eh

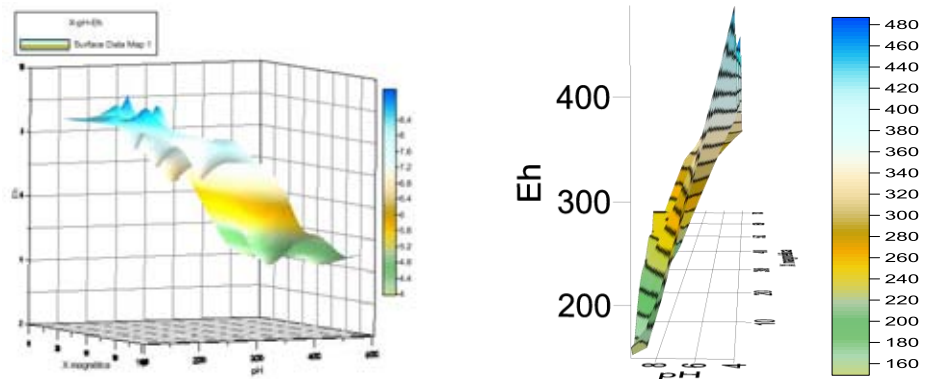


Figura 4.23 Relación  $\chi$ -pH-Eh para el distrito de Guanajuato.

Se observa que se mantiene la relación inversa ente el pH y el Eh.

### $\chi$ -pH-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t

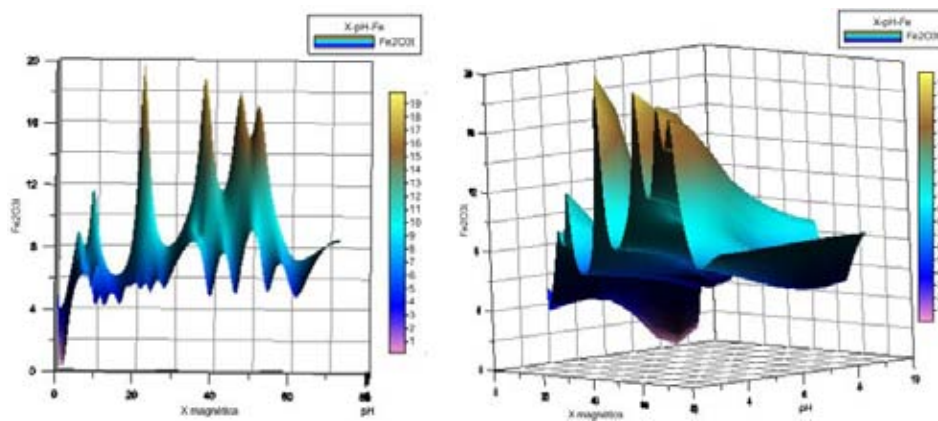


Figura 4.30 Relación  $\chi$ -pH-Fe para el distrito de Guanajuato.

Se muestra que al tener un pH bajo y  $15 > \chi < 55$  se presentan altas concentraciones de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t.

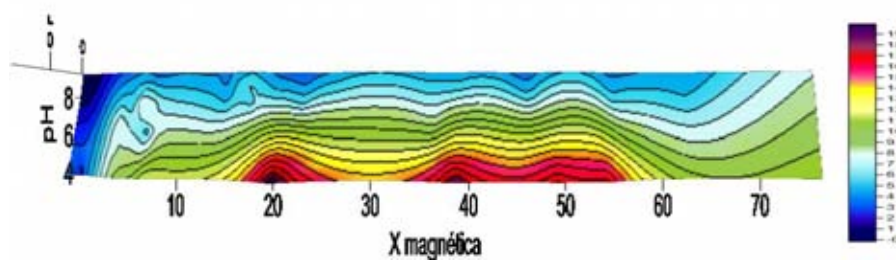


Figura 4.31 Interpolación entre los valores de  $\chi$ , pH y Fe para el distrito de Guanajuato.

Se observa que la concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tiene una fuerte relación con pH bajo:  $\text{pH} \sim 4$ . Se observa que la concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  está relacionada a intervalos de  $\chi$ :  $15 > \chi < 25$ ,  $35 > \chi < 55$ .

Se puede observar que la región de interés tiene un comportamiento similar a la misma región en el DMOT, sólo que en Guanajuato el rango de susceptibilidad no es tan grande como en el DMOT. Para dar explicación a estas variaciones de  $\chi$  vs la concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se llevaron a cabo algunas curvas de histéresis y termomagnéticas, reportadas en el apartado 4.8.

En el caso del distrito minero de Guanajuato, se observó que al igual que en el caso del DMOT el pH no sería decisivo en la búsqueda de las máximas concentraciones de los 3 EPT's, sin embargo, en este distrito la concentración de Pb y As si están asociados a pH ácidos.

## ANEXO 9. Curvas de histéresis y termomagnéticas

Se utilizó el equipo Advanced Variable Field Translation Balance (figura \_\_) para realizar las curvas de histéresis y termomagnéticas de algunas muestras escogidas en base a la distribución de EPT's en los perfiles de ambos distritos mineros (Guanajuato y DMOT) y en su dispersión en las relaciones  $\chi$  vs Fe.

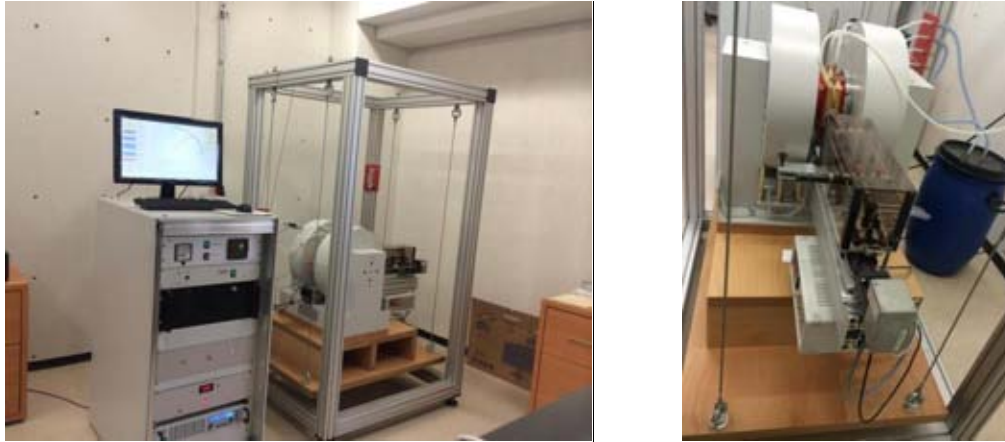


Figura \_\_ Balanza de Curie utilizada en el laboratorio para la obtención de las curvas de esta sección.

Para la obtención de las curvas de histéresis, termomagnéticas y de IRM, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

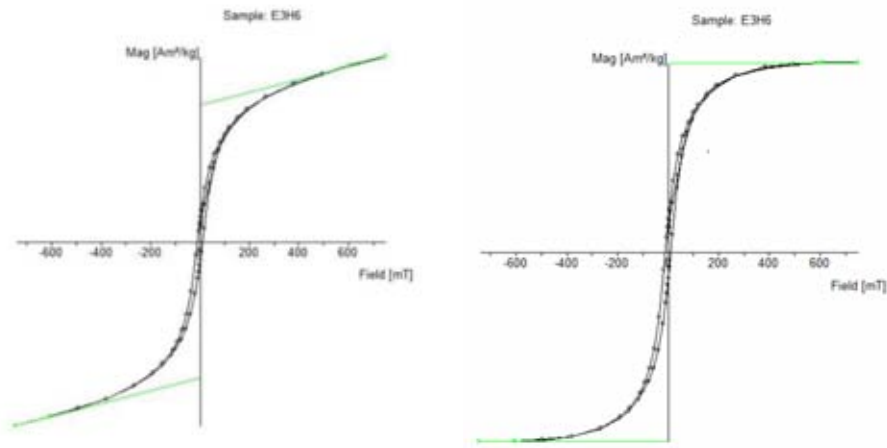
- a) Con las mismas alícuotas de las muestras molidas de los jales medidas anteriormente (FRX, análisis fisicoquímicos y medición de la  $\chi$ ) se trabajó en la obtención de las curvas termomagnéticas en todos los casos, además de las curvas de histéresis e IRM para casos específicos indicados en el capítulo 4.
- b) Se colocó muestra en el contenedor (porta muestras) de la balanza de Curie hasta aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de su capacidad. Posteriormente, se cubría la parte superficial del contenedor colocando un pedazo pequeño de fibra de vidrio como si fuese una especie de tapa.
- c) Se colocaba la muestra dentro de la cámara contenedora para posteriormente internarla en la balanza de Curie y colocarla entre las bobinas.
- d) Se programa en el software del equipo las curvas a ser obtenidas y se procedía a la medición. Primeramente se utilizaron temperaturas hasta los 700°C pero al ver que el comportamiento era similar, se midió hasta aproximadamente los 600°C, esto debido a que

cualquier cambio de fase mineral se notaría sin importar que la temperatura fuera menor al de la hematita por ejemplo. El campo aplicado varió entre las 18 y 19 mT.

- e) Una vez terminada la medición, se revisaron las curvas obtenidas en el software Analyzer.exe y se imprimieron los resultados.

**DMOT**

**E3H6.** Esta muestra presenta la  $\chi$  más alta ( $206.7 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{gr}$ ) y alto Fe (8 %wt).



View Options

View all plots  show standard deviation

IRM curve  Set1  Set2  Set3  Set4  IRM Analysis

Backfield curve  Set1  Set2  Set3  Set4  Backfield Analysis

Hysteresis loop  Set1  Set2  Set3  Set4  Hysteresis Analysis

Thermomagnetic curve  Heating/Cooling  Heating cycle  Cooling cycle  Curve Analysis

RMP Analysis

View

Thermomagnetic curve analysis

use Running Average  second derivative  Moskowitz (1981)

Calculate Tc  use Tc(1)  use Tc(2)  use Tc(3)  use Tc(4)

534 °C recal: Tc(1)  
174 °C recal: Tc(2)  
54 °C recal: Tc(3)

Results

Hysteresis Loop: [T: 25°C]  
Ms: 4.75e-007 Am²/kg. Ms: 7.15e-008 Am²/kg. Bc: 9.74 mT. Bh: 34.73 mT  
para/diamagnetic slope: 2.27e-010 Am²/kg per mT  
Shape parameter: 0.89 (got belled)  
Ratio: Ms/Ms: 0.15

Thermomagnetic Curve: [Field: 19 mT]  
estimated diamagnetic contribution: 0.000000 Am²/kg  
Tc (Heating cycle): 534°C 174°C 94°C

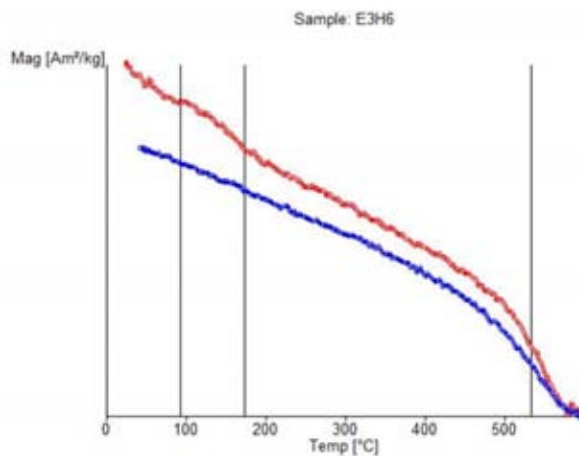


Figura 4.38 Curvas de histéresis y termomagnética para la muestra E3H6 del DMOT.

E7H7. Esta muestra presenta alta  $\chi$  (112.9) y el Fe (11.6) más alto de las muestras del DMOT.

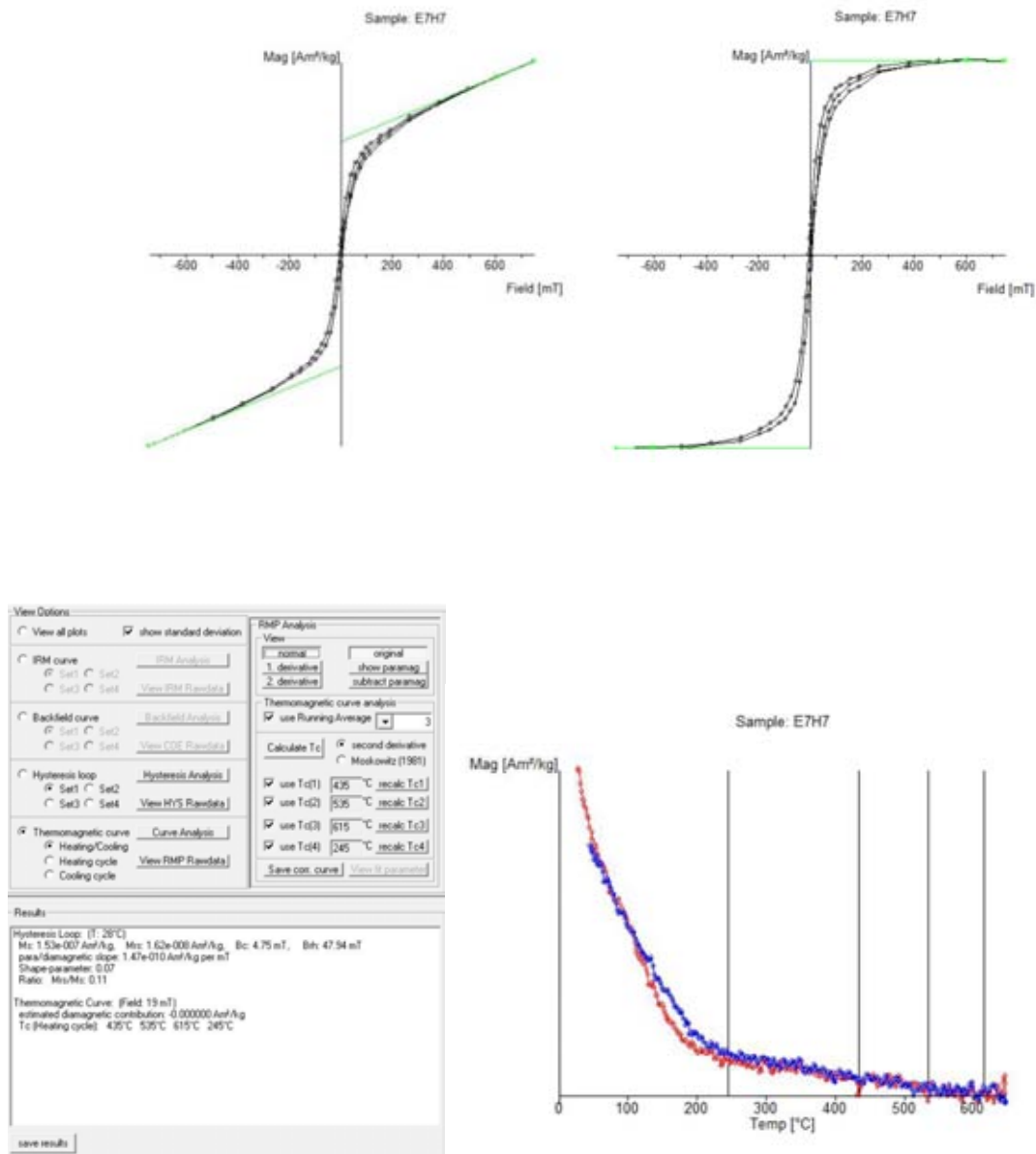
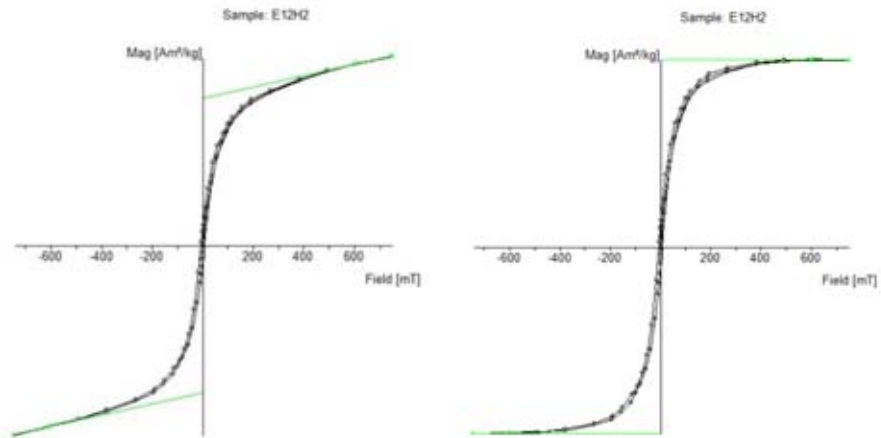


Figura 4.39 Curvas de histéresis y termomagnética para la muestra E7H7 del DMOT.



**E12H2.** Muestra ubicada dentro de la tendencia de la mayoría de los datos;  $\chi$  (72.4) baja y contenido bajo de Fe (5.8).



View Options

View all plots  show standard deviation

IPM curve  Set1  Set2  Set3  Set4  Set5  Set6  Set7  Set8  Set9  Set10  Set11  Set12  Set13  Set14  Set15  Set16  Set17  Set18  Set19  Set20  Set21  Set22  Set23  Set24  Set25  Set26  Set27  Set28  Set29  Set30  Set31  Set32  Set33  Set34  Set35  Set36  Set37  Set38  Set39  Set40  Set41  Set42  Set43  Set44  Set45  Set46  Set47  Set48  Set49  Set50  Set51  Set52  Set53  Set54  Set55  Set56  Set57  Set58  Set59  Set60  Set61  Set62  Set63  Set64  Set65  Set66  Set67  Set68  Set69  Set70  Set71  Set72  Set73  Set74  Set75  Set76  Set77  Set78  Set79  Set80  Set81  Set82  Set83  Set84  Set85  Set86  Set87  Set88  Set89  Set90  Set91  Set92  Set93  Set94  Set95  Set96  Set97  Set98  Set99  Set100

Backfield curve  Set1  Set2  Set3  Set4  Set5  Set6  Set7  Set8  Set9  Set10  Set11  Set12  Set13  Set14  Set15  Set16  Set17  Set18  Set19  Set20  Set21  Set22  Set23  Set24  Set25  Set26  Set27  Set28  Set29  Set30  Set31  Set32  Set33  Set34  Set35  Set36  Set37  Set38  Set39  Set40  Set41  Set42  Set43  Set44  Set45  Set46  Set47  Set48  Set49  Set50  Set51  Set52  Set53  Set54  Set55  Set56  Set57  Set58  Set59  Set60  Set61  Set62  Set63  Set64  Set65  Set66  Set67  Set68  Set69  Set70  Set71  Set72  Set73  Set74  Set75  Set76  Set77  Set78  Set79  Set80  Set81  Set82  Set83  Set84  Set85  Set86  Set87  Set88  Set89  Set90  Set91  Set92  Set93  Set94  Set95  Set96  Set97  Set98  Set99  Set100

Thermomagnetic curve  Heating/Cooling  Heating cycle  Cooling cycle

RMP Analysis

View

normal  original

1. derivative  show paramag

2. derivative  subtract paramag

Thermomagnetic curve analysis

use Running Average  11

Calculate Tc

second derivative

Moskowitz (1981)

use Tc(1)  541 °C ascab 1.51

use Tc(2)  211 °C ascab 1.52

use Tc(3)

use Tc(4)

Results

Hysteresis Loop (T: 25°C)

Ms: 1.35e-007 Am²/kg, Ms: 1.45e-008 Am²/kg, Sc: 5.76 mT, Sls: 31.89 mT

para/ferromagnetic slope: 5.27e-011 Am²/kg per mT

Shape parameter: 0.49 (not bellied)

Ratio: Ms/Ms: 0.11

Thermomagnetic Curve (Field: 19 mT)

Tc (Heating cycle): 541°C 211°C

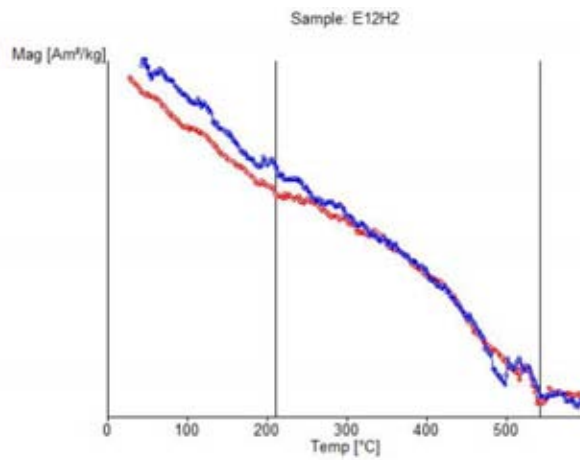


Figura 4.40 Curvas de histéresis y termomagnética para la muestra E12H2 del DMOT.

**E8H8.** Muestra perteneciente a la tendencia central de los datos con baja  $\chi$  de  $40.6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{gr}$ , y baja concentración de Fe de 4.22 %wt.

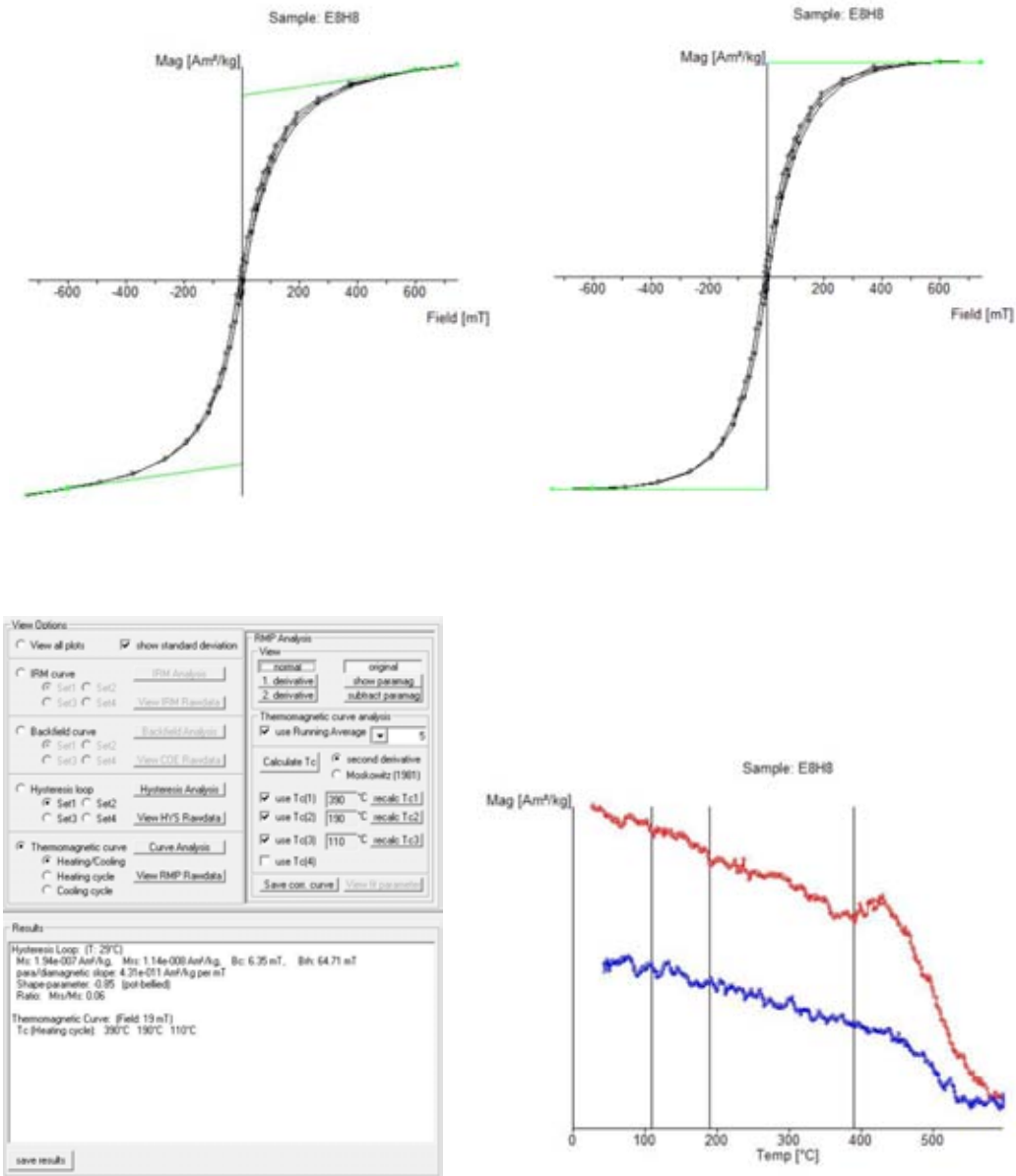


Figura 4.41 Curvas de histéresis y termomagnética para la muestra E8H8 del DMOT.

## GUANAJUATO

**H4M1.** Muestra anómala en el distrito de Guanajuato, presenta baja  $\chi$  (22.35) y el Fe más alto (19.9).

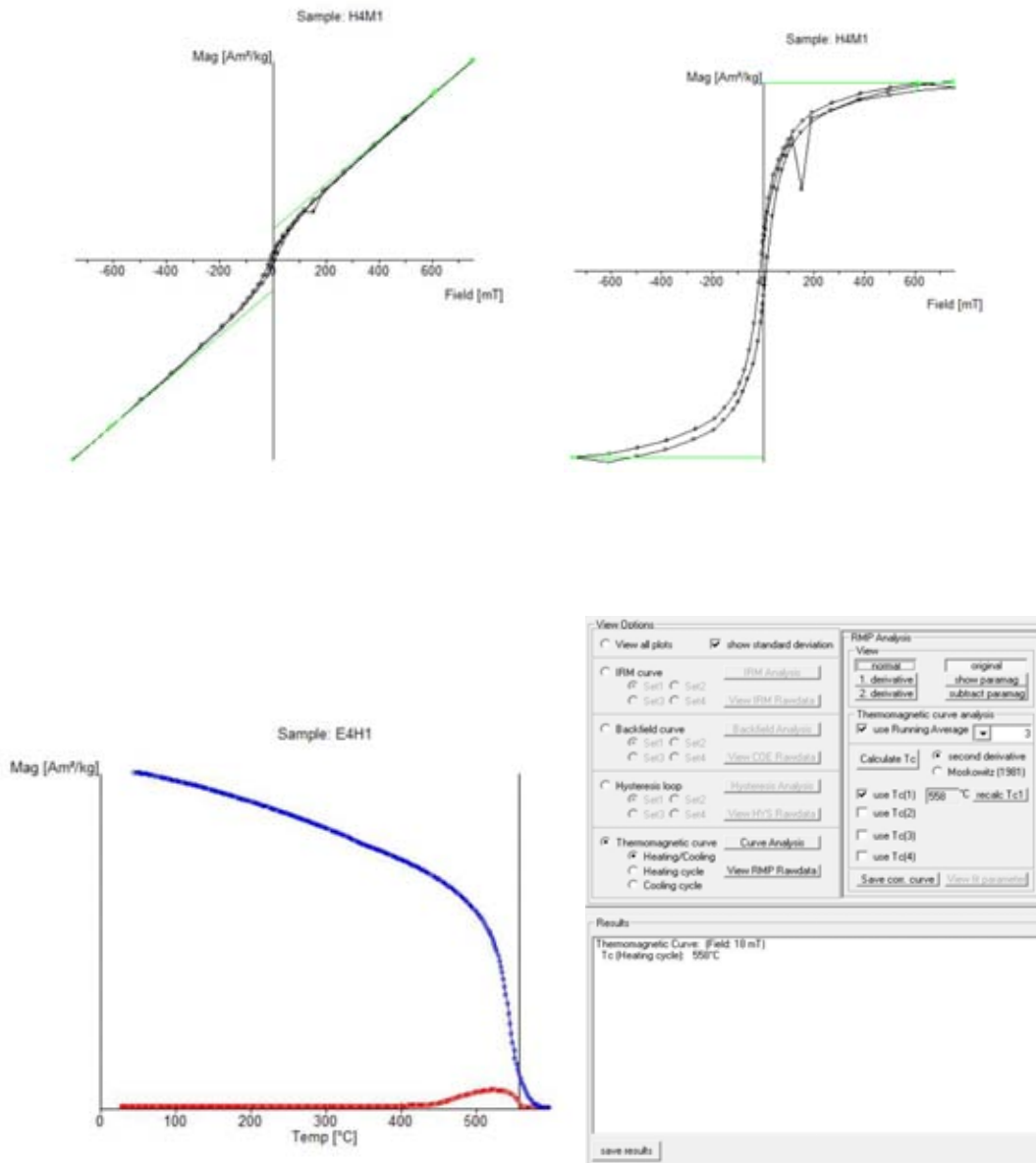


Figura 4.42 Curvas de histéresis y termomagnética para la muestra E4H1 de Guanajuato.

H4M3. Muestra que  $\chi$  media (51.86) y alto Fe (17.3).

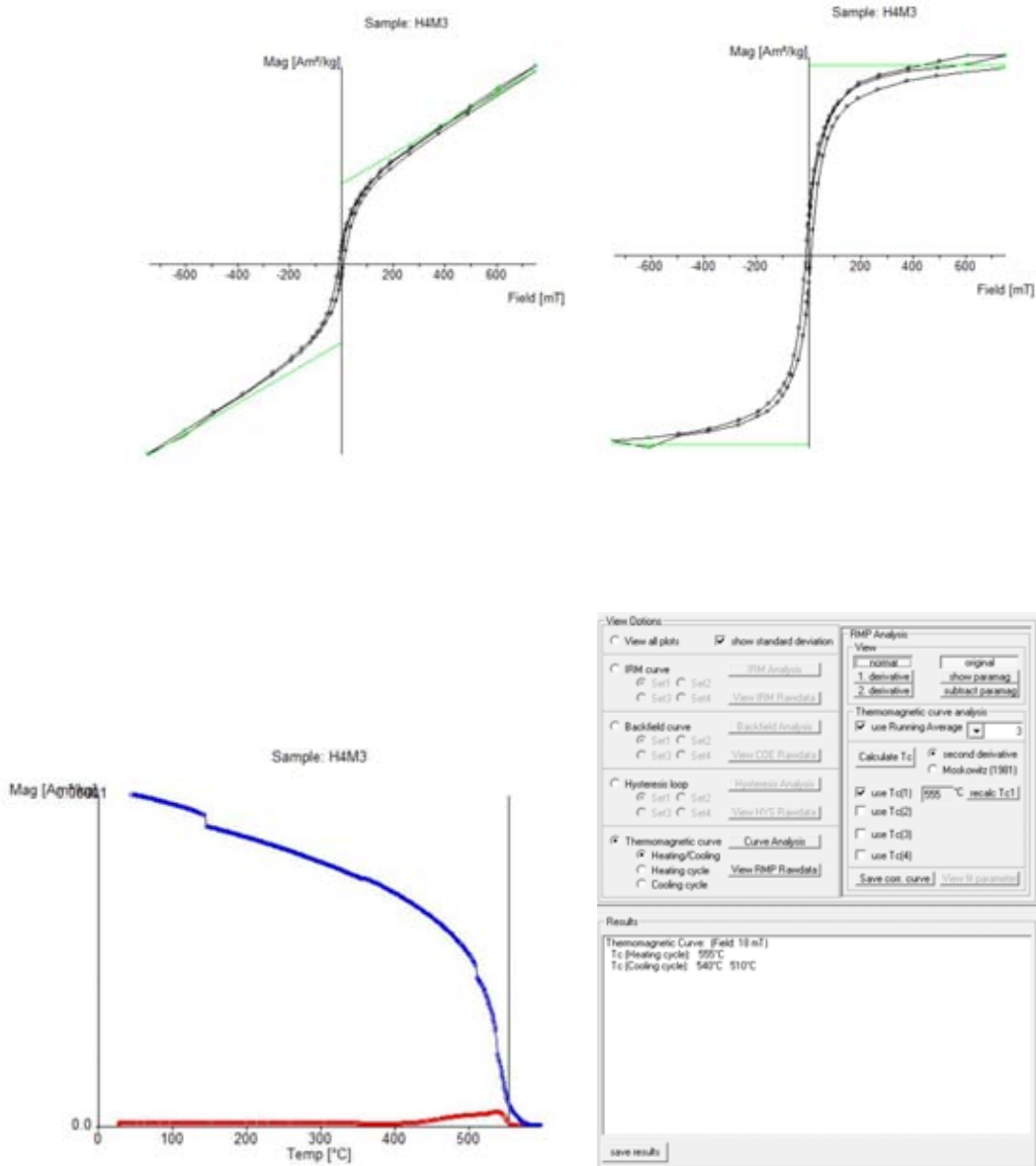


Figura 4.43 Curvas de histéresis y termomagnética para la muestra E4H3 de Guanajuato.

E6H3base. Muestra con alta  $\chi$  (61.13) y bajo contenido de Fe (4.8).

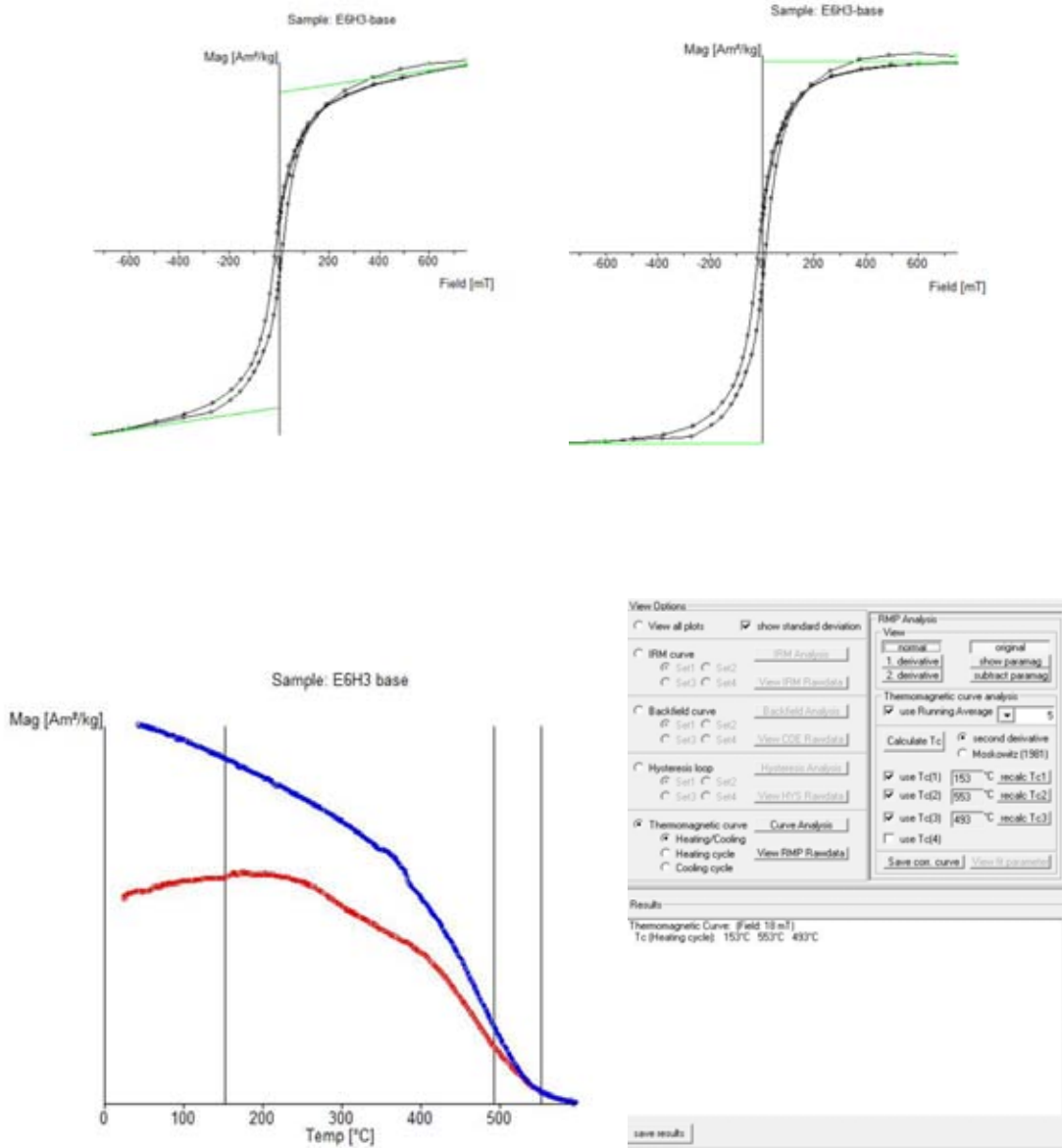


Figura 4.44 Curvas de histéresis y termomagnética para la muestra E6H3 base de Guanajuato.

**E6H3cima.** Muestra con el valor de  $\chi$  más alto (72.75) y una concentración media de Fe (8.6).

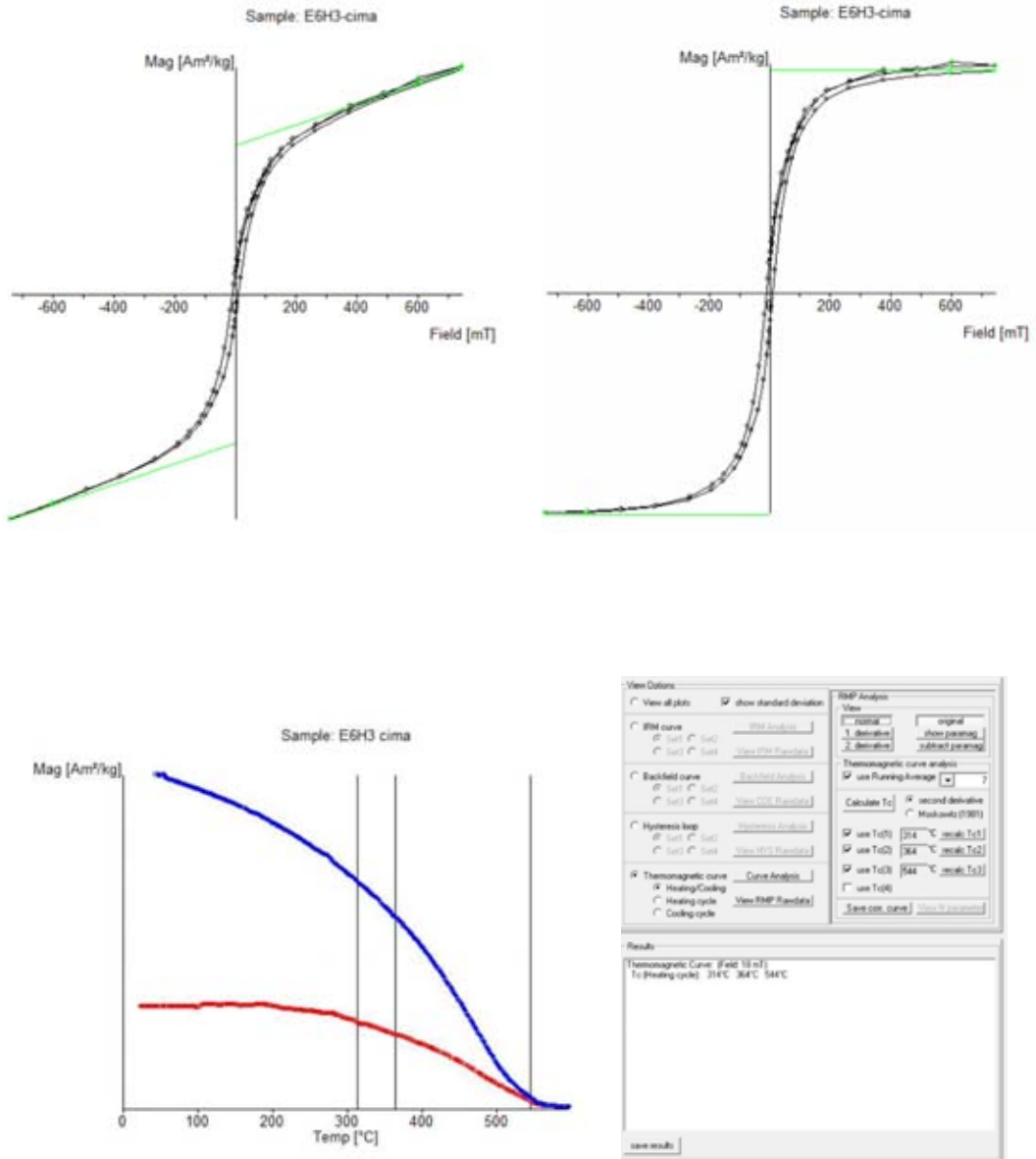


Figura 4.45 Curvas de histéresis y termomagnética para la muestra E6H3 cima de Guanajuato.

## Mineralogía Magnética

<b>Magnetite:</b>	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
Density = 5197 kg m <sup>-3</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Curie temperature = 580°C	Dunlop and Özdemir [1997]
Saturation Magnetization = 92 Am <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	O'Reilly [1984]
Anisotropy Constant = -2.6 Jkg <sup>-1</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Volume susceptibility = ~ 1 SI	O'Reilly [1984]
Typical coercivities are 10's of mT	O'Reilly [1984]
Verwey transition: 110-120 K	Özdemir and Dunlop [1993]
Cell edge = 0.8396 nm	Dunlop and Özdemir [1997]
<b>Maghemite:</b>	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$
Density = 5074 kg m <sup>-3</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Curie temperature = 590-675°C	Dunlop and Özdemir [1997]
Saturation Magnetization = 74 Am <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Anisotropy Constant = 0.92 Jkg <sup>-1</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Verwey transition: suppressed	Dunlop and Özdemir [1997]
Breaks down to $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ : between 250→ 750°C	Dunlop and Özdemir [1997]
<b>TM60:</b>	$\text{Fe}_{24}\text{Ti}_6\text{O}_4$
Density = 4939 kg m <sup>-3</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Curie temperature = 150°C	Dunlop and Özdemir [1997]
Saturation Magnetization = 24 Am <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Anisotropy Constant = 0.41 Jkg <sup>-1</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Coercivity ~ 8 mT	Dunlop and Özdemir [1997]
Verwey transition: suppressed	Dunlop and Özdemir [1997]
Cell edge = 0.8482 nm	Dunlop and Özdemir [1997]

Hematite:	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$
Density = 5271 kg m <sup>-3</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Néel temperature = 675°C	O'Reilly [1984]
Saturation Magnetization = 0.4 Am <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	O'Reilly [1984]
Anisotropy Constant = 228 Jkg <sup>-1</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Volume susceptibility = $\sim 1.3 \times 10^{-3}$ SI	O'Reilly [1984]
Coercivities vary widely and can be 10's of teslas	Banerjee [1971]
Morin Transition: $\sim 250\text{-}260$ K (for $> 0.2 \mu\text{m}$ )	O'Reilly [1984]
Goethite:	$\alpha\text{FeOOH}$
Density = 4264 kg m <sup>-3</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Néel temperature: 70 $\rightarrow$ 125°C	O'Reilly [1984]
Saturation Magnetization = $10^{-3} \rightarrow 1$ Am <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	O'Reilly [1984]
Anisotropy Constant = 0.25 $\rightarrow$ 2 Jkg <sup>-1</sup>	Dekkers [1989]
Volume susceptibility = $\sim 1 \times 10^{-3}$ SI	Dekkers [1989a]
Coercivities can be 10's of teslas	
Breaks down to hematite: 250 $\rightarrow$ 400°C	
Pyrrhotite:	$\text{Fe}_7\text{S}_8$
Density = 4662 kg m <sup>-3</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Monoclinic:	
Curie temperature = $\sim 325^\circ\text{C}$	Dekkers [1989]
Hexagonal:	
Curie temperature = $\sim 270^\circ\text{C}$	Dekkers [1988]
Saturation Magnetization = 0.4 $\rightarrow$ 20 Am <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	Worm et al. [1993]
Volume susceptibility = $\sim 1 \times 10^{-3} \rightarrow 1$ SI	Collinson [1983], O'Reilly [1984]
Anisotropy Constant = 20 Jkg <sup>-1</sup>	O'Reilly [1984]
Coercivities vary widely and can be 100's of mT	O'Reilly [1984]
Has a transition at $\sim 34$ K	Dekkers et al. [1989]
	Rochette et al. [1990]
Hexagonal pyrrhotite: transition near 200°	
Breaks down to magnetite: $\sim 500^\circ\text{C}$	Dunlop and Özdemir [1997]
Greigite:	$\text{Fe}_3\text{S}_4$
Density = 4079 kg m <sup>-3</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Maximum unblocking temperature = $\sim 330^\circ\text{C}$	Roberts [1995]
Saturation Magnetization = $\sim 25$ Am <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	Spender et al. [1972]
Anisotropy Constant = -0.25 Jkg <sup>-1</sup>	Dunlop and Özdemir [1997]
Coercivity 60 $\rightarrow$ 100 mT	Roberts [1995]
Has high $M/\chi$ ratios $\sim 70 \times 10^3$ Am <sup>-1</sup>	Snowball and Thompson [1990]
Breaks down to magnetite: $\sim 270\text{-}350^\circ\text{C}$	Roberts [1995]

Tabla de las propiedades físicas de minerales magnéticos. (Tauxe, 2014).

*Efecto Hopkinson*: es generalmente referido como el pico de  $k$  justo antes del punto de Curie. Cuando se tiene material paramagnético, si se observa un pico de forma Hopkinson, entonces la temperatura del pico puede ser usada como punto de Curie.

La temperatura a la cual ocurre el pico depende de la fuerza coercitiva de la muestra (y por lo tanto, del tamaño de partícula), la variación de la temperatura de la fuerza coercitiva, y la intensidad del campo magnético aplicado (Day, 1975).

En las curvas termomagnéticas cuando la muestra es inicialmente empaquetada en el contenedor de plástico, o enfriada en un campo nulo, la muestra es desmagnetizada totalmente. Al ser aplicado el campo magnético la muestra se magnetiza pero no llegará a saturarse a menos que el campo aplicado sea lo suficientemente fuerte. Cuando la temperatura incrementa, la magnetización puede ser "desbloqueada" con el campo observándose un incremento en la magnetización. Este incremento es opuesto al decaimiento termal de la magnetización aumentando hasta los picos observados (Day, 1975).



*Temperatura de bloqueo ( $T_B$ ):* temperatura registrada durante el enfriamiento en la que el periodo de relajación en una magnetización termorremanente es lo suficientemente grande que permita considerar a la remanencia como estable. (Rivas-Ortíz, 2006).

*Transición de Morin ( $T_M$ ):* temperatura a la que se pierde el ferromagnetismo en un mineral; mientras que la *transición de Verwey ( $T_V$ )* es la temperatura donde se registra un cambio en la red cristalina del mineral por la redistribución de los cationes del hierro. En el caso de la magnetita, es alrededor de los  $-150^\circ\text{C}$  e implica el cambio de un sistema cúbico imperfecto a una simetría monoclinica. (Rivas-Ortíz, 2006).

## ANEXO 10. Diagrama de Day (1977)

Con ayuda de las curvas de IRM y coercitividad se obtuvo el valor de la coercitividad de remanencia ( $B_{cr}$ ), el cual, se utilizó para realizar el cociente  $B_{cr}/B_c$ , pues la fuerza de coercitividad ( $B_c$ ) se obtuvo de las curvas de histéresis además del cociente  $M_{rs}/M_r$ , el cual, involucra la magnetización de saturación ( $M_r$ ) y la magnetización remanente de saturación ( $M_{rs}$ ). Para el diagrama de Day (imagen 4.46) se midieron las curvas de IRM y coercitividad de cuatro de las muestras anómalas de Guanajuato y solo una del DMOT debido a la falta de disponibilidad del equipo (tabla 4.11). Se aplicaron 18mT a una temperatura ambiente entre los 23-24 °C. Los valores de  $M_{rs}$ ,  $M_r$  y  $B_c$  utilizados para la realización de este diagrama fueron calculados después de la corrección de la contribución paramagnética en las curvas de histéresis. Mientras que el valor de  $B_{cr}$  fue obtenido al aplicar un backfield de incremento progresivo después de la saturación.

Muestra	$B_{cr}/B_c$	$M_{rs}/M_r$
E3H6 (DMOT)	3.26	0.15
H4M1	3.49	0.15
H4M3	0.17	1.21
E6H3-base	0.18	3.19
E6H3-cima	0.14	3.76

Tabla 4.11 Muestras y datos de los cocientes integradores del diagrama de Day (1977).

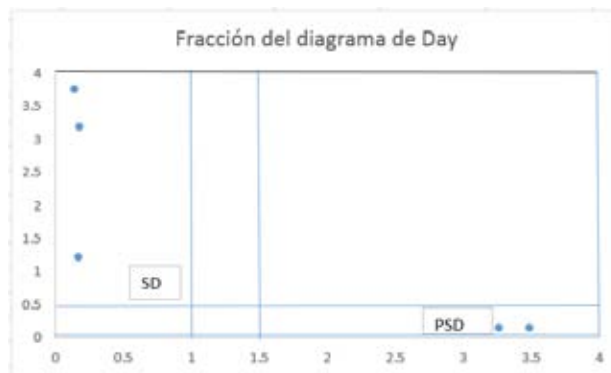


Figura 4.46 Fracción del diagrama de Day (1977).

Se muestra el tipo de dominio magnético para las muestras seleccionadas.

De acuerdo a la imagen 4.46 las muestras H4M3, E6H3-base y E6H3-cima de Guanajuato pertenecen a un dominio sencillo, mientras que la muestra del DMOT (E3H6) y la muestra H4M1 también de Guanajuato, pertenecen al pseudo-dominio (PSD), muy cercanas al multidominio (MD).