



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

***Movilidad de Elementos Potencialmente Tóxicos en suelos y  
sedimentos de la parte alta de la cuenca del río Sonora.***

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Presenta:

Francisco Robert Alexander Ziegler Rivera

Tutor:

Dra. Blanca Lucía Prado Pano

Instituto de Geología

Ciudad de México, Enero, 2018.



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.

## **CÓDIGO DE ÉTICA**

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



Francisco Robert Alexander Ziegler Rivera.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Le agradezco infinitamente a dios por brindarme una hermosa familia y por permitirme vivir momentos hermosos.

A mi hermosa esposa, Karina, por el amor que me demuestra día a día y por estar siempre conmigo, apoyándome en todo. Eres lo mejor que me ha sucedido en la vida mi amor, Te amo esposita hermosa.

A mi madre, Adriana, que ha luchado toda su vida por sacarnos adelante a mi hermana y a mí, eres un ejemplo a seguir porque no existe ningún obstáculo que te detenga, eres sin duda la mejor madre del mundo. Te amo madre.

A mi hermana, Paola, por enseñarme a luchar por la vida, por apoyarme siempre y por demostrarme que el cariño de una hermana es una de las cosas más lindas que una persona puede tener.

A mi tío José Luis, que siempre será mi verdadero padre, gracias por cuidarnos en todo momento desde el cielo, eres el angelito que nos cuida y protege. Te agradezco infinitamente por hacerme sonreír a la vida.

A mis suegros, Fabiola y Rafael, por apoyarme a mí y a mí esposa, por abrirme las puertas de su linda familia, les agradezco infinitamente por todo el cariño que nos brindan.

A mis tíos Marta, Sergio, Maru y Miguel por ser siempre una linda familia y por darme su cariño en todo momento. De igual forma gracias a mis tíos Fernando y Oscar y a mis tías Lulú, por ser una excelente familia.

A mis primos Fernando, Sebastián, José Luis, Alejandra, Adrián, Oscar, Miguel y Octavio, por ser como mis hermanos, les agradezco su apoyo incondicional. Un agradecimiento a mi linda sobrina, Dany, por darnos una nueva alegría a la familia.

A mi cuñado Rafael, a su esposa Eugenia y a mi sobrina Eugenia bebé, por apoyarnos a mi esposa y a mí en todo momento.

A todos mis amigos, a los cuales considero como mis hermanos, gracias por darle una alegría más a mi vida.

Le agradezco infinitamente a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme una educación de excelencia.

Un sincero agradecimiento al Instituto de Geología de la UNAM, Instituto que me ha brindado un gran apoyo para mi completa formación académica.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por brindarme una educación de alta calidad, sin la cual no podría lograr mis objetivos.

Un especial agradecimiento a mi tutora, Dra. Blanca Lucía Prado Pano, gracias por sus numerosos consejos, por sus observaciones, por su apoyo incondicional y por compartir su conocimiento y experiencia para poder lograr y concluir este trabajo.

A mis sinodales, Dr. Francisco Martín Romero, Dra. María Aurora Armienta Hernández, Dra. Ofelia Mortón Bermea y al Dr. Agustín Robles Morua, por sus valiosos consejos y observaciones para la realización de este trabajo.

Mi más sincero agradecimiento al CONACYT, por la beca que me proporcionaron, sin la cual no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Le agradezco enormemente a la Dra. Lucy Mora Palomino, por su valioso apoyo en los análisis realizados en este trabajo y por resolver muchas de mis dudas que surgieron a lo largo de los últimos dos años.

Al Mtro. Jaime Díaz Ortega, por la valiosa ayuda que me brindó en la realización de secciones delgadas y por sus consejos que fueron de mucha ayuda para la conclusión de este trabajo.

Un sincero agradecimiento al Dr. Alfonso Gastélum Strozzi, por su apoyo en los análisis de tomografía de rayos X, así como por sus consejos y apoyo en la realización de este trabajo.

De igual forma, le agradezco al Biol. Jorge René Alcalá Martínez por su apoyo en los análisis realizados en el laboratorio de Física de suelos.

A la Dra. Teresa Pi Puig, por su valiosa ayuda en los análisis de Difracción de Rayos X.

Al Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología, en especial al Dr. Francisco Martín Romero, al M en C. Luis Gerardo Martínez, Q.F.B Fabiola Vega y al Quím. Inés Ramos, por su apoyo en los análisis de Fluorescencia de Rayos X.

Al Dr. José Luz González Chávez, por su valioso apoyo en los análisis de potencial Z para la determinación del punto de carga cero.

Un agradecimiento a la Dra. Olivia Zamora Martínez por los análisis de cromatografía de iones.

También agradezco al Mtro. Javier Tadeo León por los análisis realizados en el equipo de ICP-OES.

Agradezco a la Dra. Adela Margarita Reyes Salas y a la Quím. Blanca Sonia Ángeles García por su apoyo en los análisis de microscopía electrónica de barrido.

Al Ing. Carlos Linares López por su ayuda en la realización de los análisis de microsonda electrónica.

Al Laboratorio de Biogeoquímica de suelos (IIES, UNAM) y al M en C. Rodrigo Velázquez Durán por los análisis de carbono.

Finalmente, un sincero agradecimiento a todos los profesores que me dieron clase en el posgrado de Ciencias de la Tierra, gracias por compartir sus enormes conocimientos.

# ÍNDICE

<b>GLOSARIO</b> .....	19
<b>RESUMEN</b> .....	20
<b>ABSTRACT</b> .....	22
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	24
<b>CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL SITIO DE ESTUDIO</b> .....	27
2.1 Hidrología.....	27
2.2 Hidrogeología.....	29
2.3 Clima.....	29
2.4 Geología y mineralizaciones.....	30
2.5 Edafología.....	34
2.6 Geoquímica en rocas y sedimentos.....	35
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO</b> .....	37
3.1 Importancia del estudio de los elementos potencialmente tóxicos en suelos y sedimentos.....	37
3.2 Capacidad amortiguadora de suelos y sedimentos y sus características que influyen en la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos.....	38
3.3 Contaminación de soluciones ácidas en suelos y sedimentos.....	46
3.4 Estudio de la movilidad de elementos potencialmente tóxicos en columnas de suelo y sedimento.....	47
3.5 Análisis por tomografía en suelos y sedimentos contaminados.....	49
3.6 Análisis petrográficos, estadísticos y modelación geoquímica en sitios contaminados.....	50
3.7 Características de los elementos potencialmente tóxicos presentes en soluciones ácidas y su normatividad en México.....	51
<b>HIPOTESIS</b> .....	56
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	57
<b>OBJETIVOS</b> .....	57
<b>CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	58
4.1 Muestreo de sedimentos y columnas inalteradas de suelos y sedimentos.....	58
4.2 Análisis físicos y químicos en muestras superficiales de suelos y sedimentos colectadas en la parte alta de la cuenca del río Sonora en zonas sin evidencia de ningún derrame.....	60
4.3 Evaluación de la movilidad de elementos potencialmente tóxicos en suelos y sedimentos de la zona de estudio mediante experimentos en columnas inalteradas.....	64
4.3.1 Condiciones experimentales.....	64
4.3.2 Análisis del potencial redox en los diferentes riegos con la solución ácida en las columnas de suelo/sedimento.....	69
4.3.3 Diagramas Eh vs pH.....	70
4.3.4 Modelación Geoquímica.....	71
4.3.5 Fluorescencia de Rayos X (FRX).....	72
4.3.6 Difracción de Rayos X (DRX).....	74
4.3.7 Colorimetría.....	76
4.3.8 Prueba de extracción de EPT después de los eventos de riego con la solución ácida ferrocuprífera.....	77
4.3.9 Elaboración de secciones delgadas de suelos y sedimentos que estuvieron en contacto con la solución ácida ferrocuprífera.....	78
4.3.10 Análisis micromorfológico y morfométrico en secciones delgadas de suelos y sedimentos.....	79
4.3.11 Análisis químicos en secciones delgadas de suelos y sedimentos utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Microsonda Electrónica de Barrido.....	80
4.4 Evaluación del efecto del paso de la solución ácida ferrocuprífera en la estructura del suelo Tinajas y del sedimento El Álamo.....	82
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	84
5.1 Caracterización de los perfiles de excavación en la zona alterada por el derrame de la solución ácida.....	84
5.2 Análisis físicos y químicos en muestras superficiales de suelos y sedimentos sin evidencia de afectación por el derrame ácido.....	93
5.3 Evaluación de la movilidad de elementos potencialmente tóxicos en suelos y sedimentos de la zona de estudio mediante experimentos en columnas inalteradas.....	101
5.3.1 Condiciones experimentales.....	101
5.3.2 Análisis del potencial redox en los diferentes riegos con la solución ácida.....	141

5.3.3 Diagramas Eh vs pH.....	148
5.3.4 Modelación Geoquímica.....	171
5.3.5 Fluorescencia de rayos X (FRX).....	182
5.3.6 Difracción de Rayos X (DRX).....	200
5.3.7 Colorimetría.....	209
5.3.8 Prueba de extracción de EPT después de los eventos de riego con la solución ácida ferrocuprífera.....	215
5.3.9 Análisis micromorfológico y morfométrico en secciones delgadas de suelos y sedimentos.....	218
5.3.10 Análisis químicos en secciones delgadas.....	235
5.4 Evaluación del efecto del paso de la solución ácida ferrocuprífera en la estructura del suelo Tinajas y del sedimento El Álamo.....	256
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>267</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>270</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>280</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización del sitio de estudio correspondiente a la parte norte de la cuenca del río Sonora.....	<b>27</b>
<b>Figura 2.</b> Red de drenaje de la cuenca del río Sonora y ubicación del represo “Tinajas 1”, de donde se derramaron aproximadamente 40,000 m <sup>3</sup> de solución ácida ferrocuprífera.....	<b>28</b>
<b>Figura 3.</b> Mapa geológico de la cuenca del río Sonora.....	<b>32</b>
<b>Figura 4.</b> Mapa del cinturón laramídico de pórfidos de cobre del noroeste de México y de la cordillera oeste de Norte América, resaltando los ejemplares más importantes.....	<b>33</b>
<b>Figura 5.</b> Mapa de suelos de la cuenca del río Sonora.....	<b>35</b>
<b>Figura 6.</b> Diagrama de movilidad de metales pesados en suelos.....	<b>44</b>
<b>Figura 7.</b> Dinámica de los metales pesados en el suelo.....	<b>45</b>
<b>Figura 8.</b> Esquema típico de un experimento de movilidad de contaminantes en columnas.....	<b>48</b>
<b>Figura 9.</b> Mapa de localización de las columnas inalteradas de suelos y sedimentos tomadas en la parte alta de la cuenca del río Sonora.....	<b>59</b>
<b>Figura 10.</b> Localización de los sitios donde se colectaron muestras de columna de suelos y sedimentos. En el lado derecho se representan las columnas inalteradas que fueron tomadas en los sitios mencionados, estableciendo el número y la disposición en que fueron muestreadas.....	<b>59</b>
<b>Figura 11.</b> Imagen A. Tamizado de las muestras, en donde queda retenido el material grueso. Imagen B. Cuarteado de las muestras.....	<b>61</b>
<b>Figura 12.</b> Equipo usado en la medición del potencial Z para la determinación del punto de carga cero (PZC). .....	<b>62</b>
<b>Figura 13.</b> Imagen A. Columna de suelo instrumentada para los experimentos de movilidad de elementos potencialmente tóxicos, donde se observa la instrumentación con electrodos redox, termómetro, microlisímetros de succión, etc. Imagen B. Toma de muestra en la base de la columna de suelo después de un evento de riego con solución ácida ferrocuprífera.....	<b>65</b>
<b>Figura 14.</b> Área bajo la curva.....	<b>68</b>
<b>Figura 15.</b> Equipo utilizado para la medición del potencial redox.....	<b>70</b>
<b>Figura 16.</b> Equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X.....	<b>72</b>
<b>Figura 17.</b> Difractómetro EMPYREAN en donde se realizó el análisis de DRX en las muestras de suelo y sedimento.....	<b>75</b>
<b>Figura 18.</b> Diferentes escalas de colores utilizando los parámetros L*, a* y b*.....	<b>76</b>
<b>Figura 19.</b> Imagen A. Equipo Beckman utilizado para medir el pH de las soluciones. Imagen B. Equipo LaMotte usado para medir la CE de las soluciones preparadas. Imagen C. Soluciones preparadas para la prueba de extracción de EPT previo a la agitación. Imagen D. Equipo rotatorio para la agitación de las muestras durante 18 horas.....	<b>77</b>
<b>Figura 20.</b> Ejemplos de secciones delgadas. A: Suelo Tinajas. B: Sedimento El Álamo. C: Sedimento Chilolo. D: Suelo Bacanuchi.....	<b>78</b>
<b>Figura 21.</b> Microscopio petrográfico Olympus BX51 usado en los análisis micromorfológicos y morfométricos en las diversas secciones delgadas.....	<b>80</b>
<b>Figura 22.</b> Microscopio Electrónico de Barrido utilizado para el análisis químico en secciones delgadas de suelos y sedimentos.....	<b>81</b>
<b>Figura 23.</b> Resumen de la metodología utilizada para determinar la movilidad de los EPT en la parte alta de la cuenca del río Sonora.....	<b>83</b>
<b>Figura 24.</b> Variación del contenido de humedad volumétrico ( $\theta\%$ ) a profundidad en los perfiles de excavación. La secuencia de perfiles de humedad se presenta desde el punto más cercano al sitio del derrame (6.7 km), alejándose hasta 40.3 km.....	<b>84</b>
<b>Figura 25.</b> Variación de la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a profundidad en los perfiles de excavación.....	<b>86</b>
<b>Figura 26.</b> Variación del pH a profundidad en los perfiles de excavación.....	<b>87</b>
<b>Figura 27.</b> Variación de la CE a profundidad en los perfiles de excavación.....	<b>89</b>
<b>Figura 28.</b> Comportamiento de elementos mayores (Fe y Ca) en los perfiles de las excavaciones.....	<b>90</b>
<b>Figura 29.</b> Comportamiento de elementos traza (Mn, Cu, Pb) en los perfiles de las excavaciones.....	<b>91</b>
<b>Figura 30.</b> Comportamiento de elementos traza (Zn, As, Cr) en los perfiles de las excavaciones.....	<b>92</b>
<b>Figura 31.</b> Potencial de carga cero (PZC) en las muestras superficiales.....	<b>98</b>
<b>Figura 32.</b> pH y CE en los lixiviados colectados en la base de la columna Tinajas en cada uno de los riegos. .....	<b>103</b>
<b>Figura 33.</b> Flujo de lixiviados en la base de la columna del suelo Tinajas. El valor de 0 en $V_0$ corresponde al inicio de la salida de lixiviados en la base de la columna.....	<b>104</b>
<b>Figura 34.</b> Curvas de elución de EPT en la base de la columna de suelo Tinajas.....	<b>105</b>
<b>Figura 35.</b> Concentración de EPT en muestras de solución de suelo colectadas a diferentes profundidades en la columna de suelo Tinajas durante el primer y tercer riego.....	<b>110</b>
<b>Figura 36.</b> Concentración de sulfatos en los cuatro riegos de la columna de suelo Tinajas.....	<b>111</b>



<b>Figura 37.</b> pH y CE en los lixiviados colectados en la base de la columna El Álamo en cada uno de los riegos.	<b>112</b>
<b>Figura 38.</b> Flujo de lixiviados en la base de la columna de sedimento El Álamo. El valor de 0 en $V_0$ corresponde al inicio de la salida de lixiviados en la base de la columna.	<b>113</b>
<b>Figura 39.</b> Curvas de elución de EPT en la base de la columna de sedimento El Álamo.	<b>115</b>
<b>Figura 40.</b> Concentración de EPT en muestras de solución de sedimento colectadas a diferentes profundidades en la columna de sedimento El Álamo durante el primer y tercer riego.	<b>119</b>
<b>Figura 41.</b> Concentración de sulfatos en los cuatro riegos de la columna de sedimento El Álamo.	<b>120</b>
<b>Figura 42.</b> pH y CE en los lixiviados colectados en la base de la columna de sedimento Chilolo en cada uno de los riegos.	<b>121</b>
<b>Figura 43.</b> Flujo de lixiviados en la base de la columna de sedimento Chilolo. El valor de 0 en $V_0$ corresponde al inicio de la salida de lixiviados en la base de la columna.	<b>122</b>
<b>Figura 44.</b> Curvas de elución de EPT en la base de la columna de sedimento Chilolo.	<b>123</b>
<b>Figura 45.</b> Concentración de EPT en muestras de solución de sedimento colectadas a diferentes profundidades en la columna de sedimento Chilolo en los dos riegos realizados.	<b>125</b>
<b>Figura 46.</b> Concentración de sulfatos en los dos riegos de la columna de sedimento Chilolo.	<b>126</b>
<b>Figura 47.</b> pH y CE en los lixiviados colectados en la base de la columna Bacanuchi en cada uno de los riegos.	<b>127</b>
<b>Figura 48.</b> Flujo de lixiviados en la base de la columna de suelo Bacanuchi. El valor de 0 en $V_0$ corresponde al inicio de la salida de lixiviados en la base de la columna.	<b>128</b>
<b>Figura 49.</b> Curvas de elución de EPT en la base de la columna de suelo Bacanuchi.	<b>129</b>
<b>Figura 50.</b> Concentración de EPT en muestras de solución de suelo colectadas a diferentes profundidades en la columna de suelo Bacanuchi durante el primer y segundo riego.	<b>130</b>
<b>Figura 51.</b> Concentración de bicarbonatos (imagen A) y sulfatos (Imagen B) en los tres riegos de la columna de suelo Bacanuchi.	<b>131</b>
<b>Figura 52.</b> Curvas de elución de Pb en las columnas tomando en cuenta el valor de Pb determinado por CONAGUA.	<b>138</b>
<b>Figura 53.</b> Retención de EPT durante el primer riego con la solución ácida ferrocuprífera en las columnas Tinajas, El Álamo, Chilolo y Bacanuchi.	<b>140</b>
<b>Figura 54.</b> Variación del potencial redox durante el primer (A), tercer (B) y cuarto riego (C) con la solución ácida ferrocuprífera en la columna de suelo Tinajas.	<b>142</b>
<b>Figura 55.</b> Variación del potencial redox durante el primer (A), segundo (B) y tercer riego (C) con la solución ácida ferrocuprífera en la columna de sedimento El Álamo.	<b>143</b>
<b>Figura 56.</b> Variación del potencial redox durante el primer (A) y segundo (B) riego en la columna de sedimento Chilolo.	<b>144</b>
<b>Figura 57.</b> Variación del potencial redox durante el primer (A), segundo (B) y tercer riego (C) con la solución ácida ferrocuprífera en la columna de suelo Bacanuchi.	<b>145</b>
<b>Figura 58.</b> Diagramas Eh vs pH para cobre y sulfato en el primer riego en la base de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L).	<b>149</b>
<b>Figura 59.</b> Diagramas Eh vs pH para sulfato en el primer riego a 3 y 10 cm de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L).	<b>150</b>
<b>Figura 60.</b> Diagramas Eh vs pH para hierro y sulfato en el segundo riego en la base de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L).	<b>151</b>
<b>Figura 61.</b> Diagramas Eh vs pH para plomo y sulfato en el tercer riego en la base de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L).	<b>152</b>
<b>Figura 62.</b> Diagrama Eh vs pH para sulfato en el tercer riego a 16 cm de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L).	<b>153</b>
<b>Figura 63.</b> Diagramas Eh vs pH para arsénico y sulfato en el cuarto riego en la base de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L).	<b>154</b>
<b>Figura 64.</b> Diagramas Eh vs pH para manganeso y sulfato en el primer riego en la base de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L).	<b>155</b>
<b>Figura 65.</b> Diagramas Eh vs pH para sulfato en el primer riego a 3 y 15 cm de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L).	<b>156</b>
<b>Figura 66.</b> Diagramas Eh vs pH para Al y sulfato en el segundo riego en la base de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L).	<b>157</b>
<b>Figura 67.</b> Diagramas Eh vs pH para cromo y sulfato en el tercer riego en la base de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L).	<b>157</b>
<b>Figura 68.</b> Diagrama Eh vs pH para sulfato en el tercer riego a 16 cm de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L).	<b>158</b>
<b>Figura 69.</b> Diagramas Eh vs pH para plomo y sulfato en el cuarto riego en la base de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L).	<b>159</b>

<b>Figura 70.</b> Diagramas Eh vs pH para hierro y sulfato en el primer riego en la base de la columna de sedimento Chilolo (actividades en mol/L).....	<b>160</b>
<b>Figura 71.</b> Diagramas Eh vs pH para sulfato en el primer riego a 2.5 y 5 cm de la columna de sedimento Chilolo (actividades en mol/L).....	<b>161</b>
<b>Figura 72.</b> Diagramas Eh vs pH para cobre y sulfato en el segundo riego en la base de la columna de sedimento Chilolo (actividades en mol/L).....	<b>162</b>
<b>Figura 73.</b> Diagrama Eh vs pH para sulfato en el segundo riego a 2.5 cm de la columna de sedimento Chilolo (actividades en mol/L).....	<b>163</b>
<b>Figura 74.</b> Diagramas Eh vs pH para hierro y sulfato en el primer riego en la base de la columna de suelo Bacanuchi (actividades en mol/L).....	<b>164</b>
<b>Figura 75.</b> Diagrama Eh vs pH para sulfato en el primer riego a 3 cm de la columna de suelo Bacanuchi (actividades en mol/L).....	<b>165</b>
<b>Figura 76.</b> Diagramas Eh vs pH para manganeso y sulfato en el segundo riego en la base de la columna de suelo Bacanuchi (actividades en mol/L).....	<b>166</b>
<b>Figura 77.</b> Diagramas Eh vs pH para sulfato en el segundo riego a 12.5 cm de la columna de suelo Bacanuchi (actividades en mol/L).....	<b>167</b>
<b>Figura 78.</b> Diagramas Eh vs pH para zinc y sulfato en el tercer riego en la base de la columna de suelo Bacanuchi (actividades en mol/L).....	<b>168</b>
<b>Figura 79.</b> Concentraciones totales (antes y después de los riegos) vs valores naturales de fondo en la columna de suelo Tinajas.....	<b>184</b>
<b>Figura 80.</b> Concentraciones totales (antes y después de los riegos) vs valores naturales de fondo en la columna de sedimento El Álamo.....	<b>186</b>
<b>Figura 81.</b> Concentraciones totales (antes y después de los riegos) vs valores naturales de fondo en la columna de sedimento Chilolo.....	<b>188</b>
<b>Figura 82.</b> Concentraciones totales (antes y después de los riegos) vs valores naturales de fondo en la columna de suelo Bacanuchi.....	<b>190</b>
<b>Figura 83.</b> Mapas de comparación de las concentraciones totales determinadas después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera para As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en los primeros dos centímetros, versus los valores de fondo de la zona de estudio.....	<b>194</b>
<b>Figura 84.</b> Mapas de comparación de las concentraciones totales determinadas después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera para As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en la profundidad de 2-4 cm, versus los valores de fondo de la zona de estudio.....	<b>195</b>
<b>Figura 85.</b> Mapas de comparación de las concentraciones totales determinadas después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera para As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en la profundidad de 4-6 cm, versus los valores de fondo de la zona de estudio.....	<b>196</b>
<b>Figura 86.</b> Cálculo del Igeo para las diferentes muestras del suelo Tinajas.....	<b>197</b>
<b>Figura 87.</b> Cálculo del Igeo para las diferentes muestras del sedimento El Álamo.....	<b>198</b>
<b>Figura 88.</b> Cálculo del Igeo para las diferentes muestras del sedimento Chilolo.....	<b>198</b>
<b>Figura 89.</b> Cálculo del Igeo para las diferentes muestras del suelo Bacanuchi.....	<b>199</b>
<b>Figura 90.</b> Difractogramas para el suelo Tinajas en donde se observan algunas fases minerales identificadas por el análisis de DRX.....	<b>200</b>
<b>Figura 91.</b> Difractogramas para el sedimento El Álamo en donde se observan algunas fases minerales identificadas por el análisis de DRX.....	<b>202</b>
<b>Figura 92.</b> Difractogramas para el sedimento Chilolo en donde se observan algunas fases minerales identificadas por el análisis de DRX.....	<b>204</b>
<b>Figura 93.</b> Difractogramas para el suelo Bacanuchi en donde se observan algunas fases minerales identificadas por el análisis de DRX.....	<b>206</b>
<b>Figura 94.</b> Cambios de coloración en la columna de suelo Bacanuchi después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>209</b>
<b>Figura 95.</b> Cambios de coloración tomando en cuenta los parámetros $a^*$ y $b^*$ en el suelo Tinajas.....	<b>210</b>
<b>Figura 96.</b> Cambios de coloración tomando en cuenta los parámetros $a^*$ y $b^*$ en el sedimento El Álamo.....	<b>212</b>
<b>Figura 97.</b> Cambios de coloración tomando en cuenta los parámetros $a^*$ y $b^*$ en el sedimento Chilolo.....	<b>213</b>
<b>Figura 98.</b> Cambios de coloración tomando en cuenta los parámetros $a^*$ y $b^*$ en el suelo Bacanuchi.....	<b>214</b>
<b>Figura 99.</b> Microfotografías tomadas de la sección delgada del suelo Tinajas sin ningún riego.....	<b>218</b>
<b>Figura 100.</b> Microfotografías de secciones delgadas analizadas en diferentes profundidades del suelo Tinajas después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>219</b>
<b>Figura 101.</b> Microfotografías tomadas de la sección delgada del sedimento El Álamo sin ningún riego.....	<b>220</b>
<b>Figura 102.</b> Microfotografías de secciones delgadas analizadas en diferentes profundidades del sedimento El Álamo después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>221</b>
<b>Figura 103.</b> Microfotografías tomadas de la sección delgada del sedimento Chilolo sin ningún riego.....	<b>222</b>
<b>Figura 104.</b> Microfotografías de secciones delgadas analizadas en diferentes profundidades del sedimento Chilolo después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>223</b>

<b>Figura 105.</b> Microfotografías tomadas de la sección delgada del suelo Bacanuchi sin ningún riego.....	<b>224</b>
<b>Figura 106.</b> Microfotografías de secciones delgadas analizadas en diferentes profundidades del suelo Bacanuchi después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>225</b>
<b>Figura 107.</b> Microfotografías del análisis morfométrico en el suelo Tinajas sin ningún riego con el lixiviado ácido.....	<b>227</b>
<b>Figura 108.</b> Microfotografías del análisis morfométrico en el suelo Tinajas después de los riegos con el lixiviado ácido.....	<b>228</b>
<b>Figura 109.</b> Microfotografías del análisis morfométrico en el sedimento El Álamo sin ningún riego con el lixiviado ácido.....	<b>229</b>
<b>Figura 110.</b> Microfotografías del análisis morfométrico en el sedimento El Álamo después de los riegos con el lixiviado ácido.....	<b>230</b>
<b>Figura 111.</b> Microfotografías del análisis morfométrico en el sedimento Chilolo sin ningún riego con el lixiviado ácido.....	<b>231</b>
<b>Figura 112.</b> Microfotografías del análisis morfométrico en el sedimento Chilolo después de los riegos con el lixiviado ácido.....	<b>232</b>
<b>Figura 113.</b> Microfotografías del análisis morfométrico en el suelo Bacanuchi sin ningún riego con el lixiviado ácido.....	<b>233</b>
<b>Figura 114.</b> Microfotografías del análisis morfométrico en el suelo Bacanuchi después de los riegos con el lixiviado ácido.....	<b>234</b>
<b>Figura 115.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.....	<b>236</b>
<b>Figura 116.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.....	<b>237</b>
<b>Figura 117.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.....	<b>239</b>
<b>Figura 118.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.....	<b>240</b>
<b>Figura 119.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.....	<b>242</b>
<b>Figura 120.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.....	<b>243</b>
<b>Figura 121.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.....	<b>245</b>
<b>Figura 122.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.....	<b>246</b>
<b>Figura 123.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.....	<b>248</b>
<b>Figura 124.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>248</b>
<b>Figura 125.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.....	<b>249</b>
<b>Figura 126.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>249</b>
<b>Figura 127.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.....	<b>250</b>
<b>Figura 128.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 8-12 cm.....	<b>250</b>
<b>Figura 129.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.....	<b>251</b>
<b>Figura 130.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>251</b>
<b>Figura 131.</b> Distribución de poros por volumen, en la superficie, parte media y base de la columna de suelo Tinajas.....	<b>257</b>
<b>Figura 132.</b> Distribución de poros por volumen, en la superficie, parte media y base de la columna de sedimento El Álamo.....	<b>258</b>
<b>Figura 133.</b> Porosidad 2D en la superficie de la columna de suelo Tinajas.....	<b>260</b>
<b>Figura 134.</b> Porosidad 2D en la parte media de la columna de suelo Tinajas.....	<b>260</b>
<b>Figura 135.</b> Porosidad 2D en la base de la columna de suelo Tinajas.....	<b>261</b>
<b>Figura 136.</b> Porosidad 2D en la superficie de la columna de sedimento El Álamo.....	<b>262</b>
<b>Figura 137.</b> Porosidad 2D en la parte media de la columna de sedimento El Álamo.....	<b>262</b>
<b>Figura 138.</b> Porosidad 2D en la base de la columna de sedimento El Álamo.....	<b>263</b>

<b>Figura 139.</b> Porosidad 3D por subvolumen en la columna de suelo Tinajas en los diferentes riegos con la solución ácida.....	<b>264</b>
<b>Figura 140.</b> Porosidad 3D por subvolumen en la columna de sedimento El Álamo en los diferentes riegos con la solución ácida.....	<b>265</b>
<b>Figura 141.</b> Imágenes en 3D de la columna de suelo Tinajas, adquiridas después del análisis por tomografía de rayos X.....	<b>266</b>
<b>Figura 142.</b> Imágenes en 3D de la columna de sedimento El Álamo, adquiridas después del análisis por tomografía de rayos X.....	<b>266</b>
<b>Figura 143.</b> Imagen A. Excavación 6.7 km aguas abajo del represo Tinajas 1. Imagen B. Aspecto general de la excavación. Imagen C. Presencia de precipitados con coloraciones amarillas.....	<b>280</b>
<b>Figura 144.</b> Excavación en el rancho El Álamo. Se observa una zona con precipitados de coloración amarilla entre 17 y 60 cm de profundidad, la cual se extiende a todo lo ancho del cauce.....	<b>281</b>
<b>Figura 145.</b> Excavaciones A y B en el rancho Chilolo, 24.5 km aguas abajo del represo Tinajas 1.....	<b>282</b>
<b>Figura 146.</b> Columna de sedimento muestreada en campo y llevada al Instituto de Geología de la UNAM.....	<b>283</b>
<b>Figura 147.</b> Imagen A. Determinación del color en seco. Imagen B. Determinación del color en húmedo comparando con la carta de Munsell.....	<b>284</b>
<b>Figura 148.</b> Imagen A. Agitador eléctrico. Imagen B. Suspensiones de las muestras.....	<b>285</b>
<b>Figura 149.</b> Análisis de conductividad hidráulica en muestras de suelo y sedimento.....	<b>288</b>
<b>Figura 150.</b> Método de la probeta.....	<b>288</b>
<b>Figura 151.</b> Método del picnómetro.....	<b>289</b>
<b>Figura 152.</b> Media del pH en los diferentes riegos.....	<b>313</b>
<b>Figura 153.</b> Media de la Conductividad Eléctrica (CE) en los diferentes riegos.....	<b>313</b>
<b>Figura 154.</b> Media de sulfatos en los diferentes riegos.....	<b>313</b>
<b>Figura 155.</b> Media de Al en los diferentes riegos.....	<b>314</b>
<b>Figura 156.</b> Media de As en los diferentes riegos.....	<b>314</b>
<b>Figura 157.</b> Media de Cd en los diferentes riegos.....	<b>314</b>
<b>Figura 158.</b> Media de Cr en los diferentes riegos.....	<b>315</b>
<b>Figura 159.</b> Media de Cu en los diferentes riegos.....	<b>315</b>
<b>Figura 160.</b> Media de Fe en los diferentes riegos.....	<b>315</b>
<b>Figura 161.</b> Media de Mn en los diferentes riegos.....	<b>316</b>
<b>Figura 162.</b> Media de Pb en los diferentes riegos.....	<b>316</b>
<b>Figura 163.</b> Media de Zn en los diferentes riegos.....	<b>316</b>
<b>Figura 164.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 8-12 cm.....	<b>319</b>
<b>Figura 165.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>320</b>
<b>Figura 166.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 16-20 cm.....	<b>321</b>
<b>Figura 167.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 8-12 cm.....	<b>322</b>
<b>Figura 168.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>323</b>
<b>Figura 169.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 16-20 cm.....	<b>324</b>
<b>Figura 170.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 8-12 cm.....	<b>325</b>
<b>Figura 171.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>326</b>
<b>Figura 172.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 16-20 cm.....	<b>327</b>
<b>Figura 173.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 8-12 cm.....	<b>328</b>
<b>Figura 174.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>329</b>
<b>Figura 175.</b> Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 16-20 cm.....	<b>330</b>
<b>Figura 176.</b> Mapeo elemental de As en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.....	<b>331</b>
<b>Figura 177.</b> Mapeo elemental de Cd en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.....	<b>331</b>
<b>Figura 178.</b> Mapeo elemental de Cr en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.....	<b>332</b>
<b>Figura 179.</b> Mapeo elemental de Cu en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.....	<b>332</b>
<b>Figura 180.</b> Mapeo elemental de Mn en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.....	<b>332</b>
<b>Figura 181.</b> Mapeo elemental de Pb en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.....	<b>333</b>

<b>Figura 182.</b> Mapeo elemental de Zn en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.....	<b>333</b>
<b>Figura 183.</b> Mapeo elemental de As en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.....	<b>333</b>
<b>Figura 184.</b> Mapeo elemental de Cd en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.....	<b>334</b>
<b>Figura 185.</b> Mapeo elemental de Cr en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.....	<b>334</b>
<b>Figura 186.</b> Mapeo elemental de Cu en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.....	<b>334</b>
<b>Figura 187.</b> Mapeo elemental de Mn en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.....	<b>335</b>
<b>Figura 188.</b> Mapeo elemental de Pb en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.....	<b>335</b>
<b>Figura 189.</b> Mapeo elemental de Zn en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.....	<b>335</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Concentración de metales pesados disueltos en la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>24</b>
<b>Tabla 2.</b> Comparación entre las concentraciones de referencia señalados en la NOM-147 y los valores medios de los suelos de la zona afectada.....	<b>25</b>
<b>Tabla 3.</b> Climas y su superficie en la cuenca del río Sonora.....	<b>30</b>
<b>Tabla 4.</b> Concentraciones máximas y mínimas de metales en muestras de sedimentos de arroyos de la cuenca del río Sonora.....	<b>36</b>
<b>Tabla 5.</b> Valores de capacidad de intercambio iónico y superficie específica en los diferentes grupos de arcilla.....	<b>41</b>
<b>Tabla 6.</b> Valores del punto de carga cero para humus y algunos minerales.....	<b>43</b>
<b>Tabla 7.</b> Atributos de los principales elementos potencialmente tóxicos presentes en suelos y sedimentos.....	<b>55</b>
<b>Tabla 8.</b> Ubicación de las columnas inalteradas de suelos y sedimentos.....	<b>60</b>
<b>Tabla 9.</b> Punto de carga cero de algunos minerales.....	<b>63</b>
<b>Tabla 10.</b> Diferentes eventos de riego en cada columna.....	<b>66</b>
<b>Tabla 11.</b> Límites de Detección (LD) del equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X.....	<b>73</b>
<b>Tabla 12.</b> Descripción del nivel de contaminación de suelos/sedimentos según la clasificación del Igeo.....	<b>74</b>
<b>Tabla 13.</b> Número de secciones delgadas elaboradas y su profundidad en cada columna.....	<b>79</b>
<b>Tabla 14.</b> Resultados del análisis físico (color, textura y conductividad hidráulica) en muestras superficiales de suelos y sedimentos de la parte alta de la cuenca del río Sonora.....	<b>93</b>
<b>Tabla 15.</b> Resultados del análisis físico (densidad aparente, densidad real, porosidad y superficie específica) en muestras superficiales de suelos y sedimentos de la parte alta de la cuenca del río Sonora.....	<b>94</b>
<b>Tabla 16.</b> Evaluación de la conductividad hidráulica según la FAO.....	<b>95</b>
<b>Tabla 17.</b> Contenido aproximado de carbonatos en las muestras superficiales.....	<b>97</b>
<b>Tabla 18.</b> Contenido de carbono total en las muestras superficiales.....	<b>99</b>
<b>Tabla 19.</b> Evaluación del contenido de carbono orgánico en suelos.....	<b>99</b>
<b>Tabla 20.</b> Características de la muestra compuesta de la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>101</b>
<b>Tabla 21.</b> Composición química del derrame de solución ácida ferrocuprífera del represo “Tinajas 1” determinada por CONAGUA el 8 de Agosto de 2014.....	<b>102</b>
<b>Tabla 22.</b> Resumen del balance de masas en la columna de suelo Tinajas en los riegos con la solución ácida.....	<b>133</b>
<b>Tabla 23.</b> Resumen del balance de masas en la columna de sedimento El Álamo en los riegos con la solución ácida.....	<b>134</b>
<b>Tabla 24.</b> Resumen del balance de masas en la columna de sedimento Chilolo en el riego con la solución ácida.....	<b>135</b>
<b>Tabla 25.</b> Resumen del balance de masas en la columna de suelo Bacanuchi.....	<b>136</b>
<b>Tabla 26.</b> Balances de masa para Pb en cada columna utilizando la concentración determinada por CONAGUA.....	<b>137</b>
<b>Tabla 27.</b> Resumen del primer riego en cada una de las columnas analizadas.....	<b>138</b>
<b>Tabla 28.</b> Potenciales redox en reacciones de elementos metálicos.....	<b>147</b>
<b>Tabla 29.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego en la base de la columna Tinajas.....	<b>148</b>
<b>Tabla 30.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego a 3 y 10 cm en la columna Tinajas.....	<b>149</b>
<b>Tabla 31.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el segundo riego en la base de la columna Tinajas.....	<b>150</b>
<b>Tabla 32.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el tercer riego en la base de la columna Tinajas.....	<b>151</b>
<b>Tabla 33.</b> Puntos graficados en el diagrama Eh vs pH para el tercer riego a 16 cm en la columna Tinajas.....	<b>152</b>
<b>Tabla 34.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el cuarto riego en la base de la columna Tinajas.....	<b>153</b>
<b>Tabla 35.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego en la base de la columna El Álamo.....	<b>154</b>
<b>Tabla 36.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego a 3 y 15 cm en la columna El Álamo.....	<b>155</b>
<b>Tabla 37.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el segundo riego en la base de la columna El Álamo.....	<b>156</b>

<b>Tabla 38.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el tercer riego en la base de la columna El Álamo.....	<b>157</b>
<b>Tabla 39.</b> Puntos graficados en el diagrama Eh vs pH para el tercer riego a 16 cm en la columna El Álamo.....	<b>158</b>
<b>Tabla 40.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el cuarto riego en la base de la columna El Álamo.....	<b>159</b>
<b>Tabla 41.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego en la base de la columna Chilolo.....	<b>160</b>
<b>Tabla 42.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego a 2.5 y 5 cm en la columna Chilolo.....	<b>161</b>
<b>Tabla 43.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el segundo riego en la base de la columna Chilolo.....	<b>162</b>
<b>Tabla 44.</b> Puntos graficados en el diagrama Eh vs pH para el segundo riego a 2.5 cm en la columna Chilolo.....	<b>163</b>
<b>Tabla 45.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego en la base de la columna Bacanuchi.....	<b>164</b>
<b>Tabla 46.</b> Puntos graficados en el diagrama Eh vs pH para el primer riego a 3 cm en la columna Bacanuchi.....	<b>165</b>
<b>Tabla 47.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el segundo riego en la base de la columna Bacanuchi.....	<b>165</b>
<b>Tabla 48.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el segundo riego a 12.5 cm en la columna Bacanuchi.....	<b>166</b>
<b>Tabla 49.</b> Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el tercer riego en la base de la columna Bacanuchi.....	<b>167</b>
<b>Tabla 50.</b> Modelación geoquímica Columna de suelo Tinajas.....	<b>172</b>
<b>Tabla 51.</b> Modelación geoquímica Columna de sedimento El Álamo.....	<b>173</b>
<b>Tabla 52.</b> Modelación geoquímica Columna de sedimento Chilolo, riego 1.....	<b>174</b>
<b>Tabla 53.</b> Modelación geoquímica Columna de sedimento Chilolo, riego 2.....	<b>175</b>
<b>Tabla 54.</b> Modelación geoquímica Columna de suelo Bacanuchi, riego 1.....	<b>176</b>
<b>Tabla 55.</b> Modelación geoquímica Columna de suelo Bacanuchi, riego 2.....	<b>177</b>
<b>Tabla 56.</b> Concentración total de EPT (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn), Ca y S en muestras superficiales antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>182</b>
<b>Tabla 57.</b> Valores naturales de fondo en sedimentos de la región de estudio.....	<b>183</b>
<b>Tabla 58.</b> Resumen de las muestras que superan los valores de fondo naturales de los diferentes EPT en la región de estudio.....	<b>192</b>
<b>Tabla 59.</b> Fases minerales identificadas en el suelo Tinajas antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>200</b>
<b>Tabla 60.</b> Fases minerales identificadas en el sedimento El Álamo antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>202</b>
<b>Tabla 61.</b> Fases minerales identificadas en el sedimento Chilolo antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>204</b>
<b>Tabla 62.</b> Fases minerales identificadas en el suelo Bacanuchi antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>206</b>
<b>Tabla 63.</b> Análisis colorimétrico en el suelo Tinajas antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>210</b>
<b>Tabla 64.</b> Análisis colorimétrico en el sedimento El Álamo antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>211</b>
<b>Tabla 65.</b> Análisis colorimétrico en el sedimento Chilolo antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>212</b>
<b>Tabla 66.</b> Análisis colorimétrico en el suelo Bacanuchi antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.....	<b>214</b>
<b>Tabla 67.</b> Valores de fondo de EPT para aguas superficiales en la zona de estudio.....	<b>216</b>
<b>Tabla 68.</b> Concentración soluble de EPT después de las pruebas de extracción con agua en equilibrio con CO <sub>2</sub> .....	<b>216</b>
<b>Tabla 69.</b> Análisis morfométrico en secciones delgadas del suelo Tinajas.....	<b>227</b>
<b>Tabla 70.</b> Análisis morfométrico en secciones delgadas del sedimento El Álamo.....	<b>229</b>
<b>Tabla 71.</b> Análisis morfométrico en secciones delgadas del sedimento Chilolo.....	<b>231</b>
<b>Tabla 72.</b> Análisis morfométrico en el suelo Bacanuchi.....	<b>233</b>
<b>Tabla 73.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.....	<b>236</b>

<b>Tabla 74.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.....	<b>237</b>
<b>Tabla 75.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.....	<b>239</b>
<b>Tabla 76.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.....	<b>240</b>
<b>Tabla 77.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.....	<b>242</b>
<b>Tabla 78.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.....	<b>243</b>
<b>Tabla 79.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.....	<b>245</b>
<b>Tabla 80.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.....	<b>246</b>
<b>Tabla 81.</b> Significado de los colores en relación al % de cada elemento en el mapeo elemental realizado con la técnica de microsonda electrónica de barrido.....	<b>253</b>
<b>Tabla 82.</b> Resultados del mapeo elemental en el área analizada del sedimento El Álamo (4-8 cm).....	<b>253</b>
<b>Tabla 83.</b> Resultados del mapeo elemental en el área analizada del suelo Bacanuchi (12-16 cm).....	<b>254</b>
<b>Tabla 84.</b> Dimensiones y volumen de poro en las columnas inalteradas utilizadas en los experimentos de movilidad de elementos potencialmente tóxicos.....	<b>292</b>
<b>Tabla 85.</b> Exactitud de los análisis con Till-4 como material de referencia.....	<b>293</b>
<b>Tabla 86.</b> Exactitud de los análisis con Montana 2710 a como material de referencia.....	<b>294</b>
<b>Tabla 87.</b> Precisión en los análisis de FRX para la columna de suelo Tinajas.....	<b>295</b>
<b>Tabla 88.</b> Precisión en los análisis de FRX para la columna de sedimento El Álamo.....	<b>296</b>
<b>Tabla 89.</b> Precisión en los análisis de FRX para la columna de sedimento Chilolo.....	<b>297</b>
<b>Tabla 90.</b> Precisión en los análisis de FRX para la columna de suelo Bacanuchi.....	<b>298</b>
<b>Tabla 91.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Tinajas durante el primer riego.....	<b>299</b>
<b>Tabla 92.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Tinajas durante el segundo riego.....	<b>300</b>
<b>Tabla 93.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Tinajas durante el tercer riego.....	<b>301</b>
<b>Tabla 94.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Tinajas durante el cuarto riego.....	<b>301</b>
<b>Tabla 95.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna El Álamo durante el primer riego.....	<b>302</b>
<b>Tabla 96.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna El Álamo durante el segundo riego.....	<b>303</b>
<b>Tabla 97.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna El Álamo durante el tercer riego.....	<b>304</b>
<b>Tabla 98.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna El Álamo durante el cuarto riego.....	<b>304</b>
<b>Tabla 99.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Chilolo durante el primer riego.....	<b>305</b>
<b>Tabla 100.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Chilolo durante el segundo riego.....	<b>305</b>
<b>Tabla 101.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Bacanuchi durante el primer riego.....	<b>306</b>
<b>Tabla 102.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Bacanuchi durante el segundo riego.....	<b>307</b>
<b>Tabla 103.</b> Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Bacanuchi durante el tercer riego.....	<b>307</b>
<b>Tabla 104.</b> % retenido de los EPT en cada columna usando balance de masas.....	<b>308</b>
<b>Tabla 105.</b> Resumen estadístico en la columna de suelo Tinajas.....	<b>309</b>
<b>Tabla 106.</b> Resumen estadístico en la columna de sedimento El Álamo.....	<b>310</b>
<b>Tabla 107.</b> Resumen estadístico en la columna de sedimento Chilolo.....	<b>311</b>
<b>Tabla 108.</b> Resumen estadístico en la columna de suelo Bacanuchi.....	<b>312</b>
<b>Tabla 109.</b> Balance catiónico-aniónico en la columna de suelo Tinajas.....	<b>317</b>



<b>Tabla 110.</b> Balance catiónico-aniónico en la columna de sedimento El Álamo.....	<b>317</b>
<b>Tabla 111.</b> Balance catiónico-aniónico en la columna de sedimento Chilolo.....	<b>318</b>
<b>Tabla 112.</b> Balance catiónico-aniónico en la columna de suelo Bacanuchi.....	<b>318</b>
<b>Tabla 113.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 8-12 cm.....	<b>319</b>
<b>Tabla 114.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>320</b>
<b>Tabla 115.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 16-20 cm.....	<b>321</b>
<b>Tabla 116.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 8-12 cm.....	<b>322</b>
<b>Tabla 117.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>323</b>
<b>Tabla 118.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 16-20 cm.....	<b>324</b>
<b>Tabla 119.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 8-12 cm.....	<b>325</b>
<b>Tabla 120.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>326</b>
<b>Tabla 121.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 16-20 cm.....	<b>327</b>
<b>Tabla 122.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 8-12 cm.....	<b>328</b>
<b>Tabla 123.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.....	<b>329</b>
<b>Tabla 124.</b> Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 16-20 cm.....	<b>330</b>

## ÍNDICE DE ECUACIONES

---

<b>Ecuación 1.</b> Cálculo del coeficiente de distribución (Kd).....	<b>47</b>
<b>Ecuaciones 2-6.</b> Determinación de la retención de EPT por medio de balances de masa.....	<b>67</b>
<b>Ecuación 7.</b> Masa liberada de cada EPT en el segundo riego con CaCl <sub>2</sub> .....	<b>68</b>
<b>Ecuación 8.</b> Determinación de la retención de cada EPT considerando el área bajo la curva.....	<b>69</b>
<b>Ecuaciones 9-10.</b> Determinación del Eh.....	<b>70</b>
<b>Ecuación 11.</b> Determinación del Índice de Saturación (IS).....	<b>71</b>
<b>Ecuación 12.</b> Cálculo del Índice de Geoacumulación (Igeo).....	<b>73</b>
<b>Ecuación 13.</b> Determinación del índice de pérdida o enriquecimiento relativo de cada fase mineral (Imineral).....	<b>75</b>
<b>Ecuación 14.</b> Cuantificación de las diferencias de color entre las muestras analizadas.....	<b>76</b>
<b>Ecuaciones 15-17.</b> Determinación textural de muestras superficiales .....	<b>286</b>
<b>Ecuación 18.</b> Cálculo de la densidad aparente.....	<b>289</b>
<b>Ecuación 19.</b> Cálculo de la densidad real.....	<b>290</b>
<b>Ecuación 20.</b> Cálculo de la porosidad.....	<b>290</b>
<b>Ecuaciones 21-22.</b> Determinación de la exactitud del análisis de Fluorescencia de Rayos X.....	<b>293</b>
<b>Ecuación 23.</b> Determinación de la precisión del análisis de Fluorescencia de Rayos X.....	<b>294</b>

## ÍNDICE DE REACCIONES

---

Reacción 1. $\text{H}_3\text{AsO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_3\text{AsO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (0.57 V).....	146
Reacción 2. $\text{H}_3\text{AsO}_3 + 3\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{As(s)} + 3\text{H}_2\text{O}$ (0.24 V).....	146
Reacción 3. $\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu(s)}$ (0.51 V).....	146
Reacción 4. $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu(s)}$ (0.34 V).....	146
Reacción 5. $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$ (0.77V).....	146
Reacción 6. $\text{MnO}_4^- + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{MnO}_4^{2-}$ (0.56 V).....	146
Reacción 7. $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ .....	149
Reacción 8. $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ .....	207
Reacción 9. $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ .....	207
Reacción 10. Ferrihidrita: $\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe(OH)}_{3(\text{s})} + \text{H}^+$ .....	208
Reacción 11. Jarosita: $\text{K}^+ + 3\text{Fe}^{3+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 6\text{H}^+$ .....	208
Reacción 12. Schwermanita: $8\text{Fe}^{3+} + \text{SO}_4^{2-} + 14\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6(\text{SO}_4) + 22\text{H}^+$ .....	208

## GLOSARIO

---

- **Capacidad amortiguadora:** Se define como la aptitud de un suelo o sedimento para controlar los efectos negativos de contaminantes y permitir que estos sean inocuos al medio ambiente. Esta capacidad depuradora depende de muchas características físicas, químicas y biológicas de los suelos y sedimentos (Galán-Huertos y Romero Baena, 2008).
- **Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT):** Se refiere a aquellos metales y metaloides de importancia ambiental y/o toxicológica, principalmente arsénico (As), berilio (Be), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), plomo (Pb), selenio (Se), vanadio (V) y zinc (Zn), que de acuerdo a su concentración y movilidad en suelos y sedimentos pueden representar una amenaza para el medio ambiente. (Volke-Sepúlveda et al., 2005).
- **Geodisponibilidad:** Es la fracción del contenido total de un elemento o compuesto químico de un material terrestre, que puede ser liberado al ambiente mediante procesos biológicos, químicos o mecánicos. (Smith y Huyck, 1999).
- **Movilidad de EPT:** Esta hace referencia a la migración de contaminantes hacia el suelo u otros medios. En general se relaciona a las vías por las cuales los metales se pueden distribuir y quedar retenidos en el suelo, incorporarse a la cadena trófica mediante la absorción de las plantas, volatilizarse a la atmósfera o bien, desplazarse hacia las aguas superficiales o subterráneas (Zorrilla, 2011).
- **Peligro:** Propiedad inherente de algunas sustancias químicas que pueden representar un riesgo para el medio ambiente, la salud o los recursos naturales debido a sus características tóxicas (LGEEPA, 2012).
- **Retención de EPT:** Se refiere a la capacidad de un suelo o sedimento para inmovilizar sustancias contaminantes por medio de diferentes procesos físicos, químicos y/o biológicos (Galán-Huertos y Romero Baena, 2008).
- **Riesgo ambiental:** Probabilidad o posibilidad de que el manejo, la liberación al ambiente y la exposición a un material, ocasionen efectos adversos en la salud humana, en los demás organismos vivos, en el agua, aire, suelo, en los ecosistemas, o en los bienes y propiedades pertenecientes a los particulares (LGPGIR, 2006).
- **Valores de fondo naturales:** Es el promedio o nivel típico de una sustancia química en el medio ambiente. Se refiere a los niveles de un elemento químico en una región en particular, que ocurren de forma natural sin ningún tipo de contaminación asociada (Herrmann y Zappettini, 2014).
- **Zona no saturada:** Representa la parte del terreno que se sitúa entre la superficie topográfica y un acuífero. Es la zona de transferencia de materia y de energía entre la atmósfera y las aguas subterráneas. Es un medio en el que se almacena agua, nutrientes y sustancias contaminantes, dando lugar a una dinámica tan compleja como trascendente para los ecosistemas, la agricultura, los recursos hídricos y, en general, el medio ambiente (Red Académica y de investigación nacional, 2002).

## **RESUMEN**

---

Como resultado de accidentes mineros e industriales en el medio ambiente, es necesario comprender los procesos que tienen lugar cuando una solución contaminante está en contacto con suelos y / o sedimentos. En este trabajo en particular, se evaluaron los impactos de una solución ácida que se derramó en agosto de 2014 en el arroyo Tinajas, ubicado en la parte superior de la cuenca del río Sonora en el noroeste de México. La solución ácida presentaba una alta concentración disuelta de elementos potencialmente tóxicos (EPT), entre los que se encontraban Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. En este trabajo se evaluó si los suelos en el lecho del río y la llanura de inundación tenían la capacidad de retener diferentes elementos potencialmente tóxicos debido a diferentes procesos, principalmente debido a la precipitación química de fases secundarias de hierro que promueven la retención de elementos potencialmente tóxicos.

Para probar esta hipótesis, después del derrame se realizó un extenso esfuerzo de campaña in situ para recopilar información, incluida la caracterización de perfiles de excavación de 2 a 3 metros de profundidad y la recolección de columnas de suelo y sedimento. En total, se excavaron 4 perfiles de excavación en sitios ubicados a una distancia de entre 6.7 a 40 km al sur del lugar donde ocurrió el derrame. Con la intención de conocer la capacidad de amortiguamiento y la movilidad de EPT en suelos y sedimentos de la parte alta de la cuenca del río Sonora en sitios no afectados por el derrame, se obtuvieron columnas inalteradas y muestras superficiales no contaminadas de suelos y sedimentos, dichas columnas y muestras se tomaron a 6.7, 14, 24.5 y 40.3 kilómetros del sitio del derrame. De acuerdo al sitio de donde fueron tomadas, dichas columnas fueron denominadas: Tinajas, El Álamo, Chilolo y Bacanuchi, respectivamente, siendo la primera y última columnas de suelo y la segunda y tercera columnas de sedimento. Estas columnas se usaron para simular la infiltración de la solución ácida derramada desde la mina en condiciones reales. Se monitorearon diferentes parámetros tales como el pH, conductividad eléctrica, potencial redox y la concentración de elementos potencialmente tóxicos en lixiviados recolectados en la base de las columnas y a diferentes profundidades de las mismas. Se realizaron varios pulsos de infiltración de la solución ácida para determinar la capacidad amortiguadora máxima de cada columna y para promover cambios físicos y químicos resultantes de la interacción de la solución ácida y los diferentes componentes de las columnas extraídas.

Los resultados de los perfiles del suelo (excavaciones) mostraron la presencia de un precipitado de tono amarillo que se observó a diferentes profundidades, así como un cambio en la granulometría, la cual disminuyó gradualmente en relación con la distancia desde el sitio del derrame, ejerciendo un control en la humedad y la conductividad eléctrica de los diferentes perfiles analizados. Se observó una marcada disminución en el pH a profundidad y una mayor concentración total de elementos como Fe, Mn, Pb y Zn en los perfiles más cercanos al sitio del derrame. Por su parte, se observó un aumento en los valores de pH y en la concentración de Ca, junto con una disminución en la concentración de Fe, Mn, Pb y Zn en los perfiles más alejados.

Los resultados de las simulaciones realizadas en las columnas revelaron que después del paso de la solución ácida, se observaron cambios de color en todas las columnas, evidenciando cambios físicos y químicos resultantes de la interacción de la solución ácida con los diferentes componentes de los suelos y sedimentos estudiados.

Todas las columnas analizadas presentan condiciones para la retención de los elementos potencialmente tóxicos en diferentes proporciones. La columna más alejada al sitio del derrame, denominada Bacanuchi, presentó la máxima capacidad de retención de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn, siendo igual al 100% incluso después de dos pulsos de infiltración. Esta columna presenta la capacidad de neutralizar la acidez de la solución ácida, debido a la presencia de minerales carbonatados (no determinados en los otros sitios) lo que facilita la precipitación de fases secundarias de Fe y Al que producen una mayor retención de los elementos potencialmente tóxicos en comparación a las otras columnas. Esto a su vez está asociado a cambios de color exhibidos durante las simulaciones.

Mediante Fluorescencia de Rayos X se observó que algunos EPT superan los valores de fondo de la zona de estudio, entre ellos Fe y Cu, principalmente en la columna de suelo Bacanuchi. Esto puede estar relacionado a la capacidad de retención de este suelo, lo cual implica el aumento en la concentración total de estos elementos.

Por medio de diagramas de Eh vs pH y modelación geoquímica tomando en cuenta las características químicas de varios de los lixiviados colectados en la base y a diferentes profundidades de las columnas después de los riegos, se infirió la formación y estabilidad de minerales como yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y minerales secundarios de hierro como ferrihidrita ( $\text{Fe}_{10}^{3+}\text{O}_{14}(\text{OH})_2$ ) y jarosita ( $\text{KFe}_3^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), confirmándose su presencia por medio de Difracción de Rayos X en muestras analizadas después del paso de la solución ácida. Por medio de análisis micromorfológicos, morfométricos y químicos mediante el uso de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y microsonda electrónica, se confirmó la precipitación de minerales de hierro, los cuales, junto con filosilicatos, favorecen la retención de los EPT.

Finalmente, con el uso de tomografía de rayos X, se observó que en las columnas de suelo Tinajas y la columna de sedimento El Álamo existieron cambios en la estructura de ambas matrices, debido al poder erosivo de la solución ácida, provocando cambios en la porosidad en varias profundidades de las columnas analizadas.

Este estudio demuestra por medio del uso de columnas inalteradas, que la movilidad de elementos potencialmente tóxicos en suelos y sedimentos puede atenuarse por la existencia de fenómenos que promueven la precipitación química de precipitados de hierro, los cuales a su vez facilitan la retención de estos contaminantes.

Estos resultados son de gran importancia porque pueden ayudar a desarrollar estrategias de mitigación y monitoreo, ayudando a priorizar los esfuerzos en las áreas más vulnerables y aquellas que fueron más afectadas por el derrame.

## **ABSTRACT**

---

As a result of mining and industrial accidents in the environment, there is a need to better understand the processes that take place when a polluting solution is in contact with soils and/or sediments. In this particular work, we evaluate the impacts of an acid solution that was spilled in August 2014 on the Tinajas stream, located in the upper part of the Sonora River basin in northwest Mexico. The acid solution had a high dissolved concentration of potentially toxic elements, among which were Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn. Here we evaluate if the soils in the river bed and floodplain had the ability to retain different potentially toxic elements due to different processes, mainly due to the chemical precipitation of iron precipitates that promote the retention of potentially toxic elements.

To test our hypothesis an extensive on-site field campaign effort was conducted after the spill to gather information, including the characterization of 2-3 meter deep excavation profiles and the collection of soil columns as well as uncontaminated surface samples from soils and sediments in the river bed and in the surrounding floodplain. In total, 4 excavation profiles were dug in sites located at a distance ranging from 6.7 to 40 km south of where the spill occurred. To learn more about the damping capacity and the mobility of potentially toxic elements in soils and sediments in sites not affected by the spill, unaltered columns were extracted at 7, 14, 25 and 40 kilometers from the site of the spill. The columns were named according to the sites they were taken from north to south: Tinajas, El Álamo, Chilolo and Bacanuchi. The first and last columns contained soil from the floodplain and the second and third columns sediment from the river bed. These columns were used to simulate real conditions and to find out the buffering capacity of the soils and sediments of the affected area. Infiltration simulations were conducted on the soil columns using the acid solution that was spilled from the mine. Different parameters were monitored such as pH, electrical conductivity, redox potential and concentration of potentially toxic elements in leachates collected at the base of the columns and at different depths of the columns. Several pulses of infiltration of the acid solution were applied in order to determine the maximum buffering capacity of each column and to promote physical and chemical changes resulting from the interaction of the acid solution and the different soils contained in the extracted columns.

Results from the soil profiles (excavations) showed the presence of a yellow toned precipitate that was observed at different depths as well as a change in granulometry, which gradually decreased in relation to the distance from the site of the spill, exerting a control on the humidity and electrical conductivity of the different profiles analyzed. Low pH values and high concentrations of elements like Fe, Mn, Pb and Zn were evident in the profiles closest to the site of the spill, as well as an increase in the pH value and the concentration of Ca, together with a decrease in the concentration of Fe, Mn, Pb and Zn in the furthest away excavation profiles.

The results of the simulations conducted in the columns revealed that after the passage of the acid solution, color changes were observed in all of the columns, showing physical and chemical changes resulting from the interaction of the acid solution with the different components of the soils and sediments studied.

All the columns tested revealed that there are conditions for the retention of the potentially toxic elements in different proportions. The Bacanuchi column had the maximum retention capacity of Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn is 100% even after two pulses of infiltration. This Bacanuchi soil column was found to have the ability to neutralize the pH of the acid solution due to the presence of carbonated minerals (not found in the other sites) which facilitates the precipitation of secondary phases of Fe and Al that produce the highest retention of the potentially toxic elements. This in turn is associated with the changes in color exhibited during the simulations.

Using X-ray fluorescence, it was observed that some potentially toxic elements exceed the background values of the study area, including Fe and Cu, mainly in the Bacanuchi soil column, this result can be related to the retention capacity of this soil, which resulted in the increase in the total concentration of these elements.

Eh Vs pH diagrams were used to infer about the formation and stability of minerals. Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and secondary minerals of iron such as Ferrihydrite ( $\text{Fe}_{10}^{3+}\text{O}_{14}(\text{OH})_2$ ) and Jarosite ( $\text{KFe}_3^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) were identified by X-ray diffraction. We confirmed the precipitation of iron metals using micromorphological, morphometric and chemical analyses through the use of optical microscopy, a scanning electron microscopy and electron microprobe.

Finally, with the use of X-ray tomography, we were able to confirm that the acid solution erosive power caused changes in the structure and porosity of the Tinajas and El Álamo columns.

This study demonstrated that the use of unaltered columns allowed us to better understand the mobility of potentially toxic elements in soils and sediments. It also showed that the mobility of these elements can be attenuated by the existence of phenomena that promote the chemical precipitation of iron precipitates which in turn facilitate the retention of these pollutants.

These results are of great importance because it will help develop mitigation and monitoring strategies and help prioritize efforts in the areas that are most vulnerable and those that were most affected by the spill.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

El 6 de agosto de 2014, en la mina "Buenavista del Cobre" (ubicada en Cananea, Sonora) se derramaron del represo denominado "Tinajas 1" alrededor de 40,000 m<sup>3</sup> de solución ácida enriquecida en cobre, hierro y otros EPT disueltos, dicha solución es denominada como "solución ácida ferrocuprífera". Este evento sucedió en la época de lluvias de verano de la región, y posterior a él, se presentaron dos eventos ciclónicos que produjeron lluvias extraordinarias, los días del 5 al 9 de septiembre por el huracán Norberto y del 17 al 18 de septiembre por el huracán Odile. Ambos eventos meteorológicos influyeron de forma determinante en los procesos de transporte y destino de lixiviados en los afluentes y cauce principal del río Sonora (Instituto de Geología, 2016).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), informó sobre las concentraciones de metales pesados disueltos en la solución ácida, dichas concentraciones se muestran en la tabla 1 (Gutiérrez y Romero, 2015).

**Tabla 1. Concentración de metales pesados disueltos en la solución ácida ferrocuprífera (Gutiérrez y Romero, 2015).**

Elemento	Concentración (mg/L)	Elemento	Concentración (mg/L)
Fe	1080	As	42.7
Al	461	Ni	11
Cu	114	Cd	7.8
Mn	98	Pb	2.5
Zn	51	Cr	1.5

Según información de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la solución derramada pudo haber alcanzado cuerpos de agua superficial cercanos a la mina, principalmente: arroyo Tinajas (17.6 km), el río Bacanuchi (64 km) y el río Sonora (190 km), el cual drena a la presa El Molinito, la cual abastece de agua a la ciudad de Hermosillo, capital del estado sonorense (SEMARNAT, 2014). No obstante, con el fin de mitigar el impacto ambiental del derrame se construyó un bordo de contención de 120 m de longitud, 80 m de ancho y 15 m de altura sobre el cauce del arroyo Tinajas a 7 km aguas abajo del sitio del derrame. De igual forma, se aplicaron 250 toneladas de gravilla de cal en diferentes sitios del arroyo Tinajas y del río Bacanuchi con el fin de neutralizar la acidez de la solución (Instituto de Geología, 2016).

Los primeros informes de estudios realizados después del derrame indicaron que el agua superficial afectada por la solución ácida fue neutralizada una semana después del derrame. Tres meses más tarde se midieron concentraciones de metales pesados en aguas superficiales, demostrando que dichas concentraciones se encontraban por debajo de los

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

límites máximos permitidos establecidos por las regulaciones de agua potable NOM-127 (Semarnat, 2004) (ABC Analitic Report, 2014). Las concentraciones medidas de Fe, Al y Mn fueron altas, pero su concentración fue considerada como de origen natural, asociada a la fracción de arcilla  $\leq 0,45 \mu\text{m}$  (Gutiérrez y Romero, 2015).

En lo que respecta a suelos y sedimentos, la empresa Buenavista del Cobre realizó la remoción de aproximadamente  $6,093 \text{ m}^3$  de suelos y sedimentos afectados por el derrame, lo que permitió que la concentración de los elementos potencialmente tóxicos en dichas matrices se encontrará dentro del intervalo de los valores de fondo naturales de la región (Gutiérrez y Romero, 2015).

Se determinaron las concentraciones totales de varios elementos químicos en suelos y sedimentos afectados por el derrame de la solución ácida. Dichos análisis demuestran que las concentraciones totales de Al, Ba, Cr, Cu, Ni y Zn en sedimentos, son inferiores a los valores de fondo de la región, sin embargo, en la parte media de la cuenca los metales Fe, As, Mn y Pb superan los valores de fondo en sedimentos, no obstante dichos valores se asocian a zonas mineralizadas. Por su parte, los análisis en suelos reflejan que todos los elementos químicos regulados en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 están por debajo de los valores genéricos de referencia de la norma (Tabla 2). Para elementos como el Fe y Al que no están incluidos en la norma oficial mexicana se determinaron altas concentraciones, sin embargo son muy abundantes en la zona (Gutiérrez y Romero, 2015).

**Tabla 2. Comparación entre las concentraciones de referencia señalados en la NOM-147 y los valores medios de los suelos de la zona afectada. Tomado de Gutiérrez y Romero, 2015.**

Elemento	Concentraciones de referencia totales (CRT) Uso agrícola/residencial/comercial (NOM-147).	Valores medios en suelos de la zona afectada
	mg/kg	
Ba	5400	196.4
V	78	40.3
Pb	400	31.7
As	22	12.5
Ni	1600	11.7
Se	390	<5
Tl	5.2	<2.5
Cr VI	280	<1
Be	150	<1
Cd	37	<1
Ag	390	<1
Hg	23	<0.04

Ramos Pérez estudió la contaminación residual en suelos y sedimentos afectados por el derrame de la solución ácida, demostrando que la solución ácida ferrocuprífera modificó algunas propiedades fisicoquímicas en los suelos y sedimentos, principalmente un cambio en la coloración y un aumento en la conductividad eléctrica. De igual forma, identificó un enriquecimiento de ciertos metales en muestras afectadas por el derrame, principalmente Al, Fe, As y Cu, propiciado por su retención en los minerales presentes. En el mismo estudio se reportó la precipitación de minerales poco cristalinos de Fe y la formación de minerales de la clase de los sulfatos, principalmente yeso y jarosita como producto de la interacción de la solución ácida y los suelos y sedimentos de la región (Ramos Pérez, 2017).

Otros trabajos realizados en la zona afectada demostraron cambios químicos y micromorfológicos en los suelos impactados por la solución ácida ferrocuprífera. Los estudios micromorfológicos mostraron cambios en oxi-hidróxidos de Fe, precipitación de yeso y ausencia de carbonatos que son comunes en la zona, sugiriendo que dichos cambios son evidencia de la contaminación asociada al derrame (Díaz et al., 2015).

Para valorar la migración vertical de EPT y conocer su impacto en la calidad del agua subterránea que se utiliza para consumo humano es indispensable el estudio de la zona no saturada entre la superficie del terreno y el nivel de las aguas subterráneas, para lo cual los experimentos en columnas de suelos y sedimentos son una herramienta que permite entender y modelar de manera precisa los mecanismos de retención y/o liberación de los contaminantes procedentes del derrame. Hasta la fecha no existen estudios previos en columnas de suelos y/o sedimentos en la región afectada por el derrame de la solución ácida ferrocuprífera, por lo cual su implementación es de suma importancia para el entendimiento total en el comportamiento de los EPT asociados al derrame.

# CAPÍTULO 2

## GENERALIDADES DEL SITIO DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende la parte norte de la cuenca del río Sonora (Figura 1), la cual corresponde a la porción directamente afectada por el derrame de solución ácida ferrocuprífera cercano al poblado de Cananea, Sonora. En su totalidad la cuenca presenta un área de aproximadamente 28,885 km<sup>2</sup>, 14.7% de la superficie estatal (CONAGUA, 2007). La cuenca del río Sonora es de gran importancia para el estado del mismo nombre, ya que en ella se concentra la mayor parte de la población y de la actividad económica estatal (SAGARPA, 2005).

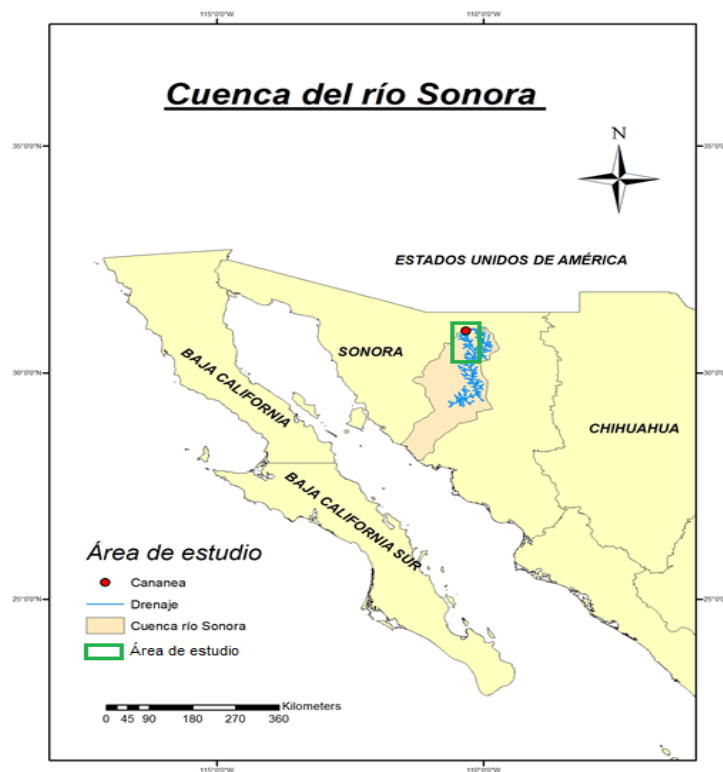


Figura 1. Localización del sitio de estudio correspondiente a la parte norte de la cuenca del río Sonora.

### 2.1 Hidrología

La cuenca del río Sonora se ubica en la porción centrooccidental del estado de Sonora, México. Su rasgo hidrográfico más notable es el río Sonora, que nace al oriente de Cananea a una altitud de 2,400 msnm, cuyas aguas son captadas por la presa Rodolfo Félix Valdez (El Molinito). En la parte alta de la cuenca se ubican las subcuencas y los acuíferos denominados Río Sonora, Río San Miguel y Río Zanjón. La ciudad de Hermosillo, capital

## CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL SITIO DE ESTUDIO

del estado, se localiza en la porción central de la cuenca y los acuíferos aledaños son Mesa del Seri-La Victoria y Santa Rosalía al E y La Poza al S de la ciudad (Vega-Granillo et al., 2011).

La cuenca del río Sonora se divide administrativamente en las siguientes subcuencas, (Figura 2):

1. Subcuenca del río Bacanuchi (9Dd).
2. Subcuenca río Sonora-Arizpe (9Dc).
3. Subcuenca Río Sonora-Banámichi (9Db).
4. Subcuenca de los ríos Zanjón (9Df).
5. Subcuenca San Miguel (9De).
6. Arroyo La Junta (9Dj).

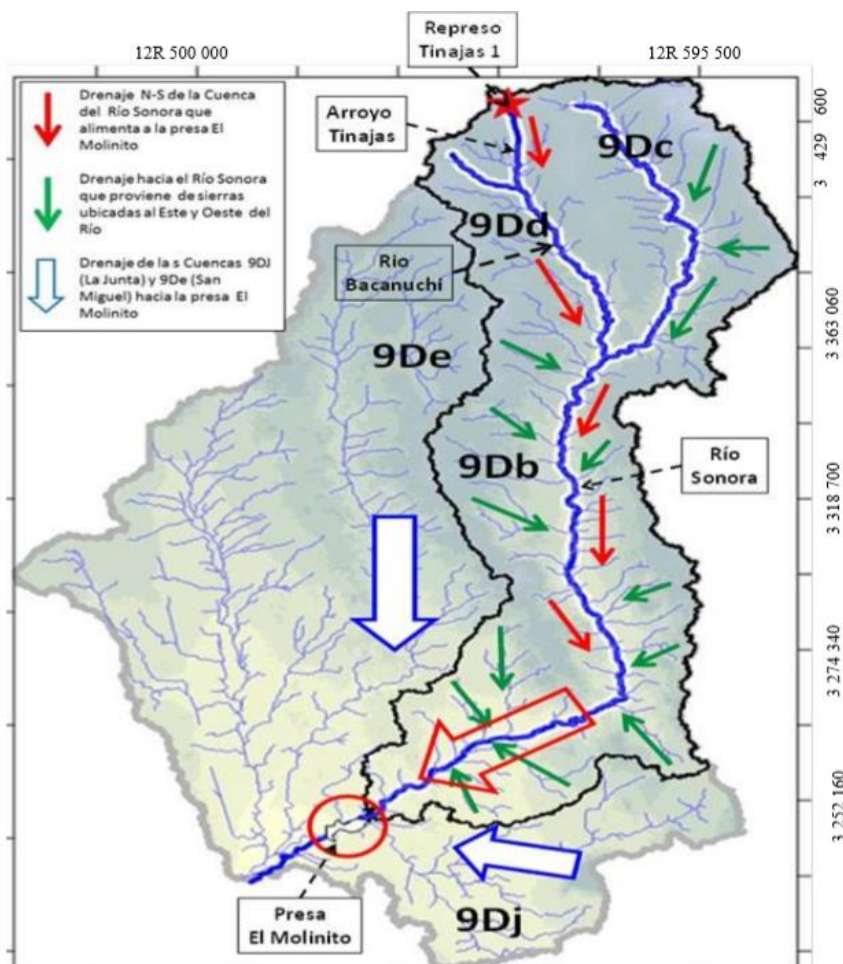


Figura 2. Red de drenaje de la cuenca del río Sonora y ubicación del represo “Tinajas 1”, de donde se derramaron aproximadamente 40,000 m<sup>3</sup> de solución ácida ferrocuprífera. Tomado de Gutiérrez y Romero, 2015.

La cuenca del río Sonora inicia su desarrollo en las inmediaciones de la ciudad de Cananea, uniéndose a ella aguas abajo numerosos escurrimientos formados en el flanco oriental de la sierra del Manzanal y los del flanco occidental de la sierra de los Ajos (CONAGUA, 2009). El rumbo original del río Sonora es hacia el sureste con deflexiones al suroeste, recibiendo su primer afluente con el río Bacanuchi (9Dd), el cual recibe el aporte del arroyo Tinajas receptor del derrame de solución ácida del día 6 de Agosto del 2014. El río Bacanuchi tiene su origen en el parteaguas con el río Bacoachi, presenta un rumbo NW-SE hasta el rancho Santa Elena, donde cambia a N-S hasta su desembocadura con el río Sonora, al norte del poblado de Arizpe (CONAGUA, 2011). Después de esta confluencia, el río Sonora toma una dirección al sur y cruza por las poblaciones de Banámichi, Aconchi y Baviácora. A lo largo de este recorrido el río Sonora recibe numerosos tributarios que descienden de las partes altas y pasa por afloramientos de rocas fuertemente oxidadas de coloración rojiza típicas de óxidos de hierro. Al finalizar su recorrido, la corriente de agua del río Sonora llega a la presa El Molinito, en donde también drenan las corrientes de agua provenientes de la subcuenca 9Dj (Arroyo la Junta).

## **2.2 Hidrogeología**

Según Herrera-Salazar y Vega-Granillo (2005), el acuífero río Sonora está ubicado en un valle constituido por depósitos aluviales cuaternarios y por la Formación Báucarit (conglomerados, areniscas y limos) del Terciario, considerados como los principales transmisores y productores de agua, funcionando ambas unidades como acuíferos libres. Las rocas presentes en las montañas que limitan al valle son principalmente rocas volcánicas terciarias (derrames de basalto y andesita, toba soldada riolítica), con buena permeabilidad debido a la presencia abundante de fracturas, y rocas ígneas cretácicas (derrames de andesita, toba, brecha, granito, granodiorita), que por su intenso intemperismo y abundancia de fracturas pueden también ser buenas fuentes de recarga (Vega-Granillo et al., 2011).

En lo que respecta a otros datos de interés en la cuenca del río Sonora, la transmisividad varía entre 0.001 y 0.084 m<sup>2</sup>/s (CNA, 2002). La profundidad de los niveles estáticos medidos en el año 2004 se consideró como somera, variando entre 1.66 y 14.86 m. La familia de agua predominante en las partes altas de la cuenca del río Sonora es del tipo bicarbonatada cálcica (UNISON, 2005).

## **2.3 Clima**

Las características generales del clima en Sonora, vienen dadas por su ubicación latitudinal, la cual corresponde a un cinturón de zonas áridas distribuido alrededor del mundo, ello debido al sistema de alta presión que prevalece y que tiene como origen la confluencia de masas de aire frío y tropical, lo cual provoca cielos despejados y amplia exposición solar, efecto que conlleva al incremento de temperatura. Esta condición extratropical o de altas presiones, es la que propicia el tipo general de clima en la entidad, sin embargo, el panorama climático tiene sus matices, debido a la influencia local de los

## CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL SITIO DE ESTUDIO

componentes líquido (mar), sólidos (relieve) y gaseoso (atmósfera), mismos que propician variaciones en la precipitación, temperatura y evaporación, dando como resultado la gama climática de la entidad (INEGI, 1993).

El clima más extendido en la cuenca del río sonora es el clima desértico, BW, el cual cubre la llanura sonorensis, desde los 0 a 800 msnm; le siguen los esteparios, tanto el seco, BS<sub>0</sub>, como el semiseco, BS<sub>1</sub>, y finalmente los templados, tanto el subhúmedo, C(W<sub>0</sub>), como el semifrío, C(E) (CONAGUA, 2008). La tabla 3 muestra el resumen de los climas más usuales en la cuenca del río Sonora.

**Tabla 3. Climas y su superficie en la cuenca del río Sonora (CONAGUA, 2008).**

Clima	Subclima	Clave	Superficie (hm <sup>2</sup> )
Desértico		BW	2,233,839
Estepario	Seco	BS <sub>0</sub>	720,317
	Semiseco	BS <sub>1</sub>	917,078
Templado	Subhúmedo	C(W <sub>0</sub> )	6,723
	Semifrío	C ( E )	250
TOTAL			3, 878, 207

En lo que respecta a la parte norte de la cuenca del río Sonora, el clima es predominantemente seco y semiseco con lluvias en verano. La precipitación anual varió desde 338.2 mm hasta 513.9 mm en el lapso de 1982-2013. De acuerdo a datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), los valores más altos de lluvia se registran en los meses de julio (125-145 mm) y agosto (102-110 mm), disminuyendo en septiembre hasta valores entre 45 y 55 mm. No obstante, en el año 2014 se presentaron precipitaciones inusuales asociadas a dos eventos meteorológicos, los huracanes Norberto y Odile, los cuales pudieron haber ayudado a la dispersión y dilución de los metales asociados al derrame ocurrido en agosto del 2014 (Instituto de Geología, 2016).

### 2.4 Geología y mineralizaciones.

El estado de Sonora presenta afloramientos de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas que varían en edad desde el proterozoico hasta el cuaternario, en un entorno geológico muy complejo provocado por eventos tectónicos y deformaciones que han sucedido a través del tiempo. En lo que respecta a la parte norte de la cuenca del río Sonora, las rocas más antiguas constituyen el basamento de la región y tienen una edad del precámbrico, están representadas por rocas metamórficas derivadas de rocas ígneas y sedimentarias de 1800-1600 millones de años y por un conjunto de rocas del precámbrico tardío (1100 Ma) compuestas por rocas sedimentarias, cuarcitas y dolomitas que son discordantes a las rocas metamórficas antes mencionadas (Anderson y Silver, 1978, 1979, 1981; Cooper, et al, 1952).

## **CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL SITIO DE ESTUDIO**

---

En la región de Cananea y la sierra Los Ajos, afloran rocas precámbricas del terreno de Norteamérica de  $1680 \pm 20$  Ma, dichas rocas consisten en granitos, gneises y esquistos de las facies de esquistos verdes (Silver y Anderson, 1974).

El Mesozoico de Sonora está representado por una secuencia marina, con depósitos zoneados calcáreos, arcillo-calcáreos y arcillo-arenosos y otra continental areno-conglomerática. Afloran también rocas ígneas intrusivas y extrusivas de composición ácida a intermedia (CONAGUA, 2011).

El Jurásico está representado por una secuencia volcanosedimentaria constituida por rocas volcánicas, sedimentarias y plutónicas como consecuencia de un arco magmático sobre corteza continental emplazado a lo largo del megacizamiento Mojave-Sonora como resultado de una zona de subducción (Coney, 1980).

El Cretácico Inferior está representado por depósitos marinos del Grupo Bisbee (Jaques, et al., 1993), los cuales consisten de conglomerados, areniscas, limolitas, sedimentos volcanoclásticos y calizas que comprenden las siguientes formaciones: Conglomerado Glance, Formación Morita, Caliza Mural y Formación Cintura, que en conjunto alcanzan espesores de 800 a 2500 m (Araujo, 1993). Estas rocas afloran principalmente en Arizpe, Santa Ana y al norte de Cucurpe, donde contienen importantes depósitos de oro diseminado.

En el Cretácico Superior se presentan dos secuencias 1) una compuesta por andesitas, riolitas y tobas, la cual aflora al oeste del poblado de Tres Álamos y 2) otra compuesta por areniscas, limonitas, lutitas y conglomerados de edad Campaniano-Maastrichtiano, la cual aflora al sur del poblado de Bacoachi (CONAGUA, 2011).

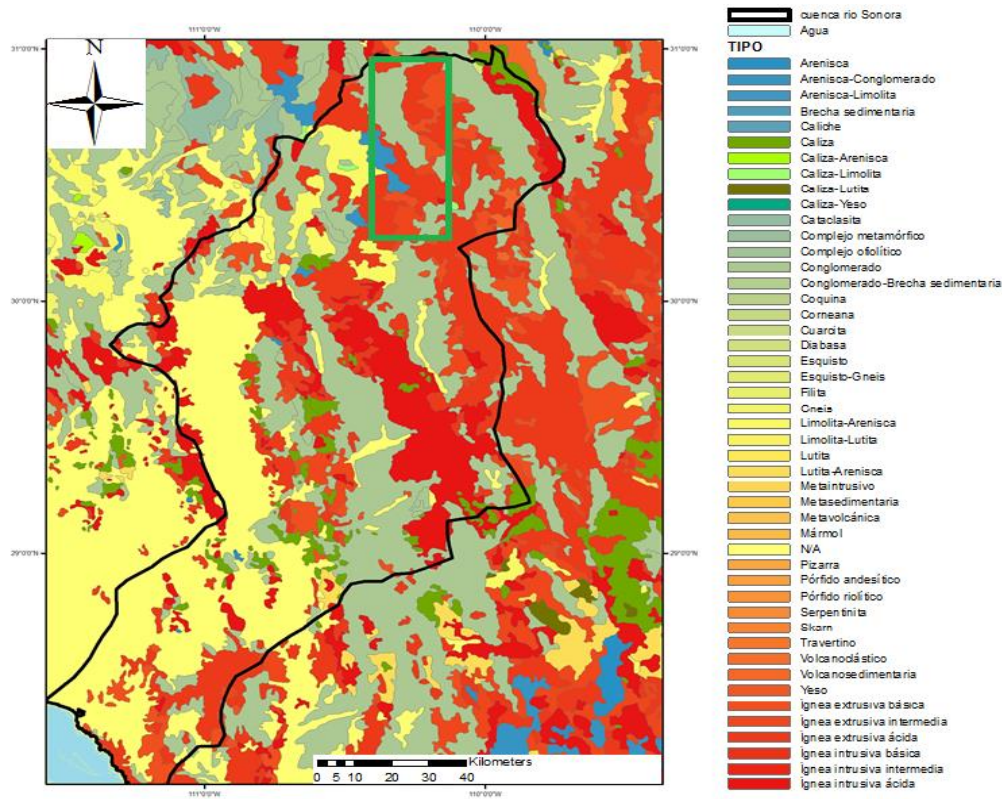
El Cenozoico en Sonora se caracteriza por una intensa actividad volcánica y depósitos clásticos de origen continental. Las rocas volcánicas del terciario se dividen en dos series, el Complejo Volcánico Inferior constituido principalmente por derrames andesíticos cuya edad varía de 100 a 45 Ma (Henry, 1975) cubiertas discordantemente por una gruesa cubierta de rocas volcánicas del Supergrupo Volcánico Superior formada por ignimbritas y tobas riolíticas con intercalaciones de lavas basálticas que tienen una edad de 32 a 23 Ma (Oligoceno-Mioceno temprano) y que dieron origen a la Provincia Volcánica de la Sierra Madre Occidental.

En lo que corresponde al cuaternario se presentan secuencias correspondientes a depósitos aluviales de granulometría y composición diversa. Estas secuencias descansan discordantemente sobre rocas más antiguas, pero en mayor proporción sobre rocas del Paleógeno y Neógeno. En el Cuaternario se depositaron potentes paquetes de sedimentos continentales, con presencia de esporádicos derrames de basaltos y aparatos volcánicos constituidos por basaltos de olivino, andesitas basálticas y conglomerados (CONAGUA, 2011).

La figura 3 muestra los principales tipos de rocas que afloran en toda la cuenca del río Sonora.



## CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL SITIO DE ESTUDIO



**Figura 3. Mapa geológico de la cuenca del río Sonora. Elaborado mediante información digital obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En el cuadro verde se señala la localización de la zona de estudio en este trabajo, correspondiente a la parte alta de la cuenca del río Sonora.**

La abundante actividad magmática ocurrida durante el final del Mesozoico y el inicio del Cenozoico a lo largo de la cordillera oeste de Norte América, produjo el emplazamiento de numerosos centros de mineralización de tipo pórfido de cobre (Figura 4). Esta actividad se extendió también por todo el occidente de México, particularmente por la región noroeste del país. Esta región junto a las regiones aledañas de Arizona y Nuevo México, en el suroeste de los Estados Unidos, constituye uno de los centros con mineralización de cobre más importantes en el mundo. La mayor parte de los depósitos de cobre en México se localizan en la porción oriental del cinturón magmático Laramide (90-40 Ma) y predominantemente tienen edades entre 75 y 50 Ma. Los depósitos más grandes y mejor preservados se localizan en el noreste de Sonora, en la parte norte del cinturón donde Cananea (~30 Mt Cu) contiene acumulaciones de metal de gran relevancia a escala mundial (Valencia-Moreno et al., 2006).

Los depósitos de tipo pórfido de cobre en esta región del país guardan una clara relación en tiempo y espacio con intrusiones graníticas laramídicas cuyas edades varían entre 80 y 40 Ma. Estos depósitos incluyen grandes áreas (centenares de km<sup>2</sup>) de alteración hidrotermal (potásica, fílica, propilítica y argílica), estando relacionados, en la mayoría de los casos, con cuerpos subvolcánicos o hipabisales que varían en composición desde

monzonita a cuarzo-diorita, como es el caso de Cananea (Ochoa-Landín y Echávarri, 1978; Ochoa-Landín y Navarro-Mayer, 1980).

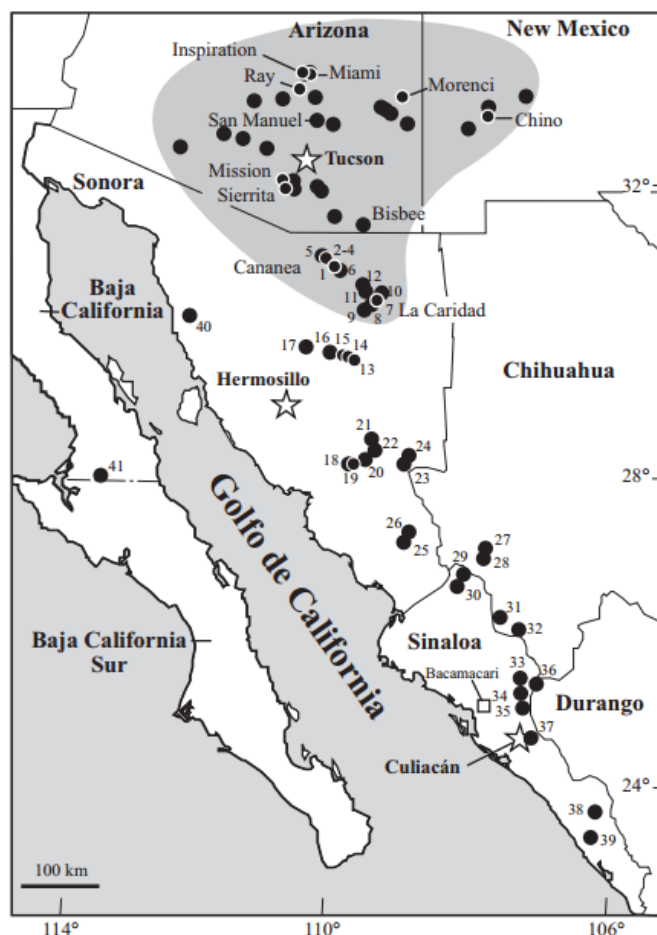


Figura 4. Mapa del cinturón Iaramídico de pórfidos de cobre del noroeste de México y de la cordillera oeste de Norte América, resaltando los ejemplares más importantes. Tomado de Valencia-Moreno et al., 2006.

El distrito minero de Cananea se encuentra ubicado en la parte norte-centro del estado de Sonora, México, a 280 Kms aproximadamente al noreste de Hermosillo, la capital del estado y 45 Kms al sur de la línea divisoria con los Estados Unidos de América. Cananea constituye el distrito minero más importante de México, y se reconoce como uno de los principales complejos de pórfido de cobre en el mundo (Bushnell, 1988). La producción de cobre proviene a partir de la explotación a cielo abierto de importantes horizontes de enriquecimiento supergénico con más de 500 m de espesor, relacionados a una serie de pórfidos cuarzo-feldespáticos (Meinert, 1982; Wodzicki, 2001). Las reservas estimadas de Cananea suman 7140 Mt de mineral con 0.42% de Cu, 0.008% de Mo y 0.012 gr/ton de Au (Singer et al., 2005), representando un total de 30 Mt de Cu metálico. La mineralización

tuvo lugar entre  $58.5 \pm 2.1$  Ma y  $52.8 \pm 2.3$  Ma, de acuerdo con edades K-Ar en biotita y sericita, respectivamente (Barton et al., 1995).

### **2.5 Edafología**

De acuerdo con la cartografía de INEGI, en la cuenca del río Sonora se presentan siete principales unidades edafológicas cuya distribución se presenta en el mapa de suelos (Figura 5).

1. Regosol: Se trata de suelos sin capas distintivas, asociados por lo general a los litosoles o afloramientos rocosos. En general, son claros y se parecen bastante a la roca que les subyace cuando no son profundos, se caracterizan por una gran heterogeneidad en los materiales que los componen. Es la unidad edafológica más importante en cuanto a cobertura, representando el 48.8% de la superficie total de la cuenca del río Sonora. Se distribuyen principalmente en el norte, centro y suroeste de la cuenca.
2. Litosol: Son los suelos más delgados con menos de 10 cm de profundidad, que se pueden localizar en la cuenca. Representan el 25.1% de la superficie de la cuenca del río Sonora, y se distribuyen principalmente en las zonas altas en los márgenes noroeste y central de la cuenca.
3. Xerosol: Presentan una capa superficial de color claro y pobre en humus. Se extienden sobre el 11.4% de la superficie total de la cuenca. Se distribuyen principalmente hacia el norte y sur de la misma.
4. Feozem: Suelos con capa superficial oscura, ricos en materia orgánica y en nutrientes. Cubren el 4.9% de la superficie de la cuenca y se encuentran asociados a los cauces principales de las zonas norte y central.
5. Cambisol: Representan el 4.6% de la superficie total y se presentan asociados a los cauces principales de la parte central de la cuenca.
6. Yermosol: Los suelos de esta unidad presentan una capa superficial de color claro y muy pobre en humus, presentan capas de textura gruesa. El origen de estos suelos parece estar asociado a depósitos eólicos. Representan el 4.2% de la superficie de la cuenca, y se encuentran al noreste de la ciudad de Hermosillo.
7. Luvisol: Esta unidad agrupa los suelos con acumulación de arcilla en el subsuelo, fértil y frecuentemente rojiza. Cubren el 0.4% de la superficie total de la cuenca del río Sonora. Se localizan en el extremo sureste de la misma.
8. Otras unidades edafológicas presentes en la zona en menor proporción corresponden a suelos de tipo: Fluvisol, Gleysol, Planosol, Rendzina, Solonchak y Vertisol.

## CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL SITIO DE ESTUDIO

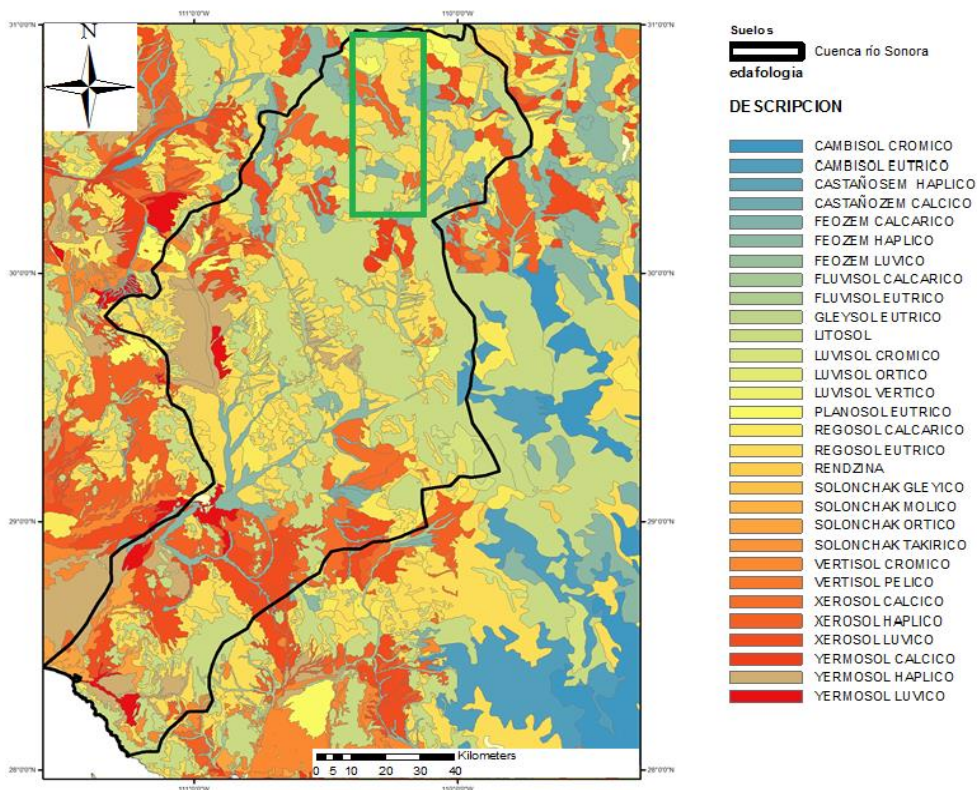


Figura 5. Mapa de suelos de la cuenca del río Sonora. Elaborado mediante información digital obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En el cuadro verde se señala la localización de la zona de estudio en este trabajo, correspondiente a la parte alta de la cuenca del río Sonora.

### 2.6 Geoquímica en rocas y sedimentos.

#### A. Rocas.

Existen registros geoquímicos en rocas que rodean a la cuenca del río Sonora, dichos registros señalan elevadas concentraciones de ciertos elementos, principalmente aluminio (82733 mg/kg – 91849 mg/kg), hierro (59640 mg/kg – 68460 mg/kg) y manganeso (789.8 mg/kg – 1364 mg/kg). De igual forma, se reportan concentraciones máximas de 1123 mg/kg para bario (Ba), 197 mg/kg para vanadio (V), 107 mg/kg para cobre (Cu), 107 mg/kg para zinc (Zn), 53 mg/kg para cromo (Cr), 38 mg/kg para níquel (Ni), 13.4 mg/kg para arsénico (As), 11.4 mg/kg para plomo (Pb) y 0.2 mg/kg para cadmio (Cd) (González-León et al., 2010).

#### B. Sedimentos.

En lo que respecta a la geoquímica de sedimentos, el Servicio Geológico Mexicano (SGM) analizó más de 3 mil muestras de sedimentos de arroyos en la cuenca del río Sonora en el lapso de 1996 al año 2000. Los resultados más representativos se muestran en la

## CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL SITIO DE ESTUDIO

---

tabla 4. Dichos resultados indican que las concentraciones totales de metales en los sedimentos disminuyen según el siguiente orden: Fe > Al > Mn > Zn > Cr ≈ Cu > Pb > As ≈ Ni > Sn > Cd, demostrando congruencia con las concentraciones de los mismos elementos presentes en las rocas de la región (Gutiérrez y Romero, 2015).

**Tabla 4. Concentraciones máximas y mínimas de metales en muestras de sedimentos de arroyos de la cuenca del río Sonora (SGM, 1996-2000). Tomado de Gutiérrez y Romero, 2015.**

Elemento	Mínimo	Máximo	Unidades
Fe	0.89	18.33	%
Al	0.26	6.58	
Mn	46	5319	mg/kg
Ba	24	1436	
Zn	13	3502	
Cr	1	547	
Cu	1	6471	
Pb	2	17612	
As	0.32	2092	
Ni	0.9	838	
Sb	0.2	221	
Cd	0.04	62	

## CAPÍTULO 3

### MARCO TEÓRICO

---

#### **3.1 Importancia del estudio de los elementos potencialmente tóxicos en suelos y sedimentos.**

El desarrollo industrial y las diferentes actividades relacionadas con el ser humano, han incrementado la liberación de ciertos elementos tóxicos al ambiente (Buenrostro, 2007). Algunos metales pesados y metaloides son potencialmente tóxicos, dependiendo de su concentración, por lo que se ha optado por denominarlos como **elementos potencialmente tóxicos (EPT)** por su importancia ambiental y toxicológica. Algunos de los EPT de mayor importancia ambiental son: arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), plomo (Pb), y zinc (Zn), los cuales se encuentran regulados en México y otros países debido a su elevada presencia en sitios contaminados.

La mayoría de los metales pesados son necesarios en cantidades pequeñas para el desarrollo de los ciclos biológicos, sin embargo, muchos de ellos se vuelven tóxicos en ciertos intervalos de concentraciones, por lo que se pueden convertir en EPT. Estos metales pueden introducirse en el medio ambiente debido a fenómenos naturales y actividades derivadas por el ser humano, principalmente las actividades industriales y la generación de residuos (Hani, 1990; Abollino, et al., 2003).

Los suelos y sedimentos son los principales sumideros de metales pesados y metaloides liberados por las actividades humanas, el problema de dichos elementos consiste en que a diferencia de contaminantes orgánicos estos no se degradan por procesos biológicos o químicos (Kirpichtchikova, et al., 2006), por lo que su concentración total en suelos y/o sedimentos es persistente en el tiempo (Adriano, 2003), lo que puede ocasionar su acumulación por encima de los **valores de fondo naturales** definidos en determinada zona y causar riesgos a la salud humana y/o al ecosistema en general (D'Amore, et al., 2005).

Una vez que los EPT se convierten en una preocupación ambiental al superar ciertos umbrales, es necesario cuantificar su **riesgo ambiental** potencial, por lo cual es crucial entender su **movilidad y retención** en suelos y sedimentos, los cuales son los principales compartimientos que actúan como depósito geoquímico para contaminantes y sirven como sistemas amortiguadores que controlan el transporte de sustancias químicas a la atmósfera, hidrosfera y biosfera (Kabata-Pendias, 1995).

Como se mencionó, los metales pesados y metaloides son sustancias químicas con potencial para convertirse en un **peligro** para el medio ambiente, por lo cual han sido objeto de atención por sus características contaminantes, las cuales son (Fachinelli et al., 2001):

- Presentan carácter acumulativo y su concentración no disminuye en el tiempo.
- Son necesarios y beneficiosos para las plantas y otros organismos a determinados niveles, pero también son tóxicos cuando exceden ciertos niveles de concentración.
- Están siempre presentes en los suelos y sedimentos a unos niveles de concentración denominados niveles de fondo, cuyo origen proviene de las características geológicas que dan lugar a la formación de los suelos y sedimentos.

- Con frecuencia se encuentran como cationes que interactúan fuertemente con la matriz del suelo, lo que en ocasiones se traduce en que incluso a altas concentraciones pueden encontrarse en forma química no dañina ya que se encuentran inmóviles. Sin embargo, estos metales pueden movilizarse y cambiar de forma química debido a cambios en las condiciones medioambientales, cambios en el uso del suelo o por saturación de la **capacidad amortiguadora** del suelo o sedimento.

Debido a su elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación, el estudio de la contaminación de EPT es de interés para conocer su comportamiento en suelos y sedimentos, los cuales dependiendo de sus características pueden retener o liberar a los contaminantes a los diferentes compartimentos del medio ambiente (Rosas Rodríguez, 2001; Akrami, 2014).

### **3.2 Capacidad amortiguadora de suelos y sedimentos y sus características que influyen en la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos.**

El transporte de metales no sólo depende de las propiedades fisicoquímicas de los mismos, sino sobre todo de las propiedades físicas y químicas de los suelos y sedimentos, ambos sistemas actúan en general como una barrera protectora de otros medios como los hidrológicos y biológicos, los cuales son más sensibles a ser contaminados. Dicha protección consiste en la filtración, descomposición, neutralización y/o almacenamiento de sustancias nocivas, lo cual reduce en general la **geodisponibilidad** de los contaminantes. No obstante, los suelos y sedimentos no pueden asimilar, inmovilizar, inactivar y degradar todos los contaminantes que reciben y por lo mismo, en un determinado momento, cuando se superan ciertos umbrales críticos, pueden transferir a los contaminantes a otros medios e incorporarlos en las cadenas tróficas (Heredia y Cirelli, 2008; Galán y romero, 2008).

La capacidad amortiguadora está dada por el pH, potencial redox (Eh), tipo y proporción de minerales de arcilla, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico del suelo, contenido de carbonatos, presencia de oxihidróxidos de hierro y manganeso y por la textura del suelo/sedimento. Dichos parámetros permiten reducir los efectos negativos de los contaminantes mediante la formación de enlaces entre las sustancias nocivas y los componentes del suelo por procesos de insolubilización o por su transformación en otras sustancias con menor grado de toxicidad (Macías, 2000). Las características a detalle de los parámetros que influyen en la movilización de los EPT se comentan a continuación.

#### a) pH:

De acuerdo a muchos autores, el pH es el principal factor en la determinación de la capacidad del suelo para adsorber metales pesados (Bourg, 1995). El pH afecta a la especiación química y a la movilidad de muchos metales pesados, y los cambios de pH

### CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

---

influyen fuertemente en la toxicidad de los mismos (Wood, 1989; Echarri, 1998; Martínez Rodríguez, 2002).

Aunque la relación entre el pH de un suelo y la fracción soluble de un metal en el mismo difiere para cada elemento, en general, las condiciones ácidas favorecen el mantenimiento de formas solubles de los compuestos metálicos (Dijkstra et al., 2004; Martín-Ortiz et al., 2010; Porsch, 2010), y suponen un elevado potencial de lixiviación de metales. De forma general, la disminución del pH, aumenta la solubilidad de Al, Co, Cu, Fe, Zn y Mn (Loué, 1988). Dicho potencial de lixiviación de metales en condiciones ácidas se acentúa en aquellas zonas con predominancia de texturas gruesas y materiales con escasa capacidad de adsorción (Polo Gómez et al., 2003).

El pH es por tanto, un parámetro importante para definir la movilidad de los diferentes componentes minerales, ya que su valor influye directamente en la solubilidad de los metales pesados en el suelo y sedimento, debido a que a valores de pH elevados se favorece la formación de precipitados de carbonatos e hidróxidos, disminuyendo su movilidad, de igual forma la adsorción de los EPT se ve favorecida en condiciones de baja acidez (Arce García, 2000).

#### b) Potencial redox (Eh):

El potencial redox de un ambiente influye sobre los fenómenos de especiación metálica. Los equilibrios redox están controlados por la actividad de electrones libres en el agua, que a su vez vienen definidos por el potencial redox (Eh). A altos valores de Eh se asocian fenómenos oxidantes, mientras que a bajos valores del mismo lo hacen los reductores. Las condiciones redox pueden afectar el estado de algunos elementos tales como: C, Ni, O, S, Fe, Ag, As, Cr, Hg y Pb (Rosas Rodríguez, 2001).

Las condiciones redox influyen sobre la movilidad de los metales de dos formas:

1. Cambia directamente la valencia de ciertos metales (por ejemplo, bajo condiciones reductoras el  $\text{Fe}^{3+}$  es transformado en  $\text{Fe}^{2+}$ ). Por ser los iones reducidos más solubles, se ha observado un incremento en la concentración de Mn, Fe y As en ambientes reductores.
2. El efecto indirecto está dado cuando los contaminantes están asociados con componentes dependientes de cambios redox, por ejemplo, los metales asociados a óxidos e hidróxidos de Fe y Mn se pueden movilizar bajo ciertas condiciones que provocan la inestabilidad de dichos minerales, principalmente cuando existe una reducción o acidificación en el medio (Alloway, 1995; Salomons, 1995).

Resumiendo, las formas oxidadas generalmente son mucho menos solubles que las formas reducidas; por esta razón, muchos de los EPT como Fe, Mn, V, Cu, Cr, etc. por lo general son más móviles y biodisponibles en condiciones reductoras que en condiciones oxidantes (Alloway, 1995).

En conjunto, el pH y el potencial redox son fundamentales en el comportamiento de los EPT en suelos y sedimentos, debido a ello la caracterización de ambos parámetros es importante para pronosticar los procesos de movilización y/o retención de los metales y metaloides (Calmano et al., 1996).



### CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

---

La combinación del potencial redox (expresada como Eh) y el pH hace posible predecir qué especies son dominantes en las condiciones geoquímicas específicas. Estos campos de estabilidad se hacen visibles en los diagramas Eh-pH ampliamente utilizados en geoquímica (Brookins, 1988).

#### c) Minerales de arcilla:

Los minerales de arcilla surgen de la meteorización de las rocas e influyen notoriamente en las propiedades químicas y físicas del suelo. Junto con otros minerales, representan la mayor parte de la fracción inorgánica del suelo (Gamiz, 2010; Alloway, 1995).

Estos minerales son importantes en el comportamiento de los EPT, debido principalmente a su área superficial y a la presencia de cargas negativas en su superficie o en el espacio interlaminar que confiere a los suelos la capacidad de retener elementos (Tandy et al., 2004; Gu, 1994).

Las arcillas poseen la capacidad de retener elementos metálicos en los espacios interlaminares, mediante el proceso de adsorción, que depende de variables como el pH y el potencial de óxido-reducción del medio. Las arcillas presentan diferencias estructurales y composicionales, por lo que forman grupos con características diferentes principalmente relacionadas a su capacidad de intercambio iónico y su superficie específica de contacto, lo que en conjunto con el comportamiento químico de los cationes presentes en el sistema crean una competición para ocupar los lugares de adsorción (Andrade et al., 2005).

Las unidades principales en la formación de los minerales de arcilla son disposiciones bidimensionales de tetraedros de silicio-oxígeno y disposiciones bidimensionales de octaedros de aluminio o magnesio con oxígenos hidroxilos. La diferente unión de estas capas da lugar a los diferentes minerales con propiedades y comportamiento diferentes en cuanto a la capacidad de adsorción de metales, debido a ello la importancia de su caracterización. Los diferentes grupos de arcilla son:

1. Grupo de la caolinita: Presentan una estructura eléctricamente neutra debido a que no presentan sustituciones isomórficas, por lo que presentan una baja capacidad de intercambio catiónico.
2. Grupo de la Illita: Presentan un déficit de carga parcialmente equilibrado por  $K^+$  interlaminar fijado, por lo que no es intercambiable. Al bloquearse sedes de intercambio, su capacidad de intercambio catiónico es baja.
3. Grupo de la esmectita: Presentan una capacidad de intercambio catiónico alta, además, son arcillas con una alta plasticidad y alta cohesión.
4. Grupo de la vermiculita: Presentan una elevada capacidad de intercambio catiónico y una elevada superficie específica, por lo que tienen características importantes para adsorber ciertos elementos metálicos.

En resumen, los minerales de la arcilla ejercen una gran influencia en la retención de EPT, como consecuencia de su pequeño tamaño de partícula, lo que les confiere una alta superficie específica y por sus propiedades para intercambiar cationes (Porta et al., 1999). En la tabla 5 se muestran valores típicos de capacidad de intercambio iónico y superficie específica para los diferentes grupos de arcillas.

### CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

Tabla 5. Valores de capacidad de intercambio iónico y superficie específica en los diferentes grupos de arcilla. Modificado de González Guadarrama, 2014.

Grupo de arcillas	Capacidad de intercambio iónico (meq/100g)	Superficie específica (m <sup>2</sup> /g de arcilla)
Caolinita	3-5	15 - 50
Illita	10-40	50
Esmectita	80 - 200	80 - 300
Vermiculita	100 - 200	100 - 200

d) Contenido de materia orgánica:

La materia orgánica es el segundo componente principal de la fracción sólida del suelo (Stevenson, 1992). Representa todos los constituyentes orgánicos en los suelos y sedimentos, incluyendo tejidos vegetales y animales no decantados, así, este término incluye: materiales orgánicos identificables de alto peso molecular tales como polisacáridos y proteínas y sustancias más simples tales como azúcares, aminoácidos y sustancias húmicas (Schulten, 1991; Stevenson, 1992).

Las sustancias húmicas tienen una gran importancia en las propiedades de sorción de metales en suelos y sedimentos (Stevenson, 1992). La existencia de material húmico en suelos influye fuertemente en la sorción de sustancias químicas (Stevenson, 1992). Los ácidos húmicos y fúlvicos presentan cargas negativas formadas por grupos carboxílicos y fenólicos en los que el hidrógeno puede ser reemplazado por iones metálicos. Dichas cargas negativas son dependientes del pH, por lo tanto, la sorción de metales pesados en suelos orgánicos o suelos con altos contenidos de materia orgánica depende en gran medida del pH.

De igual forma, la materia orgánica del suelo presenta una capacidad de intercambio de cationes muy alta, especialmente los ácidos fúlvicos (Stevenson, 1992), lo que le confiere una alta capacidad de almacenamiento de metales catiónicos.

Cuando los metales pesados son adicionados a suelos, experimentan una complejación con ligandos, que pueden ser constituyentes químicos orgánicos que se combinan con los metales en complejos químicos (Novotny, 1995). La materia orgánica desempeña un papel importante en la energía de unión con los metales pesados (McLaren et al., 1986).

Los metales pesados fácilmente móviles, como Zn y Cd, generalmente están unidos a compuestos orgánicos, lo mismo que Cu y Mo (Kabata-Pendias, 1995). Otros metales como Cu y Pb están muy relacionados con la materia orgánica, por lo que su solubilidad está fuertemente relacionada con el desarrollo de ésta (Bourg, 1995).

e) Capacidad de intercambio catiónico (CIC):

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la propiedad de los minerales de arcilla y la materia orgánica, para adsorber cationes de la fase líquida del suelo, desorbiendo al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros cationes. Dicha propiedad de suelos y

### CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

sedimentos influye en su potencial como depurador natural, al permitir la retención de elementos contaminantes incorporados al suelo (Porta et al., 1999).

La mayoría de los metales pesados existen principalmente como cationes en la solución del suelo y su adsorción, por tanto, depende de la densidad de cargas negativas en la superficie de los coloides del suelo (Alloway, 1990).

El poder de intercambio catiónico depende del tipo de minerales de la arcilla (como se comentó anteriormente es mínima para el grupo de la caolinita, baja para el grupo de la illita, alta para el grupo de la esmectita y máxima para el grupo de la vermiculita), de la materia orgánica, de la valencia y del radio iónico hidratado del metal. En general, a mayor CIC, mayor es la cantidad de cationes adsorbidos (Kabata-Pendias, 1992).

#### f) Contenido de carbonatos:

Los carbonatos influyen notablemente en el pH y en el comportamiento de ciertos EPT en los suelos (Xu y Saiers, 2010; Woodruff y Cannon, 2010) como el Co, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, U y Zn; los cuales pueden co-precipitar con los iones  $\text{CO}_3^{2+}$  (Woodruff y Cannon, 2010) y ser incorporados dentro de la estructura cristalina, o bien, pueden reaccionar y sustituir isomórficamente cationes de Ca y Mg de la calcita y la dolomita, respectivamente (los minerales carbonatados más abundantes). Además, al generar altos valores de pH (generalmente neutros), otras especies como los hidróxidos de hierro y manganeso también llegan a precipitarse. La capacidad de adsorción de estas fracciones minerales depende de su abundancia, reactividad, superficie de contacto y el tiempo de permanencia del agua contaminada en el sitio (Ferguson, 1990; Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Por lo tanto, la presencia de carbonatos en el suelo/sedimento puede tener efectos directos e indirectos sobre la movilidad y reactividad de los metales pesados, directamente a través de las interacciones superficiales e indirectamente a través de su efecto sobre el pH del suelo y por ende en la solubilidad de los EPT.

#### g) Presencia de oxihidróxidos de Fe y Mn:

En los suelos y sedimentos existen óxidos e hidróxidos principalmente de hierro y manganeso, en varias formas mineralógicas, incluyendo hematita, goethita y gibbsita (Weber, 1991), los cuales son importantes en la retención de metales pesados (Uchimiya, 2010; Dijkstra et al., 2004). La elevada superficie específica de los óxidos de hierro implica que muchas propiedades de superficie de los suelos son dependientes de los óxidos de hierro. Esta superficie adsorbe algunos aniones, como fosfatos y molibdatos y metales como Cu, Pb, V, Zn, Co, Ni (Besoain, 1985).

La capacidad de sorción de los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso es dependiente del pH del medio, dicha sorción se manifiesta mediante (Kabata-Pendias y Pendias, 1992):

1. Sustitución isomórfica de cationes de Fe y Mn por aquellos que tienen similares dimensiones físicas ( $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{4+}$  y  $\text{Ag}^+$ ).
2. Reacciones de intercambio de cationes.

3. Adsorción de aniones (fosfatos, molibdatos y seleniatos) dependiendo de los cambios en la carga superficial, principalmente en los compuestos de hierro.

Al ser dependientes del pH, el valor del mismo influye en su capacidad de adsorber cationes o aniones. Debido a ello es de importancia el punto de carga cero (PZC, por sus siglas en inglés), el cual está dado por el pH en el cual la superficie transporta igual cantidad de cargas positivas y negativas (Acevedo et al., 2004). Cuando el pH del medio es inferior al PZC, los aniones pueden ser retenidos en las superficies de los sólidos vía sorción, por el contrario, si el pH del medio es superior al PZC pueden ser retenidos cationes vía sorción en la superficie de sólidos como los oxi-hidróxidos de Fe y Mn. El punto de carga cero de algunos minerales de interés se presenta en la tabla 6.

**Tabla 6. Valores del punto de carga cero para humus y algunos minerales (Sposito, 1989).**

Mineral	pH del PZC
Cuarzo/sílice	2-3
Caolinita	4 - 4.5
Goethita	7-8
Hematita	8 - 8.5
Gibbsita	9 - 9.5
Humus	4 - 4.5

h) Textura:

El término textura se utiliza para representar la composición granulométrica del suelo. Cada término textural se corresponde con una determinada composición cuantitativa de arena, limo y arcilla (Sánchez Bascones, 2003). La textura del suelo juega un papel importante en la movilidad de los metales en el suelo. La textura refleja la distribución del tamaño de partícula del suelo y por lo tanto el contenido de partículas finas como óxidos y arcillas, los cuales como se ha mencionado con anterioridad son medios de adsorción importantes para metales pesados en suelos y sedimentos debido principalmente a su elevada área superficial.

Las diferencias en el tamaño de arena, limo y arcilla influyen en la cantidad y fuerza de la unión de los elementos. La retención de metales pesados se incrementa al disminuir el tamaño de la partícula. Los metales pesados son transportados rápidamente al manto freático en suelos arenosos al ser transportados en partículas finas suspendidas (Zhang et al., 2003).

i) Salinidad:

La salinidad viene determinada por el contenido en sales de un suelo y es un parámetro de influencia en la movilización de metales pesados (Doménech X.,1997).

El aumento en la salinidad puede incrementar la movilización de metales pesados debido a que los cationes asociados con las sales ( $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de adsorción provocando una saturación de los mismos. En segundo lugar los

### CAPÍTULO 3. MARCO TEORICO

aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como Cd, Zn y Hg.

La conductividad eléctrica (CE) es la magnitud que se utiliza para caracterizar el grado de salinidad de un suelo, ya que está directamente relacionada con la concentración de iones en disolución. La medida de la conductividad del extracto acuoso de un suelo, permite establecer una estimación de la cantidad de sales que contiene.

Debido a todos estos parámetros que controlan la movilidad de los EPT, estos pueden hallarse de la siguiente forma (Shuman, 1991):

- Disuelto en la solución del suelo
- Ocupando sitios de intercambio en componentes inorgánicos del suelo
- Adsorbido específicamente sobre componentes inorgánicos del suelo
- Asociado con la materia orgánica del suelo insoluble
- Precipitados en forma de sólidos puros o mezclados
- Presentes en la estructura de minerales secundarios
- Presentes en la estructura de los minerales primarios.

Si los metales y metaloides se encuentran como iones en la solución del suelo pueden formar un gran número de especies debido a reacciones de hidrólisis, complejación o reacciones de óxido-reducción, con efectos tóxicos marcadamente distintos (Porta et al., 1999). En la figura 6 se muestra, de manera esquemática, la forma en que los metales están presentes en la fracción móvil o en la fracción inmóvil del suelo y el tipo de reacción que permite el paso de metal de una fase a otra.

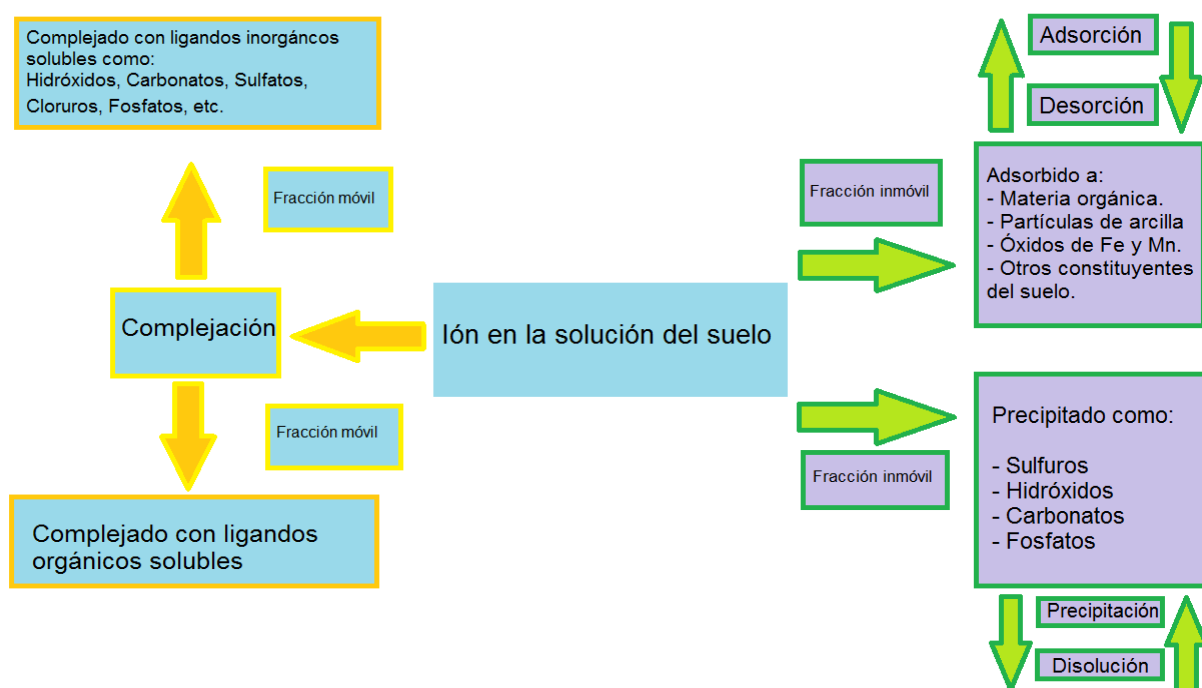


Figura 6. Diagrama de movilidad de metales pesados en suelos. Modificado de Sánchez Bascones, 2003.

### CAPÍTULO 3. MARCO TEORICO

Cuando los metales pesados se incorporan a los suelos y sedimentos y dependiendo de las características físicas, químicas y biológicas del sistema, los metales pueden seguir cuatro diferentes vías (García, I. y Dorronsoro, C., 2005):

- Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo, ocupando sitios de intercambio o específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo, asociados con la materia orgánica del suelo y/o precipitados como sólidos puros o mixtos (Pagnanelli et al., 2004). Desde la base físico-química se sabe que los metales precipitan como resultado de cambios en el pH, oxidación y otros cambios de su composición química.
- Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas.
- Pueden pasar a la atmósfera por volatilización.
- Pueden movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas.

Todos estos destinos se ilustran en la figura 7.

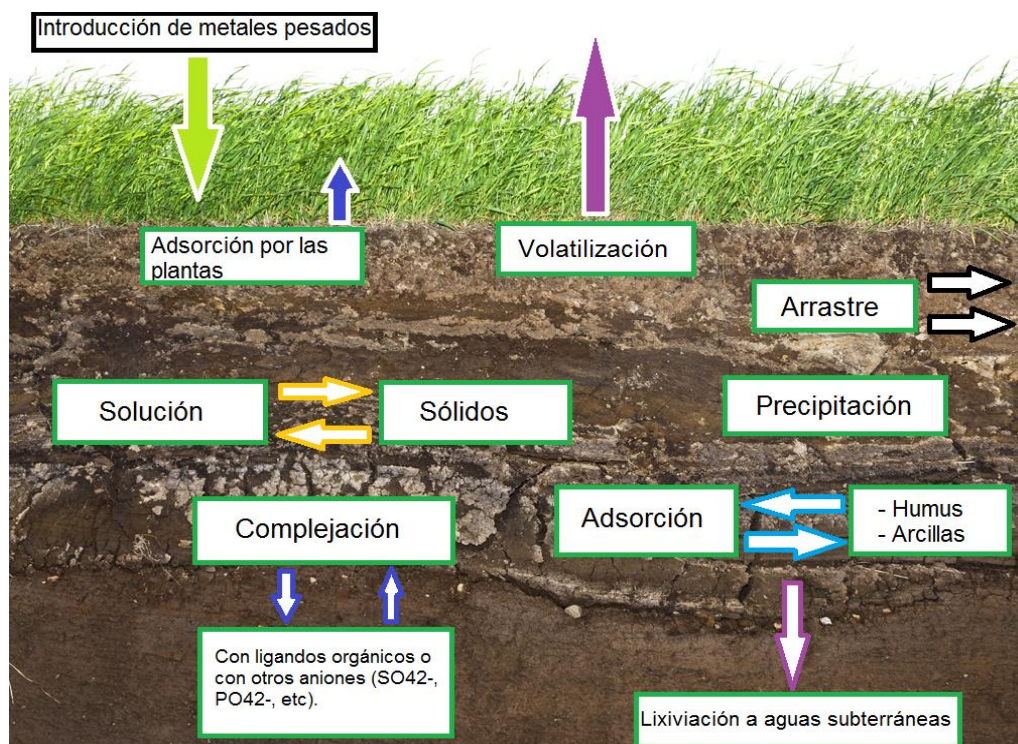


Figura 7. Dinámica de los metales pesados en el suelo. Modificado de García, I. y Dorronsoro, C., 2005.

### 3.3 Contaminación de soluciones ácidas en suelos y sedimentos.

La industria minera moderna es de gran importancia en la economía mundial ya que ofrece una gran diversidad de productos minerales para uso industrial y doméstico. Sin embargo, en el aspecto ambiental, existe una gran preocupación, ya que el sector minero genera millones de toneladas de residuos (Guzmán Herrera, 2015).

El principal problema ambiental asociado con la actividad minera es la generación de soluciones ácidas (Consejo minero, 2002), el drenaje ácido de las minas es producido por la exposición de minerales de sulfuro al aire y al agua, resultando en la oxidación del azufre y la producción de ácido y la presencia de EPT disueltos en altas concentraciones (Lin, 1997; Johnson *et al.*, 2000; Moncur *et al.*, 2004; Romero *et al.*, 2011), principalmente cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), arsénico (As), cobalto (Co), cromo (Cr), cadmio (Cd), hierro (Fe), etc. La presencia de estos elementos depende de la naturaleza geológico-minera de determinada región. De igual forma, las soluciones ácidas se caracterizan por la presencia de sulfatos disueltos. El drenaje ácido de minas, puede degradar y contaminar corrientes fluviales y agua freática por lixiviados ácidos, que al transportar EPT, pueden convertirse en un problema ambiental severo al contaminar suelos, sedimentos, aguas superficiales y aguas subterráneas (Bain *et al.*, 2000; Armienta *et al.*, 2001; Jung, 2001).

Debido a la posible contaminación del ambiente receptor por las soluciones ácidas, se han llevado a cabo estudios para comprender el comportamiento principalmente de los EPT asociados a los drenajes ácidos. En dichas investigaciones se ha determinado que los principales procesos químicos que controlan el comportamiento de los metales y metaloides en medios ácidos son la precipitación/disolución y la sorción/desorción (Alloway, 1995; Aduvire, 2006; Bigham 1994; Romero *et al.*, 2011).

Este tipo de reacciones de precipitación/disolución están sujetas a limitaciones cinéticas y las fases sólidas formadas son generalmente fases minerales amorfas de muy baja cristalinidad, que con el tiempo van adquiriendo mayor cristalinidad y estabilidad físico-química (Aduvire, 2006). Se han identificado una variedad de minerales de Fe secundarios en depósitos de minas y sistemas de drenaje ácidos de minas, que varían en cristalinidad de precipitados mal ordenados (como ferrihidrita y schwertmannita) a productos cristalinos (como goethita); La jarosita es el sulfato de hierro más comúnmente identificado (Bigham 1994). Estos minerales secundarios se forman por hidrólisis y la precipitación de hierro sólido representado por el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , generalmente no tienen lugar hasta que el ácido es neutralizado. La precipitación durante la formación de minerales secundarios, puede ser un mecanismo de retención muy importante para metales. Así, la precipitación de ferrihidrita puede actuar como sumidero eficaz tanto para metales pesados como para aniones (Calvo de Anta, 1997) debido a su elevada área superficial específica (200-500  $\text{m}^2/\text{g}$ ) y a una alta proporción de sitios activos (Childs, 1992).

Por otra parte, el destino y transporte de metales pesados en los suelos y sedimentos depende de reacciones de sorción (Alloway, 1995). El proceso de sorción puede definirse como la interacción de una fase líquida con una sólida y comprende tres mecanismos: adsorción, precipitación superficial y absorción.

Para la descripción de las reacciones de adsorción se utilizan usualmente modelos empíricos, como el coeficiente de distribución ( $K_d$ ), (relación entre el ión adsorbido y en disolución) que indica la afinidad de un elemento con el suelo (Selim y Amacher, 1997) y las isotermas de adsorción de Freundlich y Langmuir (Calvo de Anta, 1997).

El parámetro  $K_d$  se expresa como:

$$K_d = C_s/C_w \rightarrow \text{(Ecuación 1).}$$

Donde  $C_s$  es la concentración de equilibrio del contaminante en el sólido y  $C_w$  es la concentración de equilibrio del contaminante en el agua.

### **3.4 Estudio de la movilidad de elementos potencialmente tóxicos en columnas de suelo y sedimento.**

Los mecanismos de transporte de metales pesados a través del suelo han presentado desde hace mucho tiempo un gran interés debido a la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas a través de la lixiviación de metales (Kanugo, 2000).

Los estudios e investigaciones de la migración y acumulación de metales pesados y otros contaminantes en condiciones naturales a escala de campo es complicado de controlar, debido a los numerosos factores que influyen en el comportamiento de dichos contaminantes (Camobreco et al., 1996). Debido a ello, los experimentos en laboratorio eliminan algunos factores de confusión, por lo que pueden ser efectivos en el estudio de la movilidad de los EPT en suelos y/o sedimentos.

En un estudio de sorción, el suelo se hace reaccionar con soluciones que contienen cantidades variables de los metales de interés durante un periodo de tiempo especificado usando diferentes técnicas. Después del período de tiempo especificado, el suelo y la solución se separan por centrifugación y / o filtración. Las fases del suelo y / o de la solución se analizan a continuación mediante espectrofotometría de absorción atómica o espectrometría de emisión de plasma acoplada inductivamente. Con estas técnicas no es posible distinguir entre la adsorción verdadera y las reacciones de precipitación. Por esta razón se usa el término sorción (McLean y Bledsoe, 1992).

Para estudiar la sorción de un compuesto químico sobre un sólido pueden ser usadas dos técnicas de laboratorio: pruebas batch y experimentos en columnas.

Las pruebas batch consisten en mezclar y agitar una cantidad determinada de sólido con disoluciones de diferentes concentraciones del soluto estudiado, por ejemplo, un metal pesado (Romero et al., 2011). Previamente, se tiene que determinar la concentración de este metal en el sólido. La técnica de batch es muy útil para estudiar los mecanismos de reacción que ocurren en la interfase suelo/agua, además permite analizar muchas muestras al mismo tiempo, sin embargo, presenta algunas limitaciones:

- Solubilización de los componentes del suelo debido a la agitación de la muestra del suelo y las relaciones suelo / solución muy diferentes de los existentes en sistemas naturales (Altin et al., 1999).

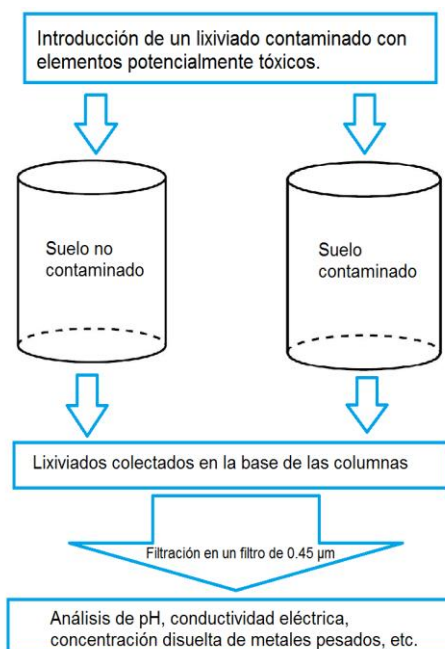


### CAPÍTULO 3. MARCO TEORICO

- Las pruebas batch no son totalmente representativas de las condiciones naturales, ya que ofrecen una gran superficie específica y, por tanto, la máxima posibilidad de sorción. Además, se puede considerar que el flujo es nulo.

Por otra parte, el uso de columnas de suelo y sedimentos no contaminados y la aplicación de soluciones artificiales contaminadas ayuda a conocer y distinguir los mecanismos de acumulación y migración de metales pesados en la matriz estudiada (Camobreco et al., 1996). Las pruebas en columnas reflejan mejor las condiciones de campo, ya que permiten controlar la velocidad de flujo y obtener de este modo coeficientes de distribución más realistas. El método de columna se utiliza comúnmente para determinar las tasas de disolución de los contaminantes en el suelo contaminado. También se utiliza para la evaluación del riesgo de aguas subterráneas, debido al transporte de contaminantes sobre suelos contaminados (Sangjumsak y Punrattanasin, 2014).

El interés de los experimentos en columnas de suelo es que permite el estudio del movimiento del agua y de solutos asociados, además de las reacciones entre la fase líquida y la matriz de suelo durante la transferencia. Por otro lado, el análisis de la capacidad de sorción del suelo utilizando columnas ofrece varias ventajas sobre los estudios típicos en sistema batch (Prado et al., 2011), en este tipo de experimentos se analiza el efecto de la estructura del suelo sobre el movimiento de solutos, además, esta técnica reproduce las condiciones de campo respecto a la manera de poner en contacto las dos fases, la relación suelo/solución, la inmovilidad de la fase sólida y el tiempo de contacto entre las fases. La figura 8 muestra el esquema típico usado en un experimento de columna.



**Figura 8. Esquema típico de un experimento de movilidad de contaminantes en columnas. Modificado de Camobreco 2006.**

Se han realizado diversos estudios ambientales con el uso de columnas de suelos y/o sedimento, ya que permiten conocer con detalle la movilidad y el destino de muchos contaminantes. Jean-Soro et al (2012) evaluaron la lixiviación de metales en un suelo industrial mediante estudios en columnas utilizando como solución ácido cítrico. De igual forma Kowalkowski et al (2010), utilizaron  $\text{CaCl}_2$  0.01 M como solución de lixiviación en dos diferentes tipos de suelos utilizando ensayos en columnas. Boyle y Fuller (1987) encontraron que la lixiviación de Zn a través de columnas de suelo se incrementó elevando el carbono orgánico disuelto (DOC). Lamy et al. (1993) concluyeron que la movilidad de Cd se potenció por un aumento de la materia orgánica soluble. Dowdy y Volk (1983) sugirieron que el movimiento de los metales pesados en los suelos se aumenta en suelos arenosos, ácidos y con bajo contenido en materia orgánica.

#### **3.5 Análisis por tomografía en suelos y sedimentos contaminados.**

Se han realizado diversas investigaciones enfocadas en el estudio del transporte de solutos, principalmente relacionados al estudio de contaminantes (Bejat et al., 2000). En dichos estudios se ha determinado que la estructura del suelo (tamaño, forma y arreglo de las partículas sólidas y poros del suelo) juega un papel importante. Karathanasis (2001) reportó que los coloides con alta carga superficial y suelos con alta macroporosidad contribuyen a una mayor movilidad y transporte de plomo.

La importancia de los macroporos en el transporte de agua y elementos químicos a través de la **zona no saturada**, está relacionada comúnmente en términos de la proporción de la porosidad total, la cual está representada por los macroporos (Tindall et al., 1995). Investigadores (Sollins y Radulovich, 1988, Radulovich et al., 1989) han experimentado la distribución de tamaños de macroporos dentro del suelo y sus efectos sobre el flujo de agua y el transporte químico de contaminantes. La literatura está repleta de experimentos que implican el uso de colorantes (Trudgill et al., 1983, Glass et al., 1989), tomografía de radiación (Anderson et al., 1990) y otros (Van Ommen et al., 1989) para determinar el tamaño y la continuidad de los macroporos.

Una técnica no destructiva utilizada para conocer la proporción del espacio poroso en los suelos/sedimentos es la tomografía, la cual permite adquirir información del interior de una muestra de suelo y/o sedimento midiendo la atenuación de rayos X que atraviesan la muestra, para conocer cómo se distribuyen los poros, la forma y tamaño que presentan, como se conectan y como están orientados, todo esto mediante la adquisición de imágenes del interior del volumen de suelo/sedimento que dan lugar a la representación 3D (Duwig et al., 2013). La creciente disponibilidad de técnicas de imagen no destructivas como la tomografía de rayos X y el procesamiento avanzado de imágenes y modelado físico hacen posible el desarrollo de un modelo de simulación 3D para conocer de mejor forma el transporte de solutos a través de suelos y sedimentos (Gastelum et al., 2009).

Se han realizado análisis con imágenes 3D mediante el uso de tomógrafo para analizar la estructura y porosidad de suelos, entre ellos destaca el estudio del efecto de la microfauna sobre la macroporosidad y el movimiento de solutos en suelos arcillosos (Prado et al., 2016). La tomografía computarizada de rayos X se ha utilizado también ampliamente

en el pasado para caracterizar las propiedades hidráulicas del suelo (Rab et al., 2014) estudios sobre el transporte coloidal (Chen et al., 2009; Chen et al., 2010; Gaillard et al., 2007; Li et al., 2006) y estudios de compactación en suelos (Keller et al., 2013). La escasa investigación relacionada al estudio en la modificación de la estructura de suelos y sedimentos afectados por soluciones ácidas en regiones mineras mediante el uso de tomografía de rayos X, hace necesaria la innovación en el tema.

### **3.6 Análisis petrográficos, estadísticos y modelación geoquímica en sitios contaminados.**

Existen muchas técnicas convencionales que son utilizadas en el estudio de suelos o sedimentos contaminados, estas técnicas son: microscopías petrográficas, análisis de microsonda electrónica y análisis de microscopía electrónica de barrido, las cuales permiten identificar minerales y caracterizar texturalmente a los suelos y sedimentos afectados (Jambor et al., 1998; Hudson et al., 1999).

De igual forma, existen modelos que permiten predecir el comportamiento de EPT lixiviados en un medio, dichos modelos pueden ser estadísticos o de equilibrio geoquímico.

Tomando en consideración que los estudios químicos realizados en muestras de suelos contaminados con metales pesados requieren del análisis de un gran número de variables, entre ellas el pH, la conductividad eléctrica y la concentración de diversos elementos, los análisis estadísticos multivariante resumen los datos y se usan para encontrar las interacciones entre las variables de interés. Los análisis estadísticos multivariante más usados en trabajos de contaminación de suelos son los siguientes:

- a) Correlaciones entre variables: El coeficiente de correlación más ampliamente empleado es el de Pearson, también conocido como de correlación lineal, el cual determina hasta donde los valores de ambas variables son proporcionales entre ellos (Holt, 2009). El coeficiente toma valores en el intervalo (-1; 1), correspondiendo +1 a una correlación lineal perfecta con pendiente positiva, - 1 a una perfecta pero con pendiente negativa y 0 indica la ausencia total de correlación lineal (Holt, 2009). El estudio de las correlaciones existentes entre valores experimentales de análisis químicos en suelos contaminados, puede revelar datos adicionales acerca de los orígenes y el comportamiento de los contaminantes en una zona de estudio.
- b) Dispersión y regresión lineal: Cuando los conjuntos de datos a analizar consisten en pares de valores que guardan algún tipo de dependencia entre sí, el gráfico que normalmente se emplea es el de dispersión (Molina et al, 2015). El mismo consiste en un gráfico cartesiano con dos ejes perpendiculares, donde se ubican en cada eje los datos de cada grupo. El resultado es una serie de puntos que forman la “nube” de dispersión correspondiente al grupo de datos pareados en cuestión. Al estar analizando la relación de dependencia de los dos grupos, este gráfico se suele acompañar por una “línea de tendencia”, que consiste en la regresión lineal simple de mejor ajuste por cuadrados mínimos. El valor del coeficiente de determinación  $R^2$  se suele incluir cuando los datos presentan cierta correlación lineal.

Por su parte, los modelos geoquímicos se basan en el cálculo de la especiación de los componentes a estudiar de una matriz introducida en medio acuoso a través de los datos de los diferentes fenómenos químicos o físico-químicos que tienen lugar, así como el cálculo de los índices de saturación, es decir, las diferentes fases que controlan la solubilidad del componente o componentes de interés (Ruiz, 2013; Pérez, 2014).

El modelado geoquímico es una herramienta muy utilizada en la lixiviación de residuos en suelos y sedimentos. Con el objetivo de llevar a cabo un buen modelado del comportamiento de los lixiviados, deben conocerse los siguientes datos:

- concentración total y/o disponibilidad de los principales elementos y compuestos de interés en la matriz.
- información mineralógica de las principales fases de la matriz.
- estudio exhaustivo del comportamiento de lixiviación en función de los principales factores (pH, potencial redox, conductividad eléctrica, etc.).

### ***3.7 Características de los elementos potencialmente tóxicos presentes en soluciones ácidas y su normatividad en México.***

**1. Arsénico (As):** Se ubica en el grupo VA de la tabla periódica; es un elemento con propiedades de metaloide. Puede existir en cuatro valencias: -3, 0, +3 y +5 y en ambientes fuertemente reductores como arsénico elemental y arsina (-3). En condiciones moderadamente reductoras la forma de arsenito (+3) puede dominar pero el arsenato (+5) es, generalmente, el estado de oxidación estable en ambientes oxigenados. Las sales de arsénico exhiben un intervalo de solubilidades acuosas dependiendo del pH y el ambiente iónico (WHO, 2001).

El Arsénico es un constituyente natural de la corteza del planeta. El promedio de contenido de As en la corteza varía entre 1 y 2 mg/kg y está ampliamente distribuido en una variedad de minerales (más de 200 especies), el más común de los minerales de arsénico es la arsenopirita (FeAsS). Este elemento se asocia con diversos tipos de depósitos minerales, especialmente los que incluyen la mineralización de sulfuros (Bhattacharya et al., 2002). La sorción y co-precipitación con óxidos de hierro son los mecanismos más importantes de remoción de arsénico, bajo condiciones ambientales comunes (Evanko y Dzombak, 1997).

Este elemento se encuentra incluido en la legislación mexicana en aguas y suelos. En el caso del agua la concentración límite permisible de arsénico en agua potable es de 0.05 mg/L (Secretaría de Salud, 1995) y para aguas de descarga en aguas y bienes nacionales se encuentra en un intervalo desde 0.1 mg/L como promedio diario para la protección de la vida acuática, hasta 0.4 mg/L para riego agrícola en suelos (SEMARNAT, 1996). De igual forma, se encuentra legislado directamente en suelos contaminados en un intervalo desde 22 mg/kg para suelos de uso agrícola, residencial y comercial, hasta 260 mg/kg para suelos de uso industrial con una concentración máxima soluble de 0.500 mg/L (SEMARNAT, 2007).

**2. Cadmio (Cd):** El cadmio es un elemento metálico (número atómico 48) que pertenece al grupo de metales de transición (grupo B), raramente es encontrado en estado puro y su distribución promedio es 0,1 mg/kg en la corteza de la tierra. Se le puede encontrar en diferentes tipos de rocas, suelos y en agua, así como en el carbón y el petróleo. Entre sus fuentes naturales se hallan los depósitos de zinc, plomo y cobre (Nordberg y Nordberg, 2002). En suelos superficiales se encuentran concentraciones entre 0.1 y 0.4 mg/kg (Page et al., 1981).

El Cd entra al medio ambiente por fuentes antropogénicas como la minería, la metalurgia, la combustión de carbón y de petróleo, por la mala disposición de residuos sólidos municipales y peligrosos, así como por la quema de plásticos (principalmente PVC). Este elemento tiende a depositarse y adherirse a la materia orgánica del suelo; sin embargo, parte de él se disuelve en agua, por lo que puede llegar a los cuerpos de agua (Lide, 1997; Csuros y Csuros, 2002; ATSDR, 2005).

Las formas más comunes de Cd, incluyen  $Cd^{2+}$ , complejos de cadmio-cianuro y  $Cd(OH)_2$ . Las formas dominantes a pH alto son hidróxidos y carbonatos, mientras que a pH bajo (< 8) predominan el  $Cd^{2+}$  y especies acuosas de sulfato. Bajo condiciones reductoras, en presencia de azufre, se forma el sulfato de cadmio ( $CdS$ ) que, por su estabilidad, controla su movilidad. El Cd también precipita en presencia de fosfato, arseniato, cromato y otros aniones (ATSDR, 2004; Evanko y Dzombak, 1997).

Se encuentra incluido en la legislación mexicana tanto para aguas como para suelos. En el caso del agua, la concentración límite permisible en agua potable es de 0.005 mg/L (Secretaría de Salud, 1995) y en el caso de aguas residuales de descarga en aguas y bienes nacionales se encuentra en un intervalo desde 0.05 mg/L como promedio mensual para riego agrícola hasta 0.4 mg/L para descargas en ríos o embalses procedentes de riego agrícola (SEMARNAT, 1996). Además, se encuentra legislado directamente en suelos contaminados en un intervalo desde 37 mg/kg para suelos de uso agrícola, residencial y comercial, hasta 450 mg/kg para suelos de uso industrial con una concentración máxima soluble de 0.100 mg/L (SEMARNAT, 2007).

**3. Cobre (Cu):** El cobre pertenece al grupo IB de la tabla periódica. Es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza que, aunque puede encontrarse en forma elemental, comúnmente está presente en minerales que contienen sulfuros, cloruros y carbonatos (Evanko y Dzombak, 1997). Aunque el Cu en cantidades traza es esencial para la vida, en grandes cantidades resulta tóxico. En el ambiente se encuentra comúnmente con una valencia de +2, pero puede existir con valencias 0, +1 y +3. La abundancia natural en la corteza de la tierra del Cu se ha estimado en 60 mg/kg (Lide y Frederikse, 1993). Aparece en minerales tales como la cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ). El contenido de Cu en rocas ígneas va de 4-200 mg/kg y de 2- 90 mg/kg en rocas sedimentarias (Cannon et al., 1978). El Cu liberado al ambiente, generalmente se adhiere a la materia orgánica del suelo, sin embargo, algunos compuestos de cobre son solubles, por lo cual puede encontrarse también en el agua (Lide, 1997; ATSDR 2005). La concentración promedio establecida para el Cu en el suelo es de 6 a 80 mg/kg (Ramos, 2006).

Este elemento se encuentra incluido en la legislación mexicana solo para aguas. El límite permisible de cobre en agua potable es de 2.00 mg/L (Secretaría de Salud, 1995), por otro lado, para aguas residuales de descarga en aguas y bienes nacionales se encuentra en un intervalo desde 4.0 mg/L como promedio diario para protección de la vida acuática, hasta 6.0 mg/L para riego agrícola en suelos (SEMARNAT, 1996).

**4. Cromo (Cr):** El Cr es un elemento ubicado en el grupo B (metales de transición) en la tabla periódica. Es uno de los elementos menos comunes y no se encuentra naturalmente en forma elemental, sólo en compuestos. La concentración de Cr varía en promedio de 5 a 1800 mg/kg en rocas graníticas y rocas ultrabásicas, respectivamente. La forma mineral más importante es la cromita ( $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$ ) aunque raramente se encuentra pura (WHO, 1988). El cromo puede presentarse en varios estados de oxidación, pero las formas más estables son el Cr(III) y el Cr (VI). Estas tienen propiedades químicas diferentes: El Cr (VI) existe como un anión, se extrae fácilmente del suelo y partículas de sedimento y es considerado la forma más tóxica. El Cr (VI) con su alto potencial reductor es fuertemente oxidante y en presencia de materia orgánica se reduce a Cr (III) (Cary et al, 1977).

Se encuentra incluido en la legislación mexicana tanto para aguas como para suelos. En el caso del agua, la concentración límite permisible del cromo total en agua potable es de 0.05 mg/L (Secretaría de Salud, 1995) y en el caso de aguas residuales de descarga en aguas y bienes nacionales se encuentra en un intervalo desde 0.5 mg/L como promedio mensual para riego agrícola en suelos hasta 1.5 mg/L para descargas en ríos o embalses procedentes de riego agrícola (SEMARNAT, 1996). En el caso de suelos contaminados, se encuentra legislado como cromo hexavalente en un intervalo desde 280 mg/kg para suelos de uso agrícola, residencial y comercial, hasta 510 mg/kg para suelos de uso industrial con una concentración máxima soluble, en caso de la existencia de un acuífero vulnerable, de 2.0 mg/L (SEMARNAT, 2007).

**5. Plomo (Pb):** Se ubica en el grupo IVA en la tabla periódica. La concentración promedio de Pb en la corteza es de 10 a 20 mg/kg. Las fuentes naturales de este elemento son las emisiones volcánicas, intemperismo geoquímico, los aerosoles marinos y su fuente geológica fundamental son las rocas metamórficas e ígneas. Los minerales donde se encuentra este elemento son la anglesita ( $\text{PbSO}_4$ ) y principalmente la galena ( $\text{PbS}$ ), el cual se presenta en depósitos asociados a otros minerales, principalmente aquellos que contienen zinc (WHO, 1977). El Pb tiene valencias +2 y +4, de las cuales el Pb(II) es la forma más común y reactiva. Los principales sitios de Pb en el suelo son la solución del suelo, superficie de adsorción de los complejos de intercambio de arcilla-humus, formas precipitadas, óxidos de Fe y Mn (Petrovic, 1999). Cabe mencionar que el contenido natural de Pb en suelo y ecosistemas terrestres, es difícil de determinar por la influencia significativa de las actividades humanas.

Se encuentra incluido en la legislación mexicana tanto para aguas como para suelos. En el caso del agua, la concentración límite permisible del plomo en agua potable es de 0.025 mg/L (Secretaría de Salud, 1995) y en el caso de aguas residuales de descarga en agua y bienes nacionales se encuentra en un intervalo desde 0.2 mg/L como promedio diario para la protección de la vida acuática hasta 5 mg/L para suelos con riego agrícola (SEMARNAT, 1996). En el caso de suelos contaminados, se encuentra legislado y los límites se encuentran en un intervalo desde 400 mg/kg para suelos de uso agrícola, residencial y comercial, hasta 800 mg/kg para suelos de uso industrial con una concentración máxima soluble, en caso de la existencia de un acuífero vulnerable de 0.500 mg/L (SEMARNAT, 2007).

**6. Zinc (Zn):** Se clasifica como un metal de transición (grupo B) en la tabla periódica. El Zn es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre, con una concentración promedio de 40 mg/kg. El nivel promedio establecido de Zn en el suelo varía de 17 a 125 mg/Kg (Ramos, 2006). Es un elemento que no se encuentra naturalmente en forma elemental, por lo que generalmente se extrae de la esfalerita ( $\text{ZnFeS}$ ), forma comúnmente asociada a la galena ( $\text{PbS}$ ). El Zn tiene una valencia de +2 y forma complejos con aniones, aminoácidos y ácidos orgánicos. Es uno de los metales pesados más móviles debido a que se encuentra en forma soluble a pH neutro o ácido. A pH alcalino puede formar carbonatos e hidróxidos. Bajo condiciones reductoras, en sistemas muy contaminados cuando se encuentra presente en concentraciones muy elevadas, puede precipitar fácilmente como  $\text{Zn(OH)}_2$ ,  $\text{ZnCO}_3$  o  $\text{ZnS}$ , y co-precipitar con óxidos de Fe o Mn (Evanko y Dzombak 1997).

El Zinc se encuentra incluido en la legislación mexicana solo para aguas. El límite permisible de Zinc en agua potable es de 5.00 mg/L (Secretaría de Salud, 1995), por otro lado, para aguas residuales de descarga en aguas y bienes nacionales se encuentra en un intervalo desde 10 mg/L como promedio diario para protección de la vida acuática, hasta 20 mg/L como promedio mensual para riego agrícola en suelos (SEMARNAT, 1996).

**7. Hierro (Fe):** El hierro es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, comprendiendo aproximadamente el 5 % de la litosfera. La concentración típica de hierro en el suelo se encuentra en el intervalo de 0.2 – 55%, sin embargo, esto varía dependiendo del tipo de suelo y de la presencia de otras fuentes de hierro. Se presenta en dos valencias, +2 y +3, el ión ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) es más soluble en comparación con el hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), el cual se encuentra en los suelos, principalmente como óxidos de hierro. En México, el hierro se encuentra incluido solo dentro de la legislación de agua potable con un límite permisible de 0.3 mg/L (Secretaría de Salud, 1995), sin embargo, no existen regulaciones acerca de los límites permisibles en aguas residuales de descarga ni en suelos.

La tabla 7 resume las características de los elementos antes mencionados:

**Tabla 7. Atributos de los principales elementos potencialmente tóxicos presentes en suelos y sedimentos. Modificado de Hansel et al., 2001; Adriano, 2001.**

Elemento	Símbolo	Número atómico (Z)	Valencias	Familia	Concentración media en la corteza terrestre (mg/kg)	Especies iónicas en la solución del suelo
Arsénico	As	33	3, 5	V A	1 a 2	As (III), $\text{As}(\text{OH})_3$ , As(V), $\text{AsO}_3^{-3}$ , $\text{H}_2\text{As}_4^-$ , $\text{HASO}_4^{2-}$
Cadmio	Cd	48	2	II B	0.1	$\text{Cd}^{2+}$ , $\text{CdOH}^+$ , $\text{CdCl}^-$ , $\text{CdHCO}_3$ , $\text{CdSO}_4$
Cobre	Cu	29	1, 2	IB	60	$\text{Cu}^{2+}$
Cromo	Cr	24	2, 3, 6	VIB	92	$\text{Cr}^{3+}$ : $\text{CrO}_2^-$ , $\text{CrOH}_2^+$ , $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ ; $\text{Cr}^{6+}$ : $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ , $\text{CrO}_4^{2-}$
Plomo	Pb	82	2,4	IVA	10 a 20	$\text{Pb}^{2+}$ , $\text{PbOH}^+$ , $\text{PbCl}^-$ , $\text{PbHCO}_3^+$ , $\text{PbSO}_4$
Zinc	Zn	30	2	II B	40	$\text{Zn}^{2+}$ , $\text{ZnSO}_4$ , $\text{ZnCl}^+$ , $\text{ZnHCO}_3^-$ , $\text{ZnCO}_3$
Hierro	Fe	26	2, 3	VIII B	5.042 % como óxidos	$\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$



## HIPÓTESIS

---

1. Al infiltrarse la solución ácida ferrocuprífera en los suelos, estos funcionarán como amortiguadores de algunos de los EPT contenidos en la misma, facilitando la retención de los mismos.
2. Al infiltrarse la solución ácida ferrocuprífera en los sedimentos del río, estos funcionarán como amortiguadores de algunos de los EPT contenidos en la misma, facilitando la retención de los mismos.
3. La capacidad amortiguadora de los suelos/sedimentos variará a lo largo de la cuenca del río Sonora, debido a diferencias en sus características físicas y químicas, siendo mayor en los suelos, debido principalmente a su mayor superficie de contacto (relacionado esto al contenido de arcillas) y a la variación del contenido de carbonatos.
4. Después de estudios de movilidad de EPT en columnas inalteradas de suelo y sedimento, la concentración total de los mismos aumentará después de los riegos debido a procesos de retención.
5. Después de la interacción de la solución ácida ferrocuprífera con los suelos y sedimentos de la zona de estudio, existirán cambios físicos, químicos y mineralógicos en ambas matrices, principalmente cambios de coloración asociados a la precipitación de nuevos minerales.
6. La precipitación de minerales secundarios facilitará la retención de EPT, que estarán presentes en la estructura de esas nuevas fases, además, la presencia de nuevas superficies de sorción permitirán la retención de los mismos.
7. Debido a las características de la solución ácida (relacionada a su fuerte acidez), tras su paso por los suelos/sedimentos, provocará una redistribución de sólidos en las columnas, lo cual resultará en una modificación de su estructura y entonces, en una modificación de la velocidad de infiltración.

## JUSTIFICACIÓN

---

Con la información generada en este trabajo, se pretende aportar nuevos conocimientos para mejorar la comprensión de los procesos de retención y movilidad de EPT contenidos en la solución ácida ferrocuprífera derramada en la parte alta de la cuenca del río Sonora, cuando se pone en contacto con los suelos/sedimentos de la zona, con énfasis en determinar la capacidad amortiguadora de dichos suelos/sedimentos.

## OBJETIVOS

---

### General:

Evaluar la movilidad y los posibles procesos de retención de EPT en suelos y sedimentos de la parte alta de la cuenca del río Sonora.

### Específicos:

1. Caracterizar y diferenciar en campo sitios afectados por el derrame de la solución ácida ferrocuprífera mediante perfiles de excavación.
2. Identificar sitios de interés a lo largo de la parte alta de la cuenca del río Sonora, para el estudio de los procesos de retención de los EPT contenidos en la solución ácida ferrocuprífera, en suelos y sedimentos no afectados por el derrame.
3. Caracterizar física y químicamente a los suelos y sedimentos no afectados seleccionados, en base a los parámetros relativos a la capacidad de amortiguamiento de EPT.
4. Evaluar la movilidad de los EPT contenidos en la solución ácida ferrocuprífera mediante experimentos de transporte en columnas inalteradas de suelo y sedimento.
5. Determinar mediante diagramas Eh vs pH y modelación geoquímica el comportamiento químico de los diferentes EPT tras su paso por los diferentes suelos/sedimentos.
6. Evaluar la concentración de los EPT antes y después de los experimentos en columna, así como comparar los resultados con los valores naturales de fondo de la zona de estudio.
7. Determinar cambios físicos, químicos y mineralógicos en los suelos y sedimentos después de su interacción con la solución ácida ferrocuprífera.
8. Estudiar posibles cambios estructurales en los suelos y sedimentos después de su interacción con la solución ácida.

## **CAPÍTULO 4**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

---

#### **4.1 Muestreo de sedimentos y columnas inalteradas de suelos y sedimentos.**

La selección de los sitios de estudio para este trabajo se llevó a cabo considerando su localización geográfica respecto al punto del derrame de la solución ácida ferrocuprífera. Se realizaron excavaciones en 4 sitios seleccionados aguas abajo del represo “Tinajas 1” a diferentes distancias del sitio del derrame entre los meses de marzo y mayo del año 2015, con el propósito de determinar los sitios afectados por la solución ácida. Las excavaciones abarcan la parte norte de la cuenca del río Sonora, dentro del arroyo Tinajas y el río Bacanuchi, dichos sitios presentan evidencias de derrames ácidos mediante coloraciones amarillas en algunas profundidades, sin embargo, no es posible asegurar que estos sitios hayan sido afectados por el derrame del 6 de agosto de 2014. La información detallada de las excavaciones se presenta en el **ANEXO 1**.

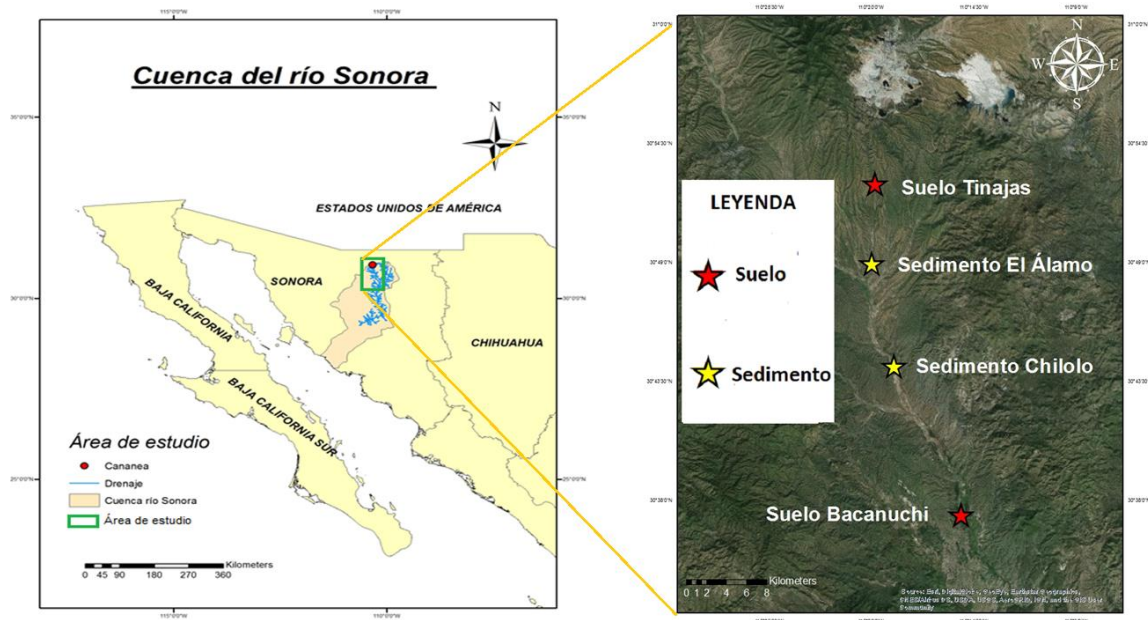
En cada excavación se registró aproximadamente a cada 10 cm de profundidad el contenido de humedad ( $\theta$  %) y la conductividad eléctrica (CE) utilizando una sonda TDR marca Delta Device HR2. De igual forma, se caracterizaron en laboratorio los siguientes parámetros en muestras de sedimento tomadas a diferentes profundidades:

- pH y CE: Se determinaron en suspensiones sedimento: solución (1:2,5), utilizando como solución agua destilada. Las suspensiones se agitaron durante 18 h y posteriormente el pH se determinó con un potenciómetro marca Bekman y la CE con un conductímetro marca Lamotte.
- Contenido total de elementos mayores y elementos traza: se determinó en muestras secas al aire y homogenizadas con molino de ágata, mediante Fluorescencia de Rayos X.

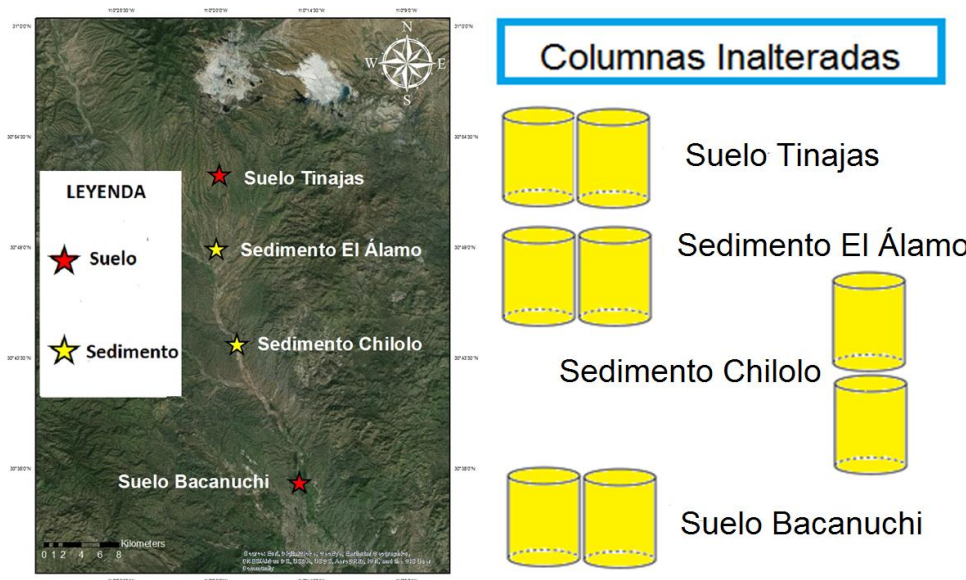
Por su parte, con el fin de determinar la movilidad de EPT y la capacidad amortiguadora de suelos y sedimentos de la sección norte (parte alta) de la cuenca del río Sonora, además de determinar los cambios estructurales sufridos en suelos y sedimentos por el paso de la solución ácida ferrocuprífera, se colectaron muestras de columnas inalteradas de suelo y sedimento entre los meses de marzo y mayo del año 2015 en cuatro sitios seleccionados, en donde no se observaron evidencias de ningún derrame ácido, dichos sitios se pueden observar en las figuras 9 y 10. En lo que respecta a los suelos, las muestras fueron tomadas sobre las terrazas adenañas al arroyo Tinajas y al río Bacanuchi, esperando encontrar suelo fluvial formado a partir de materiales provenientes de los suelos de las zonas más altas que contengan propiedades amortiguadoras (arcillas, carbonatos y/o materia orgánica). De igual forma, se tomaron muestras superficiales de suelos y sedimentos en cada sitio en donde se colectaron las muestras de columnas, con la finalidad de realizar análisis físicos y químicos en las mismas. Los pasos para la toma de las columnas inalteradas en campo se observan en el **ANEXO 2**.

**CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.**

Los puntos presentados en la tabla 8 describen los sitios en donde se tomaron las muestras de columnas inalteradas de suelos y sedimentos del sitio de interés. En cada punto se especifica su ubicación geográfica, el tipo de muestra colectada, la localidad en la que se encuentra ubicada y la distancia de la muestra al punto donde ocurrió el derrame de la solución ácida ferrocuprúfera en el represo “Tinajas 1”.



**Figura 9. Mapa de localización de las columnas inalteradas de suelos y sedimentos tomadas en la parte alta de la cuenca del río Sonora.**



**Figura 10. Localización de los sitios donde se colectaron muestras de columna de suelos y sedimentos. En el lado derecho se representan las columnas inalteradas que fueron tomadas en los sitios mencionados, estableciendo el número y la disposición en que fueron muestreadas.**

**Tabla 8. Ubicación de las columnas inalteradas de suelos y sedimentos.**

Columna	Ubicación		Tipo de muestra	Localidad	Distancia al sitio del derrame (km)
	X	Y			
<b>Suelo Tinajas</b>	563975	3416154	Columna inalterada de suelo en la terraza del arroyo Tinajas	Al sur del Represo "Tinajas 1"	6.7
<b>Sedimento El Álamo</b>	563788	3409369	Columna inalterada de sedimento en lecho del arroyo Tinajas	Excavación Rancho el Álamo	14
<b>Sedimento Chilolo</b>	565693	3400666	Columna inalterada de sedimento en lecho del río Bacanuchi	Excavación Rancho la Cabellera (Chilolo)	24.5
<b>Suelo Bacanuchi</b>	571530	3387956	Columna inalterada de suelo en la terraza del río Bacanuchi	Bacanuchi norte	40.3

#### **4.2 Análisis físicos y químicos en muestras superficiales de suelos y sedimentos colectadas en la parte alta de la cuenca del río Sonora en zonas sin evidencia de ningún derrame.**

Como se mencionó con anterioridad, se tomaron muestras superficiales de suelos y sedimentos sobre la terraza y el lecho del arroyo Tinajas y el río Bacanuchi, con el propósito de realizar análisis físicos y químicos, todo ello con la finalidad de conocer las características amortiguadoras de los suelos y sedimentos previo a los experimentos de movilidad de EPT. La metodología realizada en cada análisis se detalla a continuación:

### 1. Análisis físicos.

Los análisis físicos en las muestras superficiales se realizaron en el Laboratorio *de Física de Suelos y Cuarto de Experimentación en Columnas* del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Los análisis realizados fueron: determinación de color en seco y húmedo, textura, conductividad hidráulica, densidad aparente, densidad real y porosidad. De igual forma, se realizó un análisis de superficie específica en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Pevio a los análisis se realizó la preparación de las muestras, la cual incluyó el secado, tamizado, homogenizado y cuarteado de las mismas. El secado se realizó con el propósito de facilitar el manejo de las muestras, las cuales fueron secadas en un horno a una temperatura de 30°C. Una vez secadas las muestras, se retiraron las piedras y los restos de plantas para su posterior disgregamiento y tamizado en una malla de 2mm de diámetro (malla 10), en el cual se descarta el material grueso que queda retenido en las mallas de mayor diámetro (Figura 11 A). Posteriormente se realizó el homogenizado y cuarteado, lo cual es necesario para asegurar que la cantidad de muestra que se analiza represente la composición de la cantidad total de la muestra una vez tamizada. Para este proceso se colocó la muestra en una charola en donde se mezcló varias veces, dividiéndose a la mitad y tomando los dos extremos contrarios a la división (Figura 11 B). Esta actividad se repitió hasta obtener entre 300 y 500g de muestra.



Figura 11. Imagen A. Tamizado de las muestras, en donde queda retenido el material grueso. Imagen B. Cuarteado de las muestras.

El método utilizado en los diferentes análisis físicos realizados en las muestras superficiales puede observarse en el **ANEXO 3**.

## 2. Análisis químicos.

El primer análisis químico realizado en las muestras, correspondió a la estimación del contenido de carbonatos, el cual se estimó en campo observando la efervescencia de las muestras al adicionar ácido clorhídrico (HCl) al 10% (Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo, 2006).

Por su parte, se determinó el punto de carga cero (PZC, por sus siglas en inglés) en las muestras superficiales de suelos y sedimentos. El PZC es el pH en el que una superficie mineral cambia el signo de su carga eléctrica. Si una superficie cambia su carga neta superficial como resultado de la adsorción de iones  $H^+$  u  $OH^-$ , el pH en el que se produce el cambio de signo recibe el nombre de punto de carga protónica neta cero o punto isoeléctrico (Stumm y Morgan, 1996). El punto de carga cero es una propiedad relevante en la capacidad que tiene un medio sólido específico para retener ciertos contaminantes iónicos, entre ellos los metales pesados.

La prueba para determinar el PZC se realizó en el laboratorio 104 de la Facultad de Química de la UNAM. Para este análisis se disgregaron las partículas de las muestras en un mortero de ágata hasta obtener tamaños homogéneos de las mismas. Se preparó para cada muestra una solución de 500 ml con agua destilada, la cual fue vertida en 10 vasos de 50 ml. Posteriormente, a cada uno de los vasos se les agregó aproximadamente 100 mg de las muestras de suelo y sedimento. En cada una de las soluciones se ajustó el pH entre 2.5 y 10 unidades, dejando una solución a su pH natural. Para ajustar el valor de pH se agitaron las soluciones y se adicionaron cantidades variables de HCl 0.1 M (para acidificar) o NaOH 0.1 M (para basificar) hasta obtener los valores deseados. Las mediciones del pH previa agitación y adición de HCl y/o NaOH se realizaron con un potenciómetro Metrohm 620 pH-Meter. Una vez obtenidas las soluciones con diferentes valores de pH, las medidas para obtener el punto de carga cero se realizaron en un equipo de medición de potencial Z marca ZETA-METER 3.0+ (Figura 12).



Figura 12. Equipo usado en la medición del potencial Z para la determinación del punto de carga cero (PZC).

#### CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.

El punto de carga cero es el valor de pH en donde una suspensión de determinado número de partículas presenta la más baja movilidad en un campo eléctrico (Romero, 2012). El análisis del punto de carga cero, permite conocer de forma indirecta los valores de pH en los que las superficies de ciertos minerales pueden retener metales pesados vía sorción.

Cuando el pH del medio es inferior al punto de carga cero, las partículas se cargan positivamente, por lo cual los aniones pueden ser retenidos en la superficie de los sólidos vía sorción. Por otro lado, cuando el pH del medio es superior al punto de carga cero, las partículas se cargan negativamente y puede existir retención vía sorción de cationes en la superficie de los sólidos (Romero, 2012).

En la tabla 9 se presentan los valores del PZC para algunos minerales.

**Tabla 9. Punto de carga cero de algunos minerales. Tomado de Romero, 2012.**

Mineral	PZC (pH)
Caolinita	4.6
Montmorillonita	2.5
MnO <sub>2</sub>	2.2
SiO <sub>2</sub>	2.5
Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.5 - 8.5
Fe(OH) <sub>3</sub>	8.6
Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	8.5
Al (OH) <sub>3</sub>	8.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.1
Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	8.0 - 9.5

Considerando que el pH del agua subterránea varía entre 6.5 y 8.5, es posible considerar los siguientes puntos:

- El pH del agua es inferior al punto de carga cero de oxihidróxidos de Fe y carbonatos (8.5 - 9.9), por eso se cargan positivamente (preferentemente) y su mayor capacidad es retener metaloides y no metales.
- El pH del agua es superior al punto de carga cero de las arcillas (2.5-4.6), por eso se cargan negativamente preferentemente y su mayor capacidad es retener metales pesados.



Finalmente, con el objetivo de conocer la importancia del contenido de carbono orgánico en la retención de EPT, se realizó la cuantificación de carbono orgánico total en las muestras de suelo y sedimento superficiales pertenecientes a la parte norte de la cuenca del río Sonora.

La determinación de carbono orgánico total (COT) se llevó a cabo en el Laboratorio de Biogeoquímica de suelos del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) de la Universidad Nacional Autónoma de México. La cuantificación de carbono se realizó en un analizador coulométrico de carbono marca UIC mod CM 5012 (Chicago, EUA). El análisis de carbono total (Ct) se realizó mediante combustión a 950°C bajo flujo de O<sub>2</sub> y posterior cuantificación coulométrica del CO<sub>2</sub> generado (Huffman, 1977). La cuantificación de carbono inorgánico (CI) se llevó a cabo en módulo de acidificación del mismo equipo en el cual se acidificó la muestra con HCl 2N para la generación de CO<sub>2</sub>. El valor de carbono orgánico (Corg) se calculó como la diferencia entre el Carbono total menos el Carbono inorgánico. Todas las formas de Carbono se reportan como porcentaje (%).

### **4.3 Evaluación de la movilidad de elementos potencialmente tóxicos en suelos y sedimentos de la zona de estudio mediante experimentos en columnas inalteradas.**

#### **4.3.1 Condiciones experimentales.**

El análisis de los procesos que gobiernan el destino ambiental de los EPT en la cuenca del río Sonora requiere de experimentos que pongan en contacto a los suelos y sedimentos con la solución ácida ferrocuprífera derramada, en condiciones similares a la realidad; con esa intención, se realizaron experimentos en columnas inalteradas de suelos y sedimentos (La ubicación de las columnas y sus características se observan en la Figura 9 y Tabla 8) a lo largo de la zona de estudio, en las cuales se evaluó el movimiento de los EPT contenidos en la solución ácida, a través de la estructura y porosidad originales. El objetivo fundamental de estos experimentos fue evaluar la movilidad y/o la capacidad de retención de EPT en los suelos y sedimentos analizados. Para realizar los experimentos de movilidad de los EPT en columnas de suelos y sedimentos de la zona de estudio, se colectó en campo una muestra compuesta de la solución ácida ferrocuprífera, que corresponde a la misma solución derramada en el represo "Tinajas 1".

Con el propósito de poner en contacto la solución ácida ferrocuprífera con las columnas de suelo y sedimento, se simuló la infiltración de la solución en las columnas mediante diferentes riegos de la muestra compuesta. Estos riegos se realizaron en el invernadero y en el cuarto de temperatura constante del Instituto de Geología de la UNAM. Los riegos consistieron en verter en la parte superior de las columnas un volumen de la solución ácida equivalente a un volumen de poro de cada columna, esto con el propósito de lograr que todos los poros del suelo/sedimento fuesen visitados por la solución. El volumen de poro se estimó multiplicando el volumen de cada columna por su porosidad total.

#### CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.

Las columnas fueron equipadas con lisímetros de succión y electrodos redox en diferentes profundidades (Figura 13), los primeros fueron usados para coleccionar muestras de solución de suelo, para permitir conocer la variación de la concentración de los EPT durante el tiempo de los experimentos, por su parte, los electrodos redox se instalaron con el propósito de determinar el potencial redox a medida que avanzaba el frente de infiltración a lo largo de cada columna durante el tiempo de duración de los experimentos. Durante los riegos se mantuvo una lámina constante de la solución ácida en la superficie de las columnas (de 2 a 4 cm). La solución suministrada se dejó pasar por gravedad a través de las columnas y el lixiviado se recuperó en tubos de centrifuga de 50 ml en la parte inferior de las mismas y en lisímetros de succión en tubos para la recolección de muestras sanguíneas de plástico (vacutainers) a diferentes profundidades. Para cada lixiviado obtenido a lo largo de los riegos, se midió el pH y la conductividad eléctrica para inferir el tipo de especies metálicas presentes en solución.

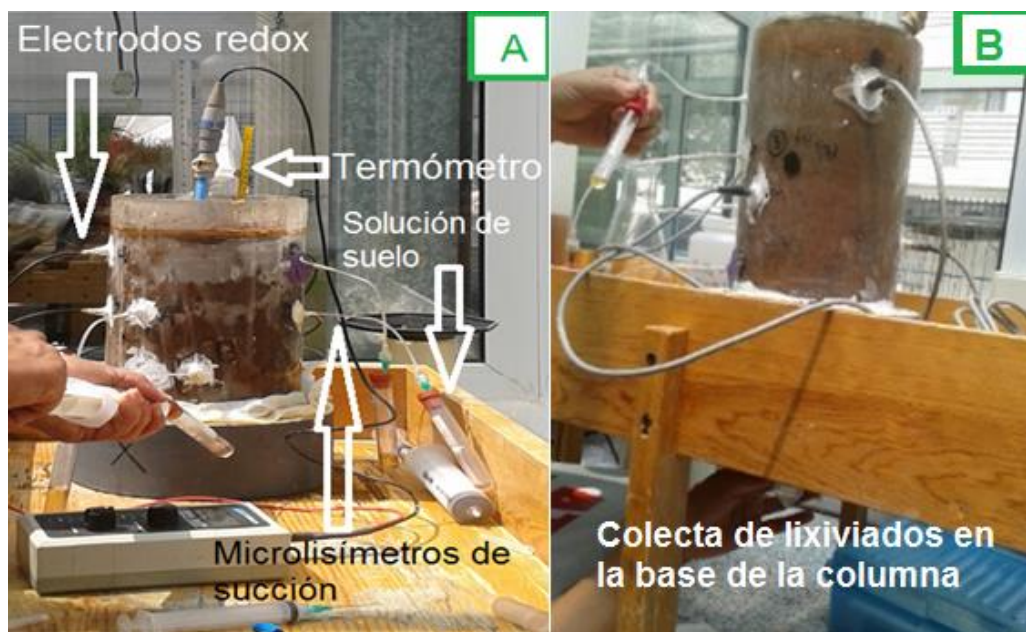


Figura 13. Imagen A. Columna de suelo instrumentada para los experimentos de movilidad de elementos potencialmente tóxicos, donde se observa la instrumentación con electrodos redox, termómetro, microlisímetros de succión, etc. Imagen B. Toma de muestra en la base de la columna de suelo después de un evento de riego con solución ácida ferrocuprífera.

La medición del pH se realizó en un potenciómetro marca Bekman calibrado con soluciones buffer de pH = 4 y pH = 7. Por su parte, la medición de la Conductividad Eléctrica (CE) se leyó con un conductímetro marca Lamotte calibrado con una solución de calibración de 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Todas las muestras colectadas durante el riego se centrifugaron por 15 minutos a 2500 rpm para separar los componentes solubles de los sólidos en suspensión, posteriormente el sobrenadante se filtró con filtros de jeringa de 0.45  $\mu\text{m}$  y se acidificaron con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$  2M) para evitar la precipitación de los metales a analizar. Posteriormente, se determinó el contenido de EPT en solución por medio de la técnica analítica de espectrometría de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) con el uso de un equipo Perkin-Elmer Optima 8300 DV con automuestreador S10

**CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.**

Perkin-Elmer, el cual se encuentra en el laboratorio de espectroscopia atómica del Instituto de Geología de la UNAM.

Así mismo, en los lixiviados colectados en cada riego se determinaron las concentraciones de aniones mayoritarios utilizando la técnica de cromatografía iónica (cromatógrafo modelo 883 Metrohm IC) en el laboratorio de cromatografía del Instituto de Geología de la UNAM.

En todas las columnas se aplicó un primer riego con la muestra compuesta de la solución ácida, posteriormente se aplicó un segundo riego en todas las columnas (con excepción de la columna Bacanuchi) con una solución de  $\text{CaCl}_2$  0.005 M. Estos dos riegos se realizaron para simular lo ocurrido en campo: la llegada de la solución ácida ferrocuprífera y a continuación la crecida del río Tinajas debido a precipitaciones pluviales. Finalmente, se aplicó un tercer y un cuarto riego con la solución ácida ferrocuprífera en las columnas Tinajas, El Álamo y Bacanuchi, con el propósito de facilitar cambios físico-químicos ocasionados por la interacción de la solución ácida y las matrices de suelo/sedimento. En la siguiente tabla se resume el número total de riegos y el volumen de la solución aplicada en cada columna.

**Tabla 10. Diferentes eventos de riego en cada columna.**

<b>Columna</b>	<b>Número de riegos</b>	<b>Solución aplicada</b>	<b>Volumen de solución aplicada (ml)</b>
<b>Tinajas</b>	1	Solución ácida ferrocuprífera	2000
	2	$\text{CaCl}_2$ 0.005 M	2000
	3	Solución ácida ferrocuprífera	2000
	4	Solución ácida ferrocuprífera	2000
<b>Rancho El Álamo</b>	1	Solución ácida ferrocuprífera	2120
	2	$\text{CaCl}_2$ 0.005 M	1060
	3	Solución ácida ferrocuprífera	2000
	4	Solución ácida ferrocuprífera	2000
<b>Rancho Chilolo</b>	1	Solución ácida ferrocuprífera	1880
	2	$\text{CaCl}_2$ 0.005 M	1000
<b>Bacanuchi</b>	1	Solución ácida ferrocuprífera	2200
	2	Solución ácida ferrocuprífera	2000
	3	Solución ácida ferrocuprífera	2000

Con la intención de determinar cuáles EPT fueron retenidos y/o liberados en cada riego para cada columna, los resultados obtenidos en estos experimentos se presentan en forma de curvas de elución. Una curva de elución es el gráfico de la concentración del metal en los lixiviados obtenidos (C), versus el tiempo experimental. Con el objeto de comparar los resultados obtenidos entre las diferentes columnas evaluadas, fue necesario adimensionalizar las curvas de elución, para esto la concentración del elemento en el lixiviado (C) fue dividida entre la concentración del elemento en la solución ácida aplicada

(Co), y el tiempo experimental fue expresado en términos de volumen de poro de la columna. El obtener curvas de elución adimensionales permite identificar a los elementos que fueron retenidos durante el paso de la solución ácida ferrocuprífera a través del suelo/sedimento ( $C/Co < 1$ ), a los elementos que fueron liberados desde el suelo/sedimento ( $C/Co > 1$ ), y a los que pasaron inertes ( $C/Co = 1$ ).

Para determinar el porcentaje retenido de cada EPT en cada columna durante los diferentes riegos realizados se utilizaron dos métodos diferentes, mediante balances de masa y mediante la determinación del área bajo la curva.

Los balances de masa se realizaron en cada uno de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera con el uso de las siguientes ecuaciones:

- 1) Para determinar la masa lixiviada de cada EPT en los lixiviados colectados en la base de cada columna se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{mg de cada EPT} = \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ en cada lixiviado} \right) * (\text{Volumen de cada lixiviado en L}) \rightarrow$$

**(Ecuación 2).**

- 2) Se sumaron las masas de cada EPT en el total de lixiviados colectados para cada riego.

$$\text{masa total de cada EPT} = \Sigma \text{ de los mg de cada EPT en cada lixiviado} \rightarrow$$

**(Ecuación 3).**

Los valores obtenidos con el uso de la ecuación 3 se multiplicaron por 3, considerando que fueron analizadas en promedio únicamente una tercera parte de las muestras de lixiviados (esta multiplicación no se realizó en la columna de sedimento Chilolo ya que fueron analizados el total de lixiviados colectados). Se tiene claro que el valor obtenido es probablemente una sobreestimación de la masa lixiviada, sin embargo, puede considerarse como un valor conservador hablando de riesgo ambiental.

- 3) Para calcular la masa total añadida de cada EPT para cada riego se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{mg añadidos} = \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ de cada EPT en la solución ácida} \right) * (\text{Volumen añadido en L}) \rightarrow$$

**(Ecuación 4).**

- 4) Con el uso de la ecuación 5 se determinó el porcentaje de la masa total de cada EPT lixiviado obtenido en la base de la columna en relación al total añadido.

$$\text{Porcentaje lixiviado de cada EPT} = \frac{(\text{masa total de cada EPT en mg})}{(\text{masa total añadida de cada EPT en mg})} * (100) \rightarrow$$

**(Ecuación 5).**

- 5) Finalmente, para determinar el porcentaje retenido, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje retenido de cada EPT} = 100 - \text{Porcentaje lixiviado} \rightarrow$$

**(Ecuación 6).**

#### CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS

El uso de las ecuaciones 2-6 se llevaron a cabo en los riegos con la solución ácida para todas las columnas, en donde se conocía la concentración original de cada EPT presente en dicha solución. Por su parte, en los riegos con la solución de  $\text{CaCl}_2$  (donde no se determinaron concentraciones solubles de ninguno de los EPT analizados en este trabajo) se utilizó la ecuación 7 para determinar el porcentaje liberado de cada uno de los EPT retenidos durante el riego previo con la solución ácida ferrocuprífera.

Con la ecuación 7 se determinó la relación entre la masa lixiviada de cada EPT durante los riegos con  $\text{CaCl}_2$  y la masa de cada EPT retenida durante el primer riego en cada una de las columnas.

$$\% \text{ liberado de cada EPT} = \left( \frac{\text{masa total liberada en mg en el riego con CaCl}_2}{\text{masa total retenida en el primer riego en mg}} \right) * 100 \rightarrow \text{(Ecuación 7)}.$$

Como se mencionó anteriormente, además del uso de los balances de masa (ecuaciones 2-7), se determinó la concentración retenida de cada EPT mediante el cálculo del área bajo la curva en cada una de las curvas de elución realizadas. Éste cálculo se realizó con el uso del software SigmaPlot 12.3.

Tomando en cuenta la figura 14, mediante la determinación del área bajo la curva, es posible calcular la relación total entre la concentración lixiviada de cada EPT (C) y su concentración en la solución ácida ( $C_0$ ). Con ello, es posible calcular con el total de lixiviados analizados el porcentaje liberado en la base de las columnas en relación a la cantidad añadida de cada EPT, y por lo tanto, el porcentaje retenido después del paso de la solución ácida en cada uno de los suelos/sedimentos estudiados.

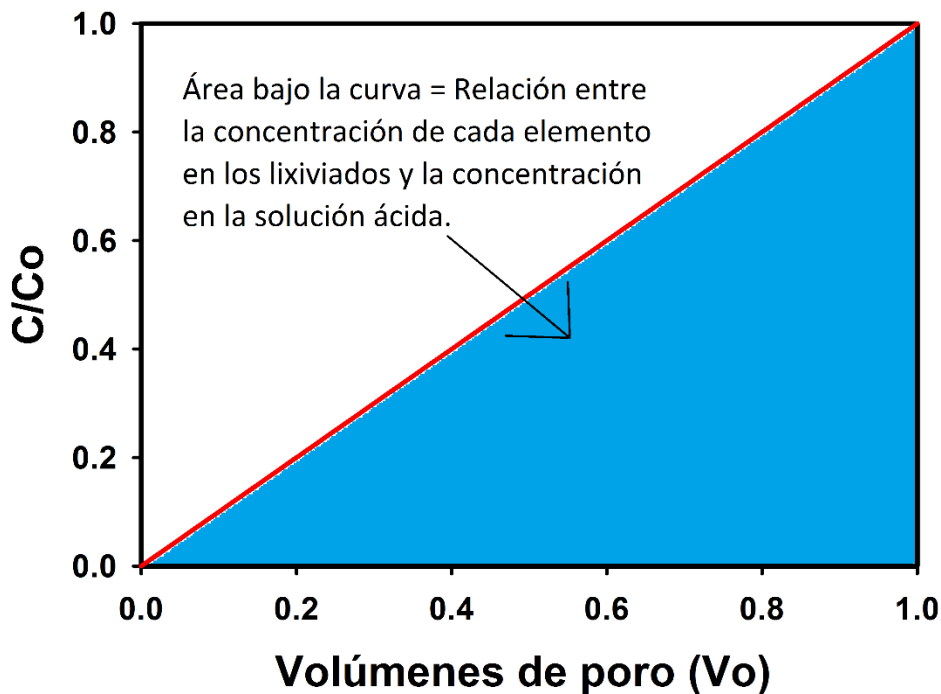


Figura 14. Área bajo la curva.

El área bajo la curva calculada para cada riego en cada columna presenta las unidades de C/Co, es decir, implica la concentración lixiviada versus la concentración añadida de cada EPT. Para la determinación del porcentaje retenido de cada EPT se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{retenido de cada EPT} = (1 - \text{área bajo la curva}) * 100 \rightarrow \text{(Ecuación 8)}.$$

En todos los lixiviados colectados en la base de las columnas en todos los eventos de riego, se caracterizaron estadísticamente las poblaciones de datos obtenidos para cada una de las variables determinadas, mediante medidas de tendencia central y variabilidad. Para la obtención de estos datos se empleó el programa de cálculo Microsoft Excel 2013. Se caracterizaron los siguientes parámetros:

- N° de datos
- Media
- Mediana
- Desviación estándar
- Valor mínimo
- Valor máximo

De igual forma, se determinaron los cambios en los flujos de los lixiviados colectados en la base de las columnas en cada episodio de riego, lo cual permite inferir a grandes rasgos las modificaciones estructurales y de porosidad que han sufrido las matrices de suelo y sedimento después del paso de la solución ácida. En el **ANEXO 4** se presenta el procedimiento detallado usado para evaluar la movilidad de EPT en los estudios en columnas inalteradas.

#### **4.3.2 Análisis del potencial redox en los diferentes riegos con la solución ácida en las columnas de suelo/sedimento.**

Como se mencionó con anterioridad, se instalaron electrodos redox en todas las columnas en donde se regó la solución ácida ferrocuprífera, con la intención de monitorear la variación del potencial redox (Eh) durante los diferentes experimentos. Dicho parámetro se monitoreó a diferentes profundidades en cada columna a intervalos regulares de tiempo. Para determinar el potencial redox (Eh) se utilizaron dos equipos diferentes. En primera instancia se utilizó un voltímetro, el cual mide una diferencia de potencial eléctrico (E) entre dos puntos en milivolts (mv). La medición del potencial redox es la diferencia de voltaje entre la lectura de un electrodo de trabajo y la de un electrodo de referencia insertados en el suelo. Por lo tanto, esta medición es una valoración semicuantitativa de la intensidad de la oxidación o reducción en un suelo, lo cual es el reflejo de varias parejas redox que operan simultáneamente en un sistema dinámico (Van Bochove et al., 2002). Tanto el electrodo de trabajo como el electrodo de referencia deben estar en contacto con la solución del suelo, ambos electrodos se conectan a un voltímetro para medir la diferencia de voltaje. Las mediciones de potencial redox realizadas con electrodos de referencia diferentes a un electrodo estándar de hidrógeno, deben siempre transformarse a potenciales que tienen a este último como sistema de referencia (electrodo estándar de hidrógeno, Eh). Con este propósito se debe aplicar un factor de corrección, donde el potencial estándar del electrodo

#### CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.

de referencia ( $E^{\circ}_{ref}$ ) a la temperatura de medición se adiciona al voltaje medido (E) para obtener el valor correcto ( $E_h$ ) (Galster, 2000; Kolling, 2000), mediante la siguiente ecuación:

$$E_h = E + E^{\circ}_{ref} \rightarrow \text{(Ecuación 9)}.$$

Donde el  $E^{\circ}_{ref} = 207$  a  $25^{\circ}\text{C}$  para el electrodo de referencia utilizado en este trabajo (de acuerdo a datos del fabricante).

Si las mediciones se realizan a una temperatura distinta de  $25^{\circ}$ , este factor de corrección debe modificarse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E^{\circ}_{ref} [\text{mV}] = 207 + 0.7 (25-t) \rightarrow \text{(Ecuación 10)}.$$

Donde: t = temperatura de medición ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Por otro lado, en algunos riegos se utilizó un equipo para medir el potencial redox (Figura 15), este equipo fue ensamblado por la empresa ecoTech. Se trata de un equipo con varios electrodos redox que permiten monitorear el potencial redox ( $E_h$ ) in situ en suelos o sedimentos (Los detalles del equipo se pueden observar en el siguiente link: [https://www.ecotech-bonn.de/en/produkte/bodenkunde/sensoren/redox\\_ph/](https://www.ecotech-bonn.de/en/produkte/bodenkunde/sensoren/redox_ph/)).



Figura 15. Equipo utilizado para la medición del potencial redox.

#### 4.3.3 Diagramas Eh vs pH.

Con las parejas de datos Eh y pH colectados en la base de la columna y en algunas profundidades (los electrodos redox instalados en la parte baja de las columnas y a diferentes profundidades y el pH de la solución de los lixiviados colectados) se elaboraron diagramas Eh vs pH. Para la construcción de los diagramas Eh vs pH (diagramas de Pourbaix) de algunos EPT, se utilizó el software Geochemist's Workbench Student (GWB11) y la aplicación Act2 del mismo software. El objetivo de estos diagramas fue poder predecir la forma química en la que los EPT se encontraban en la solución de suelo durante los experimentos, es decir, disueltos o precipitados. Los diagramas permitirán evaluar la estabilidad de los compuestos metálicos y poder predecir su comportamiento tras el paso de la solución ácida en las diferentes columnas evaluadas.

#### 4.3.4 Modelación Geoquímica.

Con los datos obtenidos en los experimentos de movilidad de EPT en las columnas estudiadas se corrió un modelo geoquímico para simular los procesos geoquímicos que ocurrieron durante el paso de la solución ácida a través de los suelos/sedimentos. Para realizar esta modelación se utilizó el programa de cómputo de equilibrio geoquímico Visual MINTEQ 3.1. Este software presenta una amplia base de datos que incluye: reacciones de hidrólisis, complejos y solubilidad, isotermas de adsorción y la formación de complejos de superficie (Cornelis, 2008). Se trata de un programa de modelación geoquímica de equilibrio termodinámico, el cual es capaz de calcular el equilibrio de especiación química en medios acuosos, estados de saturación de la fase sólida, precipitación y disolución de metales (Gustafsson, 2010). Las reacciones para determinar la especiación se basan en las constantes de equilibrio K de la base de datos del programa para calcular la especiación de iones, solubilidad y sólidos precipitados. A pesar de sus múltiples ventajas Visual MINTEQ no posee modelos cinéticos ni de transporte (Qu et al., 2008; Castillo, 2014). La modelación por medio de programas como Visual MINTEQ, permite predecir las fases acuosas presentes durante un experimento (en este caso durante la lixiviación de la solución ácida en los suelos y sedimentos) y el comportamiento de las mismas bajo diferentes escenarios, por ejemplo bajo diferentes valores de pH o Eh.

Los datos de entrada requeridos para predecir la composición de equilibrio consisten en un análisis químico de la(s) muestra(s), incluyendo las concentraciones disueltas de los elementos y cualquier otra medida relevante para el sistema, entre ellos el pH y el potencial redox. En lo que respecta a este trabajo, los datos obtenidos en los lixiviados colectados en la base y a diferentes profundidades durante los primeros dos riegos en cada columna, serán los datos de entrada en el programa, específicamente: la concentración en mg/L de los EPT retenidos en cada columna, el pH y el potencial redox, que en conjunto permiten agregar al modelo las especies determinadas en los diagramas de Eh vs pH (adicionando al modelo las posibles fases mineralógicas). Al agregar estas variables, el modelo obtiene el comportamiento de las diferentes especies en cada lixiviado colectado teniendo en cuenta las especies acuosas presentes, la formación de complejos y la posible precipitación de fases, tomando en cuenta el índice de saturación (IS).

El índice de saturación (IS), permite valorar las posibilidades de precipitación o disolución de una fase con base en el estado de saturación de una solución determinada y se determina mediante la relación entre el producto de actividad iónica "PAI" y el producto de solubilidad "Kps" (Langmuir, 1997), por medio de la siguiente ecuación:

$$IS = \log (PAI / Kps) \rightarrow \text{(Ecuación 11)}.$$

Si:

IS = 0: Existe equilibrio entre la solución y precipitación

IS > 0: Solución saturada (posibilidad de precipitación)

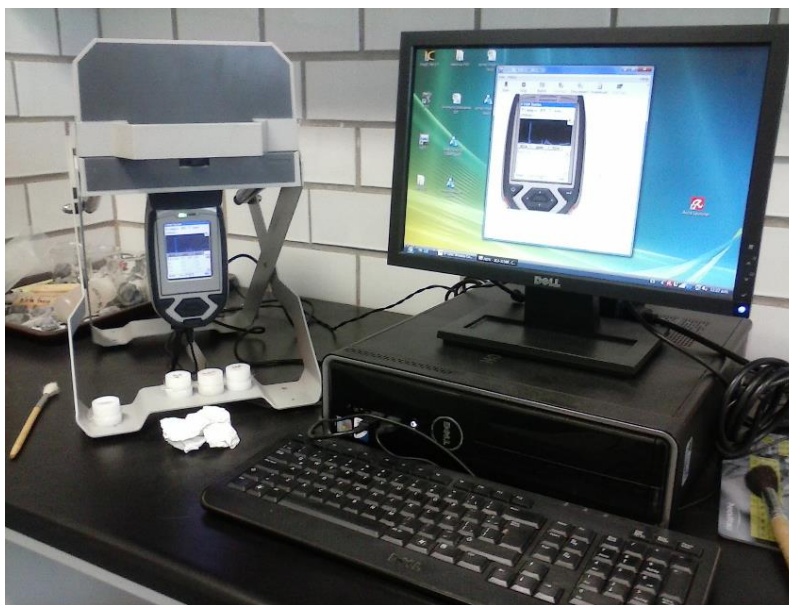
IS < 0: Solución insaturada (no hay posibilidad de precipitación)



Una vez realizada la modelación, los resultados concretos se presentan en diferentes tablas, en donde se observa la posible precipitación o complejación de los diferentes EPT analizados, considerando el Índice de Saturación (IS) calculado por los modelos.

#### **4.3.5 Fluorescencia de Rayos X (FRX).**

Los análisis para determinar la concentración total de EPT en muestras de suelos y sedimentos antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera se realizaron por medio de Fluorescencia de Rayos X (FRX), para lo cual fue usado un equipo portátil marca THERMO modelo NITON XL-3t (Figura 16). Las muestras fueron analizadas por quintuplicado en modo de suelos con 3 filtros y un tiempo de análisis de 90 segundos (30 segundos por filtro) por muestra, tomando en cuenta el método de prueba 6200 de la US-EPA (US-EPA, 2007). Este análisis se realizó en el Laboratorio de Geoquímica ambiental del Instituto de Geología de la UNAM.



**Figura 16. Equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X.**

Las muestras usadas para determinar las concentraciones de EPT sin los experimentos de infiltración de la solución ácida fueron las mismas muestras superficiales colectadas en campo que corresponden a las muestras homogeneizadas, tamizadas y cuarteadas usadas en los análisis físicos-químicos de la sección 4.2. Por su parte, después del último riego con la solución ácida ferrocuprífera en todas las columnas se tomaron muestras superficiales con la intención de comparar las concentraciones totales de los EPT analizados antes y después de los riegos en los primeros 0-6 cm.

#### CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para la realización de este análisis se utilizaron 200 g de muestra homogeneizada molida finamente (malla 10) con mortero de ágata y colocadas dentro de bolsas de plástico.

Para valorar la exactitud del método se utilizaron materiales de referencia, los cuales son: Blanco, 2710 a Montana Soil y Till-4. La exactitud y precisión del análisis de Fluorescencia de Rayos X pueden verse en el **ANEXO 5**.

Los elementos analizados en este estudio fueron: arsénico (As), cadmio (Cd), calcio (Ca), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), plomo (Pb), zinc (Zn), y azufre (S). Sus respectivos Límites de Detección instrumentales (LD) se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 11. Límites de Detección (LD) del equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X.**

Elemento	Límite de Detección (mg/Kg)
<b>Arsénico (As)</b>	5
<b>Cadmio (Cd)</b>	6
<b>Calcio (Ca)</b>	45
<b>Cromo (Cr)</b>	15
<b>Cobre (Cu)</b>	10
<b>Hierro (Fe)</b>	20
<b>Manganeso (Mn)</b>	45
<b>Plomo (Pb)</b>	5
<b>Zinc (Zn)</b>	50
<b>Azufre (S)</b>	150

Como se mencionó, la intención del uso de Fluorescencia de Rayos X es comparar las concentraciones de los EPT antes y después de los experimentos con la solución ácida, sin embargo, para valorar y determinar el grado de contaminación en las muestras originales (antes de los riegos con la solución ácida) y en las muestras con los riegos de la solución ácida, se utilizó el denominado Índice de Geoacumulación (Igeo), propuesto por Muller en 1979. La ecuación para el cálculo del Igeo se muestra a continuación:

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / 1.5B_n) \rightarrow \text{(Ecuación 12)}.$$

Donde:

C<sub>n</sub>: es la concentración total de determinado elemento (mg/kg) en la muestra analizada.

B<sub>n</sub>: Es la concentración base del metal (mg/kg). En este caso se tomó como el valor de fondo del elemento de interés en suelos y sedimentos analizados previamente.

1.5: Es un factor que se utiliza para minimizar posibles variaciones en los niveles base que pueden ser atribuidos a variaciones litológicas en los suelos o sedimentos (Stoffers et al., 1986).

Según el valor del Igeo se asignan clases que indican la intensidad de la contaminación en una muestra de suelo o sedimento (Tabla 12).

**Tabla 12. Descripción del nivel de contaminación de suelos/sedimentos según la clasificación del Igeo (Müller, 1979).**

Clase	Valor Igeo	Nivel de contaminación
0	<0	No contaminado
1	0 a 1	No contaminado a moderadamente contaminado
2	1 a 2	Moderadamente contaminado
3	2 a 3	Moderadamente contaminado a fuertemente contaminado
4	3 a 4	Fuertemente contaminado
5	4 a 5	Fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	> 5	Extremadamente contaminado

En lo que respecta a este estudio, se calculó el Igeo para las muestras analizadas por Fluorescencia de Rayos X antes y después de los riegos con la solución ácida. El valor Bn de la ecuación 12 usado en este análisis se tomó de información del Servicio Geológico Mexicano (SGM), el cual tomó muestras de sedimentos entre los años 1995-2000 para determinar los valores de fondo de varios elementos en el arroyo Tinajas y el río Bacanuchi, e información de perfiles de suelo realizados por la UNAM después del derrame (Instituto de Geología, 2015).

#### **4.3.6 Difracción de Rayos X (DRX).**

El análisis de Difracción de Rayos X se elaboró con el fin de determinar los cambios mineralógicos ocurridos en los suelos y sedimentos antes y después de la simulación de la infiltración de la solución ácida en las columnas muestreadas del arroyo Tinajas y el río Bacanuchi. Este análisis se realizó en muestras que abarcan los primeros 4 cm de las columnas irrigadas con la solución ácida y en muestras superficiales sin ningún riego.

El análisis de Difracción de Rayos X se realizó en el Laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de Geología de la UNAM. El difractograma se obtuvo en un Difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D (Figura 17). Las muestras se molturaron y homogeneizaron mediante un mortero de ágata y se midieron utilizando un portamuestras de aluminio (fracciones no orientadas). La medición se realizó en el intervalo angular  $2\theta$  de  $5^\circ$  a  $70^\circ$  en escaneo por pasos con un "step scan" de  $0.003^\circ$  (2 Theta) y un tiempo de integración de 40s por paso. Para la identificación de filosilicatos, se realizó la separación de la fracción  $< 2 \mu\text{m}$ .

Para el análisis general de difracción es molturada la muestra, para después ser acomodada en una cámara y realizar así la incidencia de los rayos X, con el propósito de encontrar las distancias interatómicas e interlaminares, propias de cada mineral, y con la ayuda de la especialista se interpretó y nombró el tipo de minerales existentes en las muestras con y sin riego de la solución ácida ferrocuprífera.



Figura 17. Difractómetro EMPYREAN en donde se realizó el análisis de DRX en las muestras de suelo y sedimento.

A partir de los datos mineralógicos obtenidos por Difracción de Rayos X en las muestras antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera colectada en campo, se calculó un índice de pérdida o enriquecimiento relativo de cada fase mineral, la ecuación utilizada es la siguiente:

$$I_{\text{mineral}} = \frac{\% \text{ del mineral en muestra sin riego} - \% \text{ del mineral en muestra con riego}}{\% \text{ del mineral en muestra sin riego}}$$

→ (Ecuación 13).

Utilizando este índice se puede determinar si existió enriquecimiento o disminución de una fase mineral determinada después de los experimentos de infiltración de la solución ácida.

Este índice toma valores negativos cuando se produce el enriquecimiento de una fase mineral, entre más negativo sea el valor mayor enriquecimiento del mineral, por su parte, cuando existen pérdidas, los valores del índice se encuentran entre 0 y 1, tomando un valor de 0 cuando no existen pérdidas ni enriquecimientos del mineral después de los riegos y 1 cuando ocurre la desaparición (pérdida total) del mineral después de los riegos con la solución ácida.

### 4.3.7 Colorimetría.

Con el propósito de determinar los cambios de color observados en muestras superficiales (0-2 cm) de suelo y sedimento con y sin los experimentos de infiltración de la solución ácida, se realizó un análisis de colorimetría. Tales cambios pueden estar asociados a la formación de nuevos minerales que le dan un cambio de color a las muestras debido a la posible interacción química entre la solución ácida y las muestras estudiadas.

La medición de color se realizó en muestras molidas con mortero de ágata y por triplicado. Para este análisis se utilizó un espectrofotómetro colorímetro SPH 860, previamente calibrado con un color blanco. Utilizando el sistema CIE-LAB (Comisión Internacional de Iluminación) recomendado para evaluar numéricamente los colores, se utilizan los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  (Figura 18) siendo  $L^*$  (0-100 escala de luminosidad),  $a^*$  (coordenadas rojo/verde, +a indica rojo, -a indica verde) y  $b^*$  (coordenadas amarillo/azul, +b indica amarillo, -b indica azul).

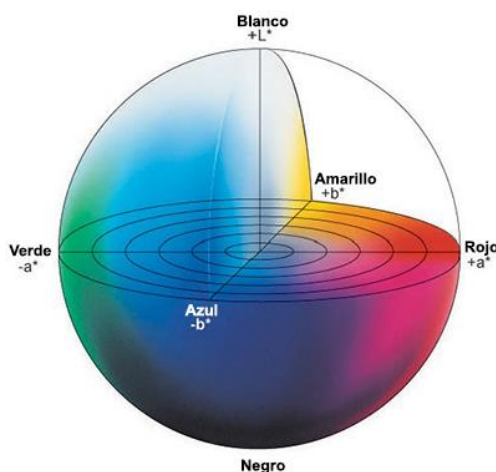


Figura 18. Diferentes escalas de colores utilizando los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . Tomado de Konica Minolta, 2007.

La gama de colores  $a^*$  y  $b^*$ , pueden brindar información acerca de la precipitación de minerales de hierro (Según la USDA, 2017, los minerales de hierro presentan coloraciones amarillo-rojizas) que pudieron haber precipitado a partir de la interacción de la solución ácida ferrocuprífera rica en hierro con los suelos y sedimentos estudiados. Las diferencias entre las muestras se cuantificaron usando la siguiente ecuación (Sánchez-Marañón et al., 2004):

$$\Delta E^* = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2} \rightarrow \text{(Ecuación 14).}$$

Donde:

$\Delta E^*$  = diferencia total de color.

$\Delta L^*$  = diferencia en luz y oscuridad (+ significa más luminoso, - significa más oscuro)

$\Delta a^*$  = diferencia en rojo y verde (+ significa más rojo, - significa más verde)

$\Delta b^*$  = diferencia en amarillo y azul (+ significa más amarillo, - significa más azul)

#### 4.3.8 Prueba de extracción de EPT después de los eventos de riego con la solución ácida ferrocuprífera.

Una vez conocida la concentración total (mg/kg) de EPT en muestras superficiales (0-2 cm) colectadas en las columnas regadas con la solución ácida ferrocuprífera, se realizó una prueba de extracción con el propósito de evaluar la concentración lixiviable de los EPT contenidos en las muestras que interaccionaron con la solución ácida. Se realizó la extracción en agua en equilibrio con CO<sub>2</sub> en las muestras superficiales tomadas en las columnas después de todos los riegos, según lo establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Edafología Experimental del Instituto de Geología de la UNAM.

Dicha prueba consistió en:

- Las muestras fueron molidas y tamizadas a malla No.60.
- Se prepararon suspensiones por duplicado de las muestras en una relación 1:20 (1 g de muestra en 20 ml de agua) con agua destilada en equilibrio con CO<sub>2</sub>. De igual manera, como control de calidad se prepararon dos soluciones únicamente con agua para poder tener blancos en las lecturas.
- Previo al experimento se tomaron los valores de pH y CE en las soluciones, con un potenciómetro Beckman calibrado con soluciones de pH=4 y pH=7 y un conductímetro LaMotte CON 6 calibrado con una solución de 1413 µS/cm.
- Se agitaron a 120 rpm durante 18 horas en un equipo rotatorio Shaker sk-71.
- Finalmente se separaron las fases sólidas de los lixiviados mediante la filtración con membrana de 0.45 µm.
- La determinación de la concentración lixiviada de los EPT se analizó por medio de ICP-OES con un equipo Perkin-Elmer Optima 8300 DV con automuestreador S10 Perkin-Elmer.

En la figura 19 se observan imágenes de los pasos seguidos en este experimento.

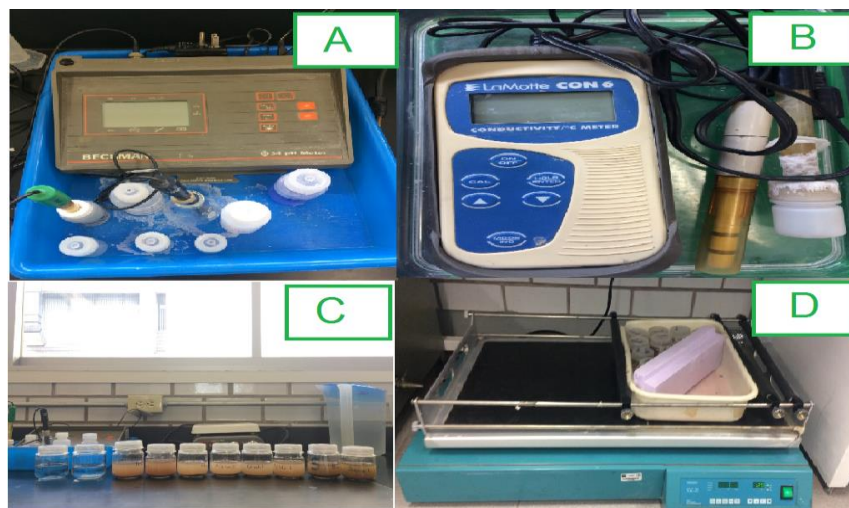


Figura 19. Imagen A. Equipo Beckman utilizado para medir el pH de las soluciones. Imagen B. Equipo LaMotte usado para medir la CE de las soluciones preparadas. Imagen C. Soluciones preparadas para la prueba de extracción de EPT previo a la agitación. Imagen D. Equipo rotatorio para la agitación de las muestras durante 18 horas.

#### 4.3.9 Elaboración de secciones delgadas de suelos y sedimentos que estuvieron en contacto con la solución ácida ferrocuprífera.

Se realizaron secciones delgadas en las 4 columnas a diferentes profundidades después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera con el propósito de analizar mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y microsonda electrónica los procesos físicos y químicos ocurridos por la interacción entre las diferentes matrices y la solución ácida. Esto permitirá comprender los diferentes procesos químicos y físicos que ocurrieron en los suelos y sedimentos estudiados pertenecientes al arroyo Tinajas y al río Bacanuchi después de su interacción con la solución.

Una vez realizados los experimentos con los riegos y evaluados los cambios físicos (sobre todo cambios de coloración) en todas las columnas, estas se llevaron al taller de laminación del Instituto de Geología con el fin de realizar cortes transversales a diferentes profundidades con una cortadora de borde de diamante, con el propósito de tener al menos una lámina delgada en 5 intervalos de profundidades (0-4 cm, 4-8 cm, 8-12 cm, 12-16 cm y 16-20 cm), esto para visualizar lo ocurrido en los diferentes niveles. Después de realizar los cortes transversales se obtuvieron bloques de diferentes profundidades (antes mencionadas), dichos bloques fueron impregnados en dos ocasiones (una sin vacío y otra con vacío) con resina previamente preparada para fijar los bloques. Una vez fijados los bloques fueron pulidos con una pulidora y el uso de lijas de diferente grosor, con el fin de eliminar las huellas del corte y obtener un plano lo más suave posible. La superficie pulida se pegó sobre un portaobjetos de vidrio con un agente cementante incoloro e isótropo, en este caso resina epoxy. Después de tener el bloque en el portaobjetos, éste se cortó en una cortadora especial donde se fijó el bloque en un soporte de vacío, los bloques fueron cortados hasta un grosor aproximado de 0.5-1 mm. Una vez realizado este paso las láminas fueron pulidas nuevamente con abrasivos especiales hasta alcanzar el grosor deseado de aproximadamente 25-30 $\mu$ m.

En la figura 20 se observan algunas imágenes escaneadas de 4 secciones delgadas elaboradas en cada columna, en la tabla 13 se observa el total de secciones delgadas realizadas.

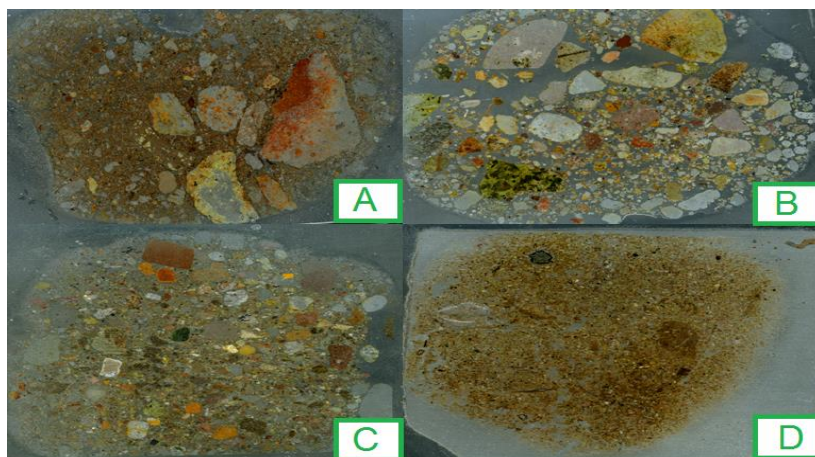


Figura 20. Ejemplos de secciones delgadas. A: Suelo Tinajas. B: Sedimento El Álamo. C: Sedimento Chilolo. D: Suelo Bacanuchi.

Tabla 13. Número de secciones delgadas elaboradas y su profundidad en cada columna.

No. de secciones delgadas	Columna	Profundidad
1	Tinajas	0-4 cm
2		4-8 cm
3		8-12 cm
4		12-16 cm
5		16-20 cm
6	Rancho El Álamo	0-4 cm
7		4-8 cm
8		8-12 cm
9		12-16 cm
10		16-20 cm
11	Rancho Chilolo	0-4 cm
12		4-8 cm
13		8-12 cm
14		12-16 cm
15		16-20 cm
16	Bacanuchi	0-4 cm
17		4-8 cm
18		8-12 cm
19		12-16 cm
20		16-20 cm
21	Tinajas sin riego con la solución ácida	0-5 cm
22	El Álamo sin riego con la solución ácida	0-5 cm
23	Chilolo sin riego con la solución ácida	0-5 cm
24	Bacanuchi sin riego con la solución ácida.	0-5 cm

#### 4.3.10 Análisis micromorfológico y morfométrico en secciones delgadas de suelos y sedimentos.

Con el propósito de determinar las modificaciones sufridas en los suelos y sedimentos por la interacción de estos con la solución ácida ferrocuprífera en los diferentes experimentos en columnas, se realizó un análisis micromorfológico en todas las secciones delgadas mostradas en la tabla 13 con la ayuda de un microscopio petrográfico Olympus BX51 (Figura 21).



Por otro lado, para el análisis morfométrico se tomaron fotografías obtenidas con el microscopio petrográfico y con una cámara Cool Snap Pro Color con un objetivo 4X. Posteriormente se analizaron las fotografías utilizando el programa Image Pro Plus versión 7.0. Con este programa se lograron discriminar y cuantificar las diferencias en porosidad, mineralogía y posibles precipitaciones de óxidos de hierro entre las secciones delgadas correspondientes a las 4 columnas con y sin riego de la solución ácida a una profundidad de entre 0-5cm.



**Figura 21. Microscopio petrográfico Olympus BX51 usado en los análisis micromorfológicos y morfométricos en las diversas secciones delgadas.**

#### **4.3.11 Análisis químicos en secciones delgadas de suelos y sedimentos utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Microsonda Electrónica de Barrido.**

En primera instancia se analizaron mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido Acoplada a Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa (MEB-EDS) un total de 20 secciones delgadas, las cuales corresponden a las secciones delgadas obtenidas en todas las columnas a profundidades de entre 0 y 20 cm (ver Tabla 13). El espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS) adyacente al microscopio electrónico, permite realizar una identificación cualitativa y/o semicuantitativa de los componentes mineralógicos y elementales de las muestras. Esta técnica fue usada para hacer la caracterización composicional de las muestras y para determinar la presencia o ausencia de EPT retenidos en las fases minerales a diversas profundidades después de los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera.

Para este análisis se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca Zeiss, modelo EVO MA10 (Figura 22) en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microanálisis del Instituto de Geología de la UNAM.



**Figura 22. Microscopio Electrónico de Barrido utilizado para el análisis químico en secciones delgadas de suelos y sedimentos.**

Para cada muestra se analizaron diversas partículas, en los resultados se puede observar una tabla resumen con los porcentajes finales de los elementos identificados y la microfotografía de las partículas analizadas en las profundidades de 0-4 y 4-8 cm. Por su parte, en los anexos se muestran los resultados para las profundidades de 8-12, 12-16 y 16-20 cm.

Para corroborar los resultados químicos en la relación a la retención de EPT obtenidos mediante el uso de la técnica de MEB-EDS, se analizaron 8 secciones delgadas (Tinajas 0-4cm y 12-16 cm, Rancho El Álamo 4-8 cm y 12-16 cm, Rancho Chilolo 0-4 cm y 8-12 cm y Bacanuchi 4-8 cm y 12-16 cm) con el uso de una Microsonda Electrónica de Barrido. Este análisis se llevó a cabo en el Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) del Instituto de Geofísica de la UNAM. Al igual que en la técnica de MEB-EDS, el propósito principal del uso de la Microsonda es determinar la presencia de EPT en las fases sólidas. El equipo usado es una microsonda electrónica de barrido JEOL JXA-8900R con dos espectrómetros WDS y sistema EDS (el cual fue usado en primera instancia para comparar los resultados obtenidos con el MEB-EDS), dicha microsonda está dotada de 5 espectrómetros que analizan la composición de las muestras y opera a través de un rayo láser que analiza pequeñas muestras y procesa información a través de dos monitores y una computadora.

Finalmente, con la ayuda del espectrómetro WDS se realizó un mapeo elemental en la muestra Bacanuchi 12-16 y El Álamo 4-8 cm para confirmar la presencia de los diferentes EPT analizados.

#### **4.4 Evaluación del efecto del paso de la solución ácida ferrocuprífera en la estructura del suelo Tinajas y del sedimento El Álamo.**

El objetivo de este análisis fue evaluar el efecto “erosivo” que el paso de la solución ácida ferrocuprífera provocó en la porosidad del suelo Tinajas y del sedimento El Álamo. Antes y después de los ensayos de infiltración de la solución ácida, se adquirieron imágenes en un tomógrafo en el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva Digitalización 3D y Tomografía Computarizada (MADIT), del CCADET. Las imágenes obtenidas se analizaron mediante códigos existentes para obtener parámetros descriptivos de la estructura y porosidad. La comparación de los resultados obtenidos antes y después de la aplicación de la solución ácida, permite evaluar de forma cuantitativa el efecto que el paso del líquido provocó en la estructura y porosidad del suelo/sedimento. La red de poros en 3D y los parámetros morfológicos fueron calculados después del uso de imágenes en las dos columnas a través de tomografía de rayos X en una resolución de 80  $\mu\text{m}$ .

Los parámetros seleccionados para describir los cambios en la porosidad en ambas columnas antes y después de los riegos con la solución ácida son: porosidad superficial en 2D y 3D y relación del número de poros con el volumen total de poros. El primer paso para el estudio consistió en binarizar los datos, separando voxels que representan espacio poroso y aquellos que representan porciones de materia sólida. Una vez separados, los voxels que representan espacio poroso se clasifican de acuerdo a su conectividad. Así un poro se forma por todos los voxels interconectados en un volumen.

El objetivo de utilizar los volúmenes de imágenes es el poder evaluar los cambios de porosidad por corte y en el volumen entero, así como el número de poros en el volumen. Al evaluar la fracción de porosidad por corte se obtiene una representación bidimensional del cambio de porosidad con respecto a la profundidad.

Ambas columnas fueron analizadas por tomografía de rayos X en 3 ocasiones cada una, la primera toma antes del riego con la solución ácida, la segunda toma después del primer riego y por último después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera.

Como resumen de este capítulo, en la figura 23 se muestra la metodología realizada para determinar la movilidad de los EPT en la parte alta de la cuenca del río Sonora.

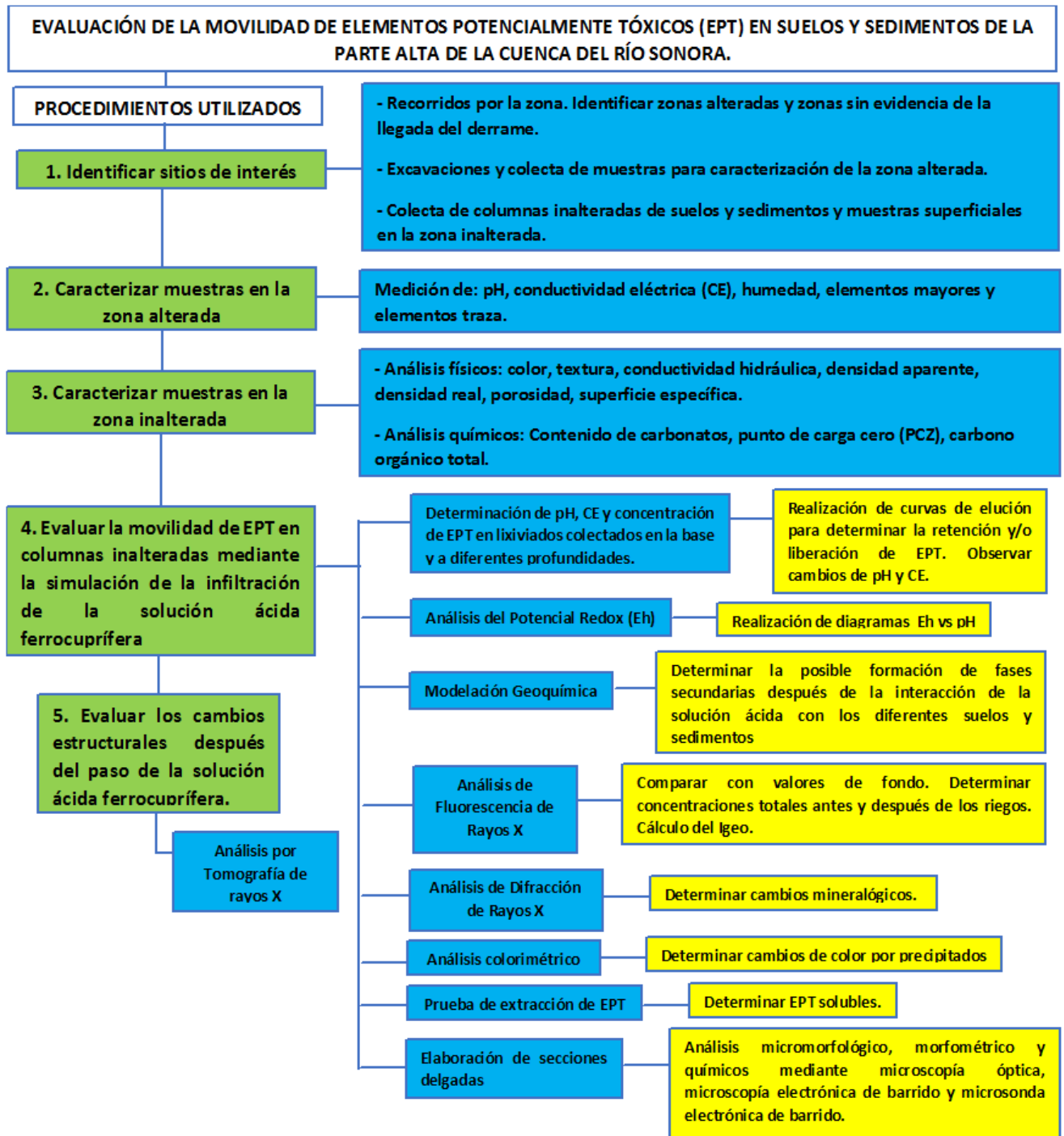


Figura 23. Resumen de la metodología utilizada para determinar la movilidad de los EPT en la parte alta de la cuenca del río Sonora. En cuadros verdes se muestran los procedimientos utilizados, desde el primero (1) hasta el último (5). En cuadros azules se muestran los métodos utilizados en cada procedimiento. En cuadros amarillos se muestran los objetivos de los métodos utilizados.

# CAPÍTULO 5

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 5.1 Caracterización de los perfiles de excavación en la zona alterada por el derrame de la solución ácida.

La descripción de los perfiles a lo largo del lecho del arroyo Tinajas y el río Bacanuchi muestra un cambio de granulometría fuerte espacialmente, en donde es posible observar diferentes patrones de acumulación de material, acumulándose cantos grandes en los sitios de mayor energía, mientras que en los de menor energía existe acumulación de cantos más finos. En los sitios de menor energía, como la excavación Bacanuchi (a 40 km del sitio del derrame) se encontraron a profundidad capas de sedimento fino (se trata de acumulaciones de arcilla y limo, de colores muy rojizos) que favorecen el almacenamiento de humedad, además de fungir como una barrera que promueve la acumulación de sales (ver **ANEXO 1**). En las siguientes páginas se muestra la descripción de cada excavación, considerando los análisis de humedad ( $\theta$  %) y conductividad eléctrica (CE,  $\mu\text{S/m}$ ) realizados en campo, y la determinación del pH, conductividad eléctrica y concentración de elementos mayores y elementos traza en laboratorio, todos estos análisis se realizaron en muestras de sedimento tomadas a diferentes profundidades en cada excavación.

#### A) Humedad (en campo).

En la figura 24 se muestra el comportamiento de la humedad en cada una de las excavaciones.

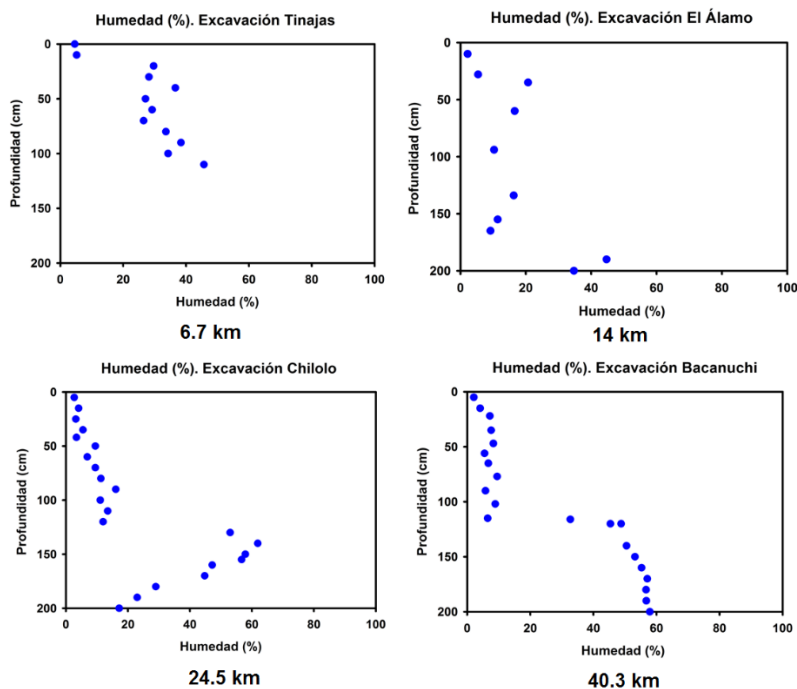


Figura 24. Variación del contenido de humedad volumétrico ( $\theta\%$ ) a profundidad en los perfiles de excavación. La secuencia de perfiles se presenta desde el punto más cercano al sitio del derrame (6.7 km), alejándose hasta 40.3 km.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

En todas las excavaciones se observa un aumento en la humedad conforme aumenta la profundidad, lo cual concuerda con lo visto en campo, ya que se observó una acumulación de cantos gruesos en la superficie (los cuales no retienen humedad) y la disminución en el tamaño de los granos conforme se avanzaba en profundidad (las partículas de tamaño fino permiten la retención de la humedad).

En lo que respecta a la excavación Tinajas (6.7 km del sitio del derrame) la humedad varía desde 4.6% en la superficie de la excavación hasta 38.4% a 90 cm de la misma. En la excavación de El Álamo (14 km del sitio del derrame), la humedad oscila entre 2.20% a 10 cm de profundidad y 44.7% a 190 cm. Por su parte, la excavación denominada Chilolo (a 24.5 km del lugar del derrame) presenta una variación de la humedad de entre 2.7% (a 5 cm) y 61.9% (a 140 cm). Finalmente, la excavación Bacanuchi (40.3 km del sitio de derrame) tiene una variación en la humedad entre 2.1% a 5 cm y hasta 57.9% a 200 cm de profundidad.

En la descripción de los perfiles de excavación (**ANEXO 1**, Excavaciones sobre el cauce del arroyo Tinajas y el río Bacanuchi) se observa que las excavaciones Tinajas y El Álamo presentan sedimentos gruesos a lo largo del perfil completo, por su parte, en las excavaciones Chilolo y Bacanuchi (sobretudo esta última) se observan sedimentos de textura media y fina en diferentes profundidades. Tomando en cuenta esto, el comportamiento de la humedad en todos los perfiles está fuertemente asociado al control litológico y a las propiedades hidrogeológicas de cada estrato. Es posible decir, que en las excavaciones Chilolo y Bacanuchi se presentan los mayores valores de humedad en profundidad precisamente por el menor tamaño de los sedimentos, que al encontrar estratos de textura más fina, el movimiento del agua se ve restringido en la componente vertical, por lo cual el agua se acumula en esas capas.

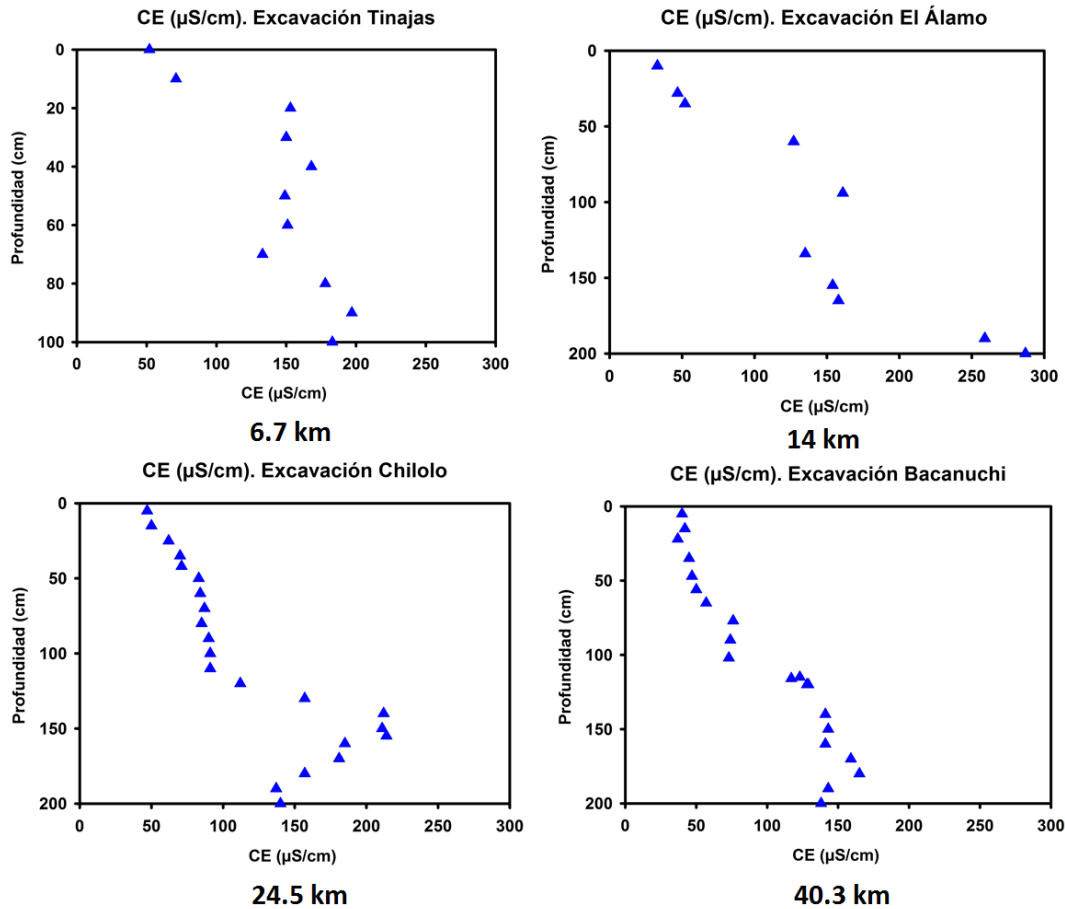
La figura 24 muestra que en todas las excavaciones se observa la similitud del aumento de la humedad en profundidad, evidenciando una disminución en el tamaño de las partículas de los sedimentos en los 4 sitios (siendo más evidente este cambio en los perfiles Chilolo y Bacanuchi), siendo constante el valor de la humedad en la excavación Bacanuchi a partir de los 150 cm, profundidad a la cual se encuentran capas finas de tamaño de limo y arcilla que, en general, impiden el desplazamiento del agua. En lo que respecta a la excavación Chilolo, la humedad disminuye a partir de 140 cm, lo que evidencia un aumento en el tamaño de las partículas de esa excavación en esa profundidad.

### B) Conductividad eléctrica (en campo).

La figura 25 muestra la variación de la conductividad eléctrica en cada una de las excavaciones.

Al igual que la humedad, la conductividad eléctrica aumenta en profundidad en todas las excavaciones (con excepción de la excavación Chilolo a partir de 140 cm), lo cual puede estar relacionado precisamente con el aumento de la humedad, ya que la retención de la misma a profundidad favorece el aumento de las sales disueltas y por ende de los valores de CE.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES



**Figura 25.** Variación de la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S/cm}$ ) a profundidad en los perfiles de excavación. La secuencia de perfiles se presenta desde el punto más cercano al sitio del derrame (6.7 km), alejándose hasta 40.3 km.

La CE varía de 52.7  $\mu\text{S/cm}$  (en la superficie) hasta 197  $\mu\text{S/cm}$  a 90 cm de profundidad en la excavación más cercana al sitio del derrame (Tinajas). Para la excavación El Álamo, la conductividad eléctrica varía entre 34  $\mu\text{S/cm}$  a 10 cm de profundidad hasta 287  $\mu\text{S/cm}$  a 200 cm. En lo que respecta a la excavación Chilolo, la variación de la CE va desde 47  $\mu\text{S/cm}$  a 5 cm de profundidad y hasta un valor de 214  $\mu\text{S/cm}$  a 155 cm. Finalmente, en la excavación Bacanuchi, la conductividad eléctrica mínima es de 37  $\mu\text{S/cm}$  a una profundidad de 22 cm y llegando hasta un valor máximo de 165  $\mu\text{S/cm}$  a 180 cm de profundidad.

Los rangos de CE en cada perfil pueden relacionarse a los cambios de humedad, la cual como se mencionó anteriormente está influenciada por el control litológico de las excavaciones, por lo mismo, los mayores valores de CE se correlacionan con los mayores porcentajes de humedad en cada uno de los sitios estudiados.

### C) pH (en laboratorio)

La figura 26 muestra la variación del pH en las muestras colectadas a diferentes profundidades en cada una de las excavaciones.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

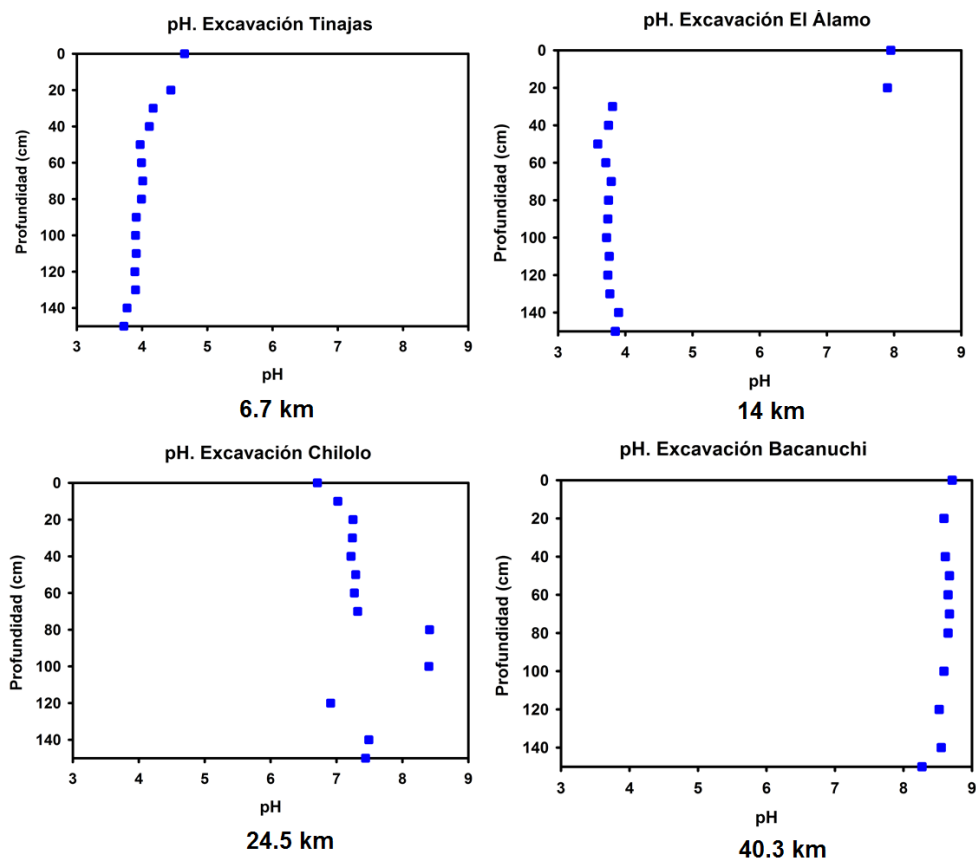


Figura 26. Variación del pH a profundidad en los perfiles de excavación. La secuencia de perfiles se presenta desde el punto más cercano al sitio del derrame (6.7 km), alejándose hasta 40.3 km.

Los perfiles de pH evidencian un impacto ácido sobre el lecho del arroyo Tinajas en las excavaciones Tinajas y El Álamo, en el primero de ellos el pH tiene una tendencia a disminuir desde los 0 hasta los 150 cm de profundidad, desde un valor máximo de 4.65 unidades hasta un mínimo de 3.72, sin embargo, el valor de pH a profundidad es muy homogéneo, lo que podría evidenciar que el pH lo controla el material geológico de la zona, principalmente rocas riolíticas que le imprimen la acidez a este sitio. Por su parte, en la excavación El Álamo a 14 km del sitio del derrame, el pH se mantiene ácido a profundidad, con una tendencia a disminuir desde un valor de 7.95 en la superficie hasta un mínimo de 3.54 a 50 cm de profundidad.

Los valores de pH presentes en los sitios Tinajas y El Álamo pueden relacionarse a condiciones muy ácidas debido a la naturaleza geológica de ambos sitios, donde se ha reportado la presencia de riolitas (CONAGUA, 2011). La acidez de estos dos sitios puede relacionarse también a la llegada de la solución ácida derramada en agosto del 2014. En ambas excavaciones se observaron precipitados químicos de color amarillo en diferentes profundidades (ver **ANEXO 1**). La presencia de estos precipitados sugiere condiciones que neutralizaron la acidez de la solución (en caso de que esta haya llegado a estos sitios), facilitando la formación de los mismos.



## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

En lo que corresponde a la excavación Chilolo, la cual se encuentra a 24.5 km de distancia del sitio del derrame y muy cerca de la intersección entre el arroyo Tinajas y el río Bacanuchi, el pH es ligeramente ácido en la superficie de la excavación, con un valor de 6.71 unidades, sin embargo, contrario a las anteriores excavaciones, el pH aumenta en profundidad llegando a un valor máximo de 8.41 unidades a 80 cm. En lo que respecta a la última excavación, que se encuentra en el río Bacanuchi a 40.3 km del sitio del derrame, no se observa ningún valor ácido en el perfil, por el contrario el pH varía entre 8.71 unidades en la superficie (0 cm) hasta un mínimo de 8.27 unidades a 150 cm.

Dadas las condiciones de neutralidad-basicidad del pH en estas dos últimas excavaciones, se puede suponer que no fueron afectados por el lixiviado ácido derramado en agosto del año 2014, no obstante, al igual que en las excavaciones Tinajas y El Álamo, se encontraron precipitados de coloraciones amarillas en los perfiles Chilolo y Bacanuchi, esto puede asociarse a fenómenos de neutralización por minerales carbonatados (los cuales se han reportado en la zona), favoreciendo la precipitación química de nuevas fases minerales. La presencia de estos precipitados en estos perfiles puede relacionarse a derrames históricos y no necesariamente al evento ocurrido en el año 2014.

Es importante mencionar que los valores de pH determinados en los cuatro sitios pueden estar relacionados a las condiciones geológicas, favoreciendo la presencia de condiciones ácidas en las dos excavaciones más cercanas al sitio del derrame probablemente por la presencia de rocas intrusivas ácidas y/o riolitas, y condiciones más básicas en las excavaciones Chilolo y Bacanuchi, probablemente por la presencia de rocas carbonatas.

### D) Conductividad eléctrica (en laboratorio).

En la figura 27 se muestra la variación de la conductividad eléctrica en las muestras colectadas a diferentes profundidades en cada una de las excavaciones. Cabe hacer notar que la conductividad eléctrica tomada en campo se realizó con una sonda TDR, por su parte, la conductividad eléctrica estimada en laboratorio se realizó en suspensiones sedimento/agua destilada agitadas durante 18 horas.

Las mediciones de la CE en los perfiles de las excavaciones, indican la existencia de bajas concentraciones de sales en el sitio más cercano al derrame (excavación Tinajas), mientras que en los perfiles El Álamo y Chilolo se observan altas concentraciones de sales, llegando a valores máximos de CE de 2411 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y 2147 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), respectivamente. El comportamiento anterior se puede explicar a partir de la granulometría de los sitios; en el sitio más cercano al derrame se observa una granulometría gruesa, conformada por cantos grandes, que favorecen la infiltración rápida del agua y con ello la lixiviación de sales; Por el contrario, en los demás sitios se presentan capas de sedimento fino a profundidad, que fungen como barreras de flujo, y por lo tanto, restringen la infiltración del agua y favorecen la acumulación de sales.

En lo que respecta al sitio Bacanuchi, los resultados de CE son contrarios a lo esperado, ya que se trata del perfil con la granulometría más fina, lo que favorecería la retención de la humedad y por ende la acumulación de sales, a pesar de ello la conductividad eléctrica se mantiene baja en todo el perfil excavado.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

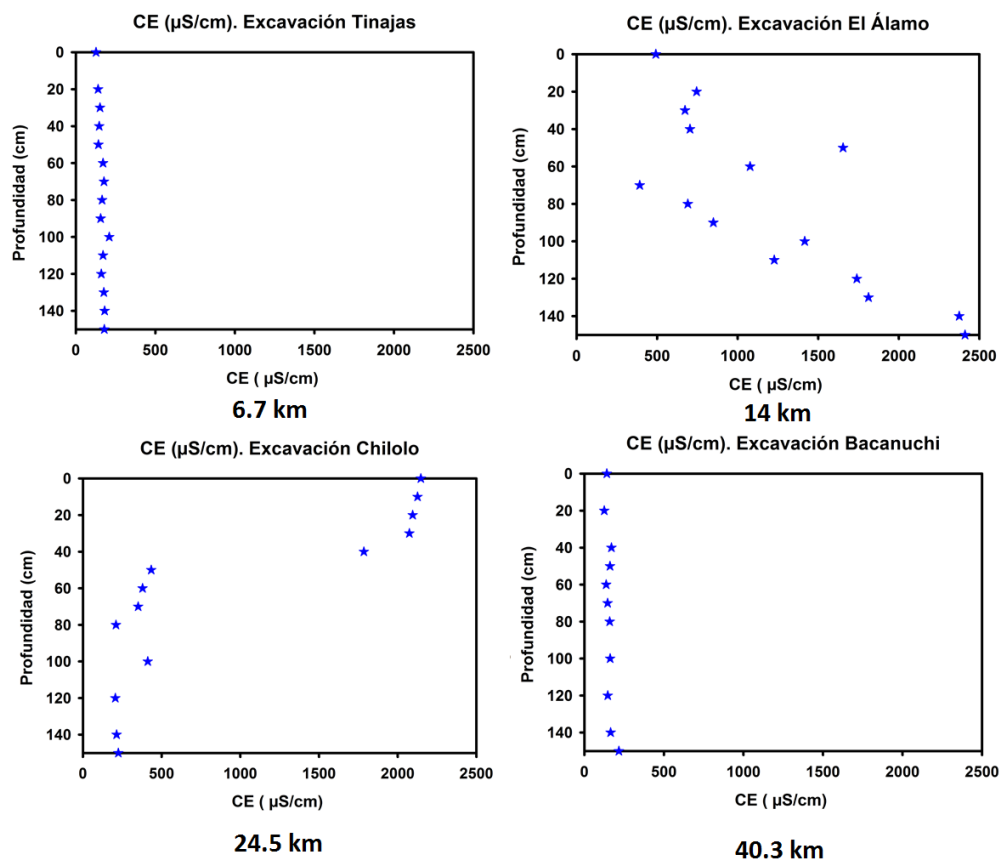


Figura 27. Variación de la CE a profundidad en los perfiles de excavación. La secuencia de perfiles se presenta desde el punto más cercano al sitio del derrame (6.7 km), alejándose hasta 40.3 km.

### E) Elementos mayores.

En la figura 28 se puede observar el comportamiento de los elementos mayores analizados (Fe y Ca) en cada uno de los perfiles excavados.

Se observa un gran contenido de Fe en todos los perfiles y su tendencia a aumentar con la profundidad (principalmente en el perfil Tinajas y El Álamo) exceptuando en el perfil Bacanuchi, en donde este elemento parece disminuir con la profundidad. La variación del Fe en los perfiles es la siguiente:

- ❖ Excavación Tinajas: El hierro varía entre 24710 - 67454 (mg/kg).
- ❖ Excavación El Álamo: La variación del Fe va desde 29654 (mg/kg) hasta 37829 (mg/kg).
- ❖ Excavación Chilolo: El contenido de hierro en el perfil va desde un mínimo de 29729 (mg/kg) hasta un máximo de 38116 (mg/kg).
- ❖ Excavación Bacanuchi: Se trata del perfil con menor contenido de hierro, el cual oscila entre 832 (mg/kg) hasta 27917 (mg/kg).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En lo que corresponde al calcio, se observa su aumento en relación a la distancia del sitio del derrame, ya que el promedio en su concentración en los perfiles de excavación en relación a la distancia del sitio del derrame es la siguiente:

- ❖ Excavación Tinajas (6.7 km): Concentración promedio de calcio = 1564 (mg/kg).
- ❖ Excavación El Álamo (14 km): Concentración promedio de calcio = 8639 (mg/kg).
- ❖ Excavación Chilolo (24.5 km): Concentración promedio de calcio = 13587 (mg/kg).
- ❖ Excavación Bacanuchi (40.3 km): Concentración promedio de calcio = 20426 (mg/kg).

La concentración del calcio con respecto a la distancia del sitio de derrame, puede estar relacionada a la variación del pH en los diferentes sitios analizados, en donde se observa que este parámetro aumenta conforme las excavaciones se encuentran más lejanas al represo "Tinajas 1" (donde ocurrió el derrame de la solución ácida), dicha relación entre el aumento del calcio y el aumento de la neutralidad en los sitios más alejados puede corresponder al aumento de carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en los sitios Chilolo y Bacanuchi, que promueven reacciones que controlan la acidez de la solución derramada en Agosto del 2014 (en caso de que esta solución haya alcanzado estos sitios).

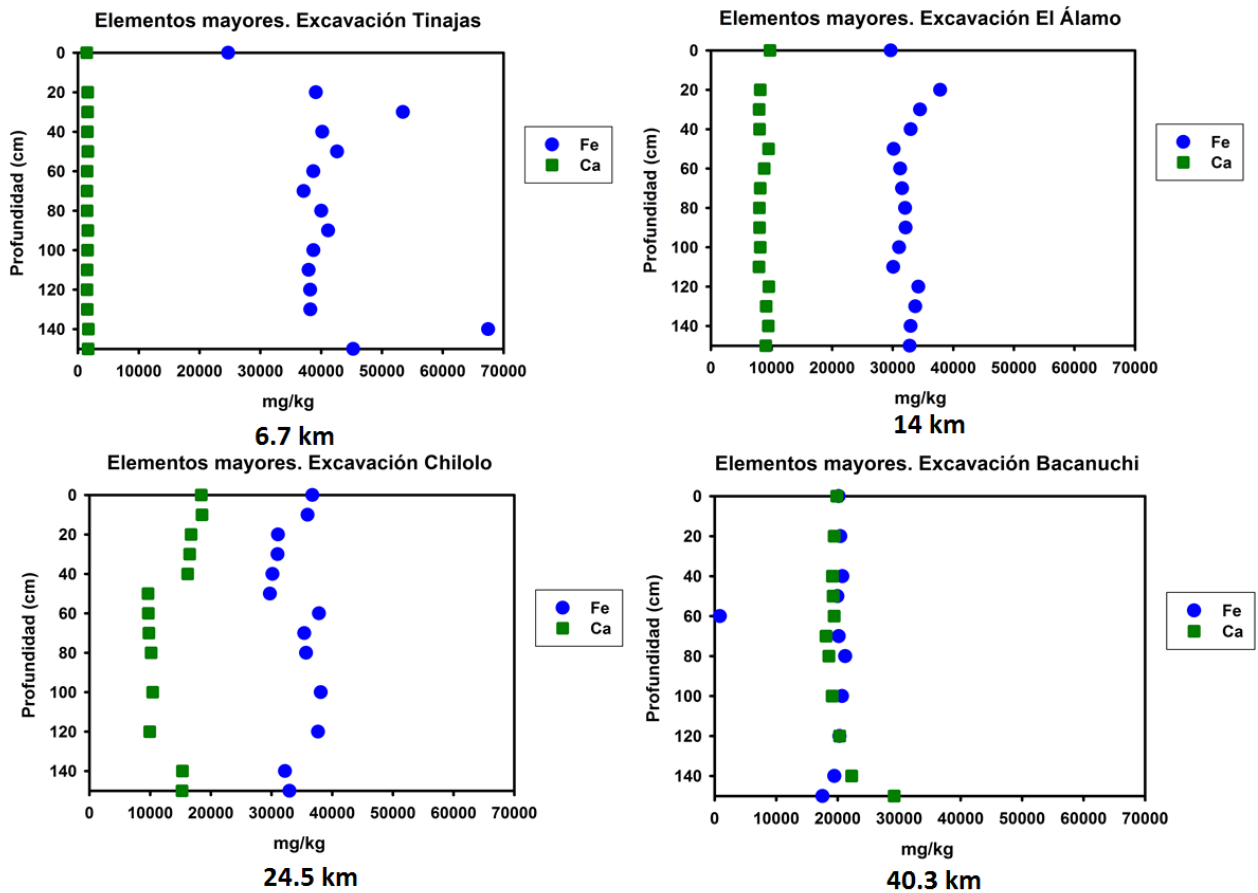


Figura 28. Comportamiento de elementos mayores (Fe y Ca) en los perfiles de las excavaciones.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### F) Elementos traza.

En las figuras 29 y 30 se puede observar el comportamiento de los elementos traza determinados en el análisis (Mn, Cu, Pb, Zn, As y Cr) en cada uno de los perfiles excavados.

Después de los elementos mayores, el siguiente elemento en orden de abundancia es el manganeso, el cual alcanza concentraciones de hasta 3617 (mg/kg) a 150 cm en el perfil de la excavación Tinajas. Se observa su disminución conforme las excavaciones se alejan del sitio del derrame, llegando a una máxima concentración de 910 (mg/kg) en la excavación Bacanuchi.

Finalmente, se encuentran los metales cuya concentración oscila entre 0 y 300 mg/kg (Cu, Pb, Zn, As y Cr) de éstos los más abundantes son el zinc y el plomo, que del mismo modo que el Mn, se encuentran más concentrados en el perfil cercano al derrame (Figuras 29 y 30), en una concentración máxima de 216 (mg/kg) para el zinc y 246 mg/kg para el plomo.

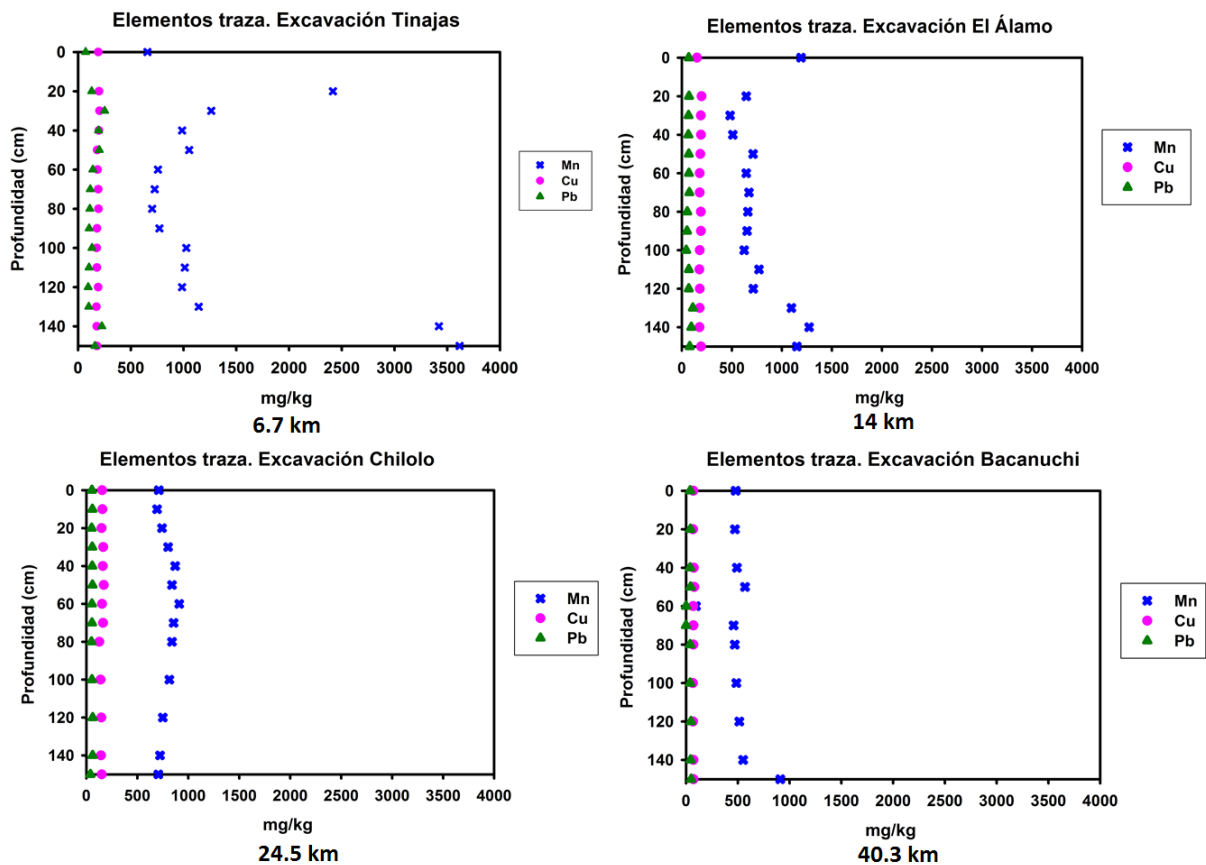


Figura 29. Comportamiento de elementos traza (Mn, Cu, Pb) en los perfiles de las excavaciones.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

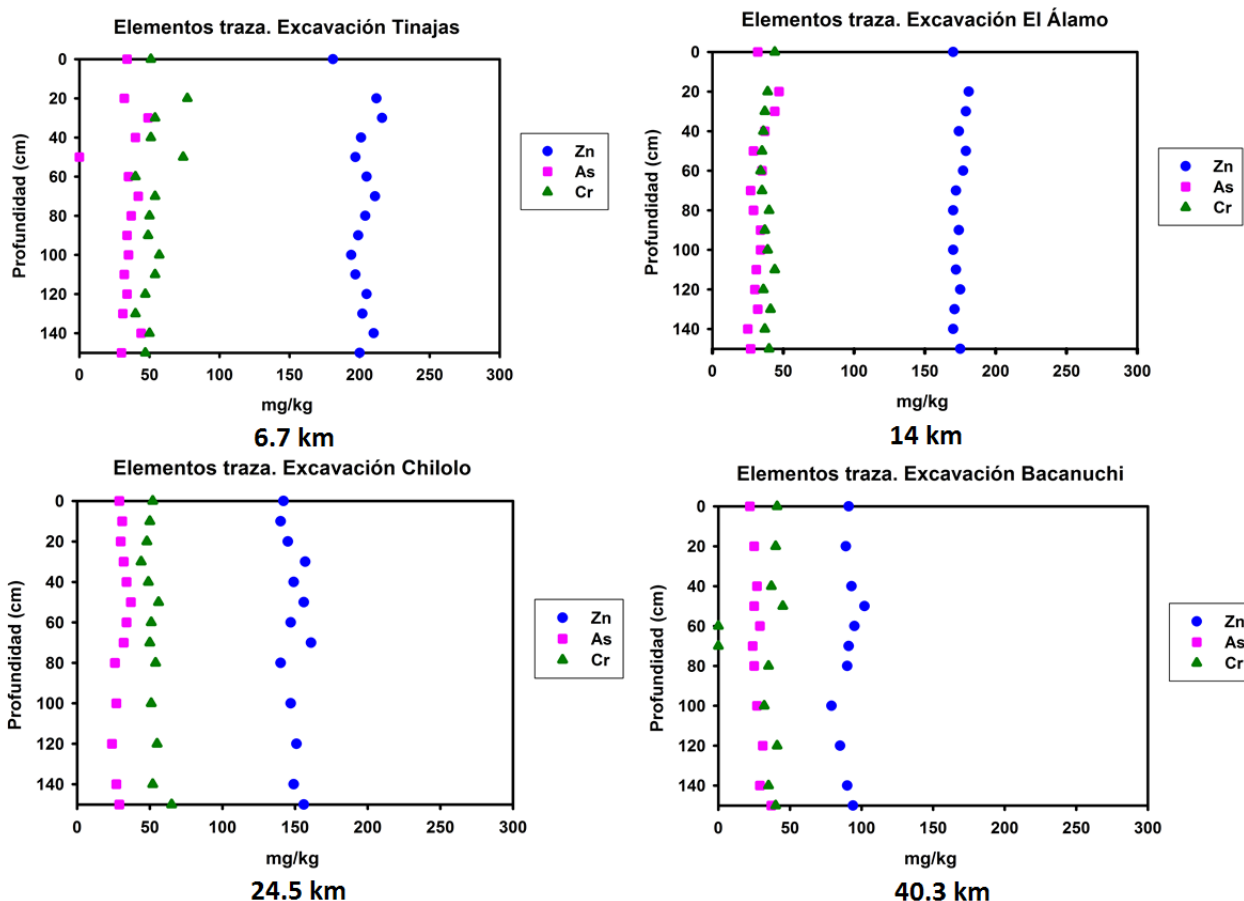


Figura 30. Comportamiento de elementos traza (Zn, As, Cr) en los perfiles de las excavaciones.

Considerando las características de todos los perfiles y resumiendo: Es posible decir que los dos sitios más cercanos al punto del derrame (perfil Tinajas y El Álamo) presentan los valores de pH más ácidos, el mayor contenido de Fe, Mn, Pb y Zn y el menor contenido de Ca. Por su parte, los perfiles más lejanos del sitio del derrame (perfil Chilolo y Bacanuchi) presentan los valores de pH más altos (más básicos), el menor contenido de Fe, Mn, Pb y Zn y el mayor contenido de Ca. Por su parte, la conductividad eléctrica y el resto de los metales traza no tienen un comportamiento evidente en relación con la distancia del sitio del derrame.

## 5.2 Análisis físicos y químicos en muestras superficiales de suelos y sedimentos sin evidencia de afectación por el derrame ácido.

Los análisis se realizaron en muestras superficiales de suelos y sedimentos tomados en el arroyo Tinajas y el río Bacanuchi, con la intención de conocer las características amortiguadoras de las muestras previo a los análisis de movilidad de EPT (sección 5.3).

### A) Análisis físicos.

Los resultados de los análisis físicos se muestran en las tablas 14 y 15.

**Tabla 14. Resultados del análisis físico (color, textura y conductividad hidráulica) en muestras superficiales de suelos y sedimentos de la parte alta de la cuenca del río Sonora.**

Muestra	Color		Textura				Conductividad hidráulica	
	Seco	Húmedo	% Arenas	% Limos	% Arcilla	Clasificación textural	Ks (cm/hora)	Interpretación
<b>Suelo Tinajas (En la terraza del arroyo Tinajas).</b>	5 YR4/4 (Pardo rojizo)	7.5 YR3/2 (Pardo oscuro)	60.6	28.4	11	Franco arenoso	7.67	Moderadamente rápida
<b>Sedimento El Álamo (En el lecho del arroyo Tinajas).</b>	5 YR4/3 (Pardo rojizo)	5 YR3/3 (Pardo oscuro rojizo)	69.5	20.5	10	Franco arenoso	5.25	Moderada
<b>Sedimento Chilolo (En el lecho del río Bacanuchi).</b>	10 YR5/3 (Pardo)	7.5 YR3/4 (Pardo oscuro)	98.7	0.8	0.5	Arena	15.22	Muy rápida
<b>Suelo Bacanuchi (En la terraza del río Bacanuchi).</b>	5 YR5/3 (Pardo rojizo)	7.5 YR3/2 (Pardo oscuro)	63.7	23.4	12.9	Franco arenoso	8.23	Rápida

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 15. Resultados del análisis físico (densidad aparente, densidad real, porosidad y superficie específica) en muestras superficiales de suelos y sedimentos de la parte alta de la cuenca del río Sonora.**

Muestra	Densidad aparente	Densidad real	Porosidad	Superficie específica
	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	%	m <sup>2</sup> /g
<b>Suelo Tinajas (En la terraza del arroyo Tinajas).</b>	1.35	2.46	45.12	17.95
<b>Sedimento El Álamo (En el lecho del arroyo Tinajas).</b>	1.04	2.47	57.89	7.28
<b>Sedimento Chilolo (En el lecho del río Bacanuchi).</b>	1.17	2.53	53.75	5.85
<b>Suelo Bacanuchi (En la terraza del río Bacanuchi).</b>	1.34	2.59	48.26	38.04

La descripción de los resultados del análisis físico en cada muestra se discute a continuación:

- ❖ **Color:** Todas las muestras presentan colores denominados pardos (tanto en seco como en húmedo) por la carta de Munsell, variando desde simplemente pardo, hasta pardo rojizo y pardo oscuro. Dicha coloración puede asociarse a la presencia de minerales ricos en hierro y a posibles reacciones de óxido-reducción. Al tratarse de muestras superficiales se esperaría una coloración con tendencia al negro por contenido de materia orgánica, sin embargo, en ninguno de los suelos/sedimentos se observa esa coloración, lo cual puede asociarse a su bajo contenido orgánico.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

- ❖ **Textura:** Las muestras tomadas sobre el lecho del arroyo Tinajas (sedimento El Álamo) y el lecho del río Bacanuchi (sedimento Chilolo) presentan altos contenidos en arenas, hasta en un máximo de 98.7% para el sedimento Chilolo. Dicha concentración de arenas está relacionada a la granulometría gruesa que presentan estos sedimentos en los lechos del arroyo Tinajas y del río Bacanuchi. Por su parte, el suelo Tinajas tomado en la terraza del arroyo Tinajas y el suelo Bacanuchi, muestreado en una terraza del río Bacanuchi, presentan una relación menor de arenas y mayor en limos y arcillas en comparación con los sedimentos, lo que les confiere una textura de granulometría más fina. Tanto el suelo Tinajas, como el suelo Bacanuchi y el sedimento El Álamo presentan una clasificación textural franco arenosa. Por su parte, el sedimento Chilolo presenta una clasificación textural de arena. Tomando en cuenta la textura más fina en los suelos Tinajas y Bacanuchi, es probable que exista una mayor reactividad y retención de contaminantes en relación a los sedimentos El Álamo y Chilolo.
- ❖ **Conductividad hidráulica:** La conductividad hidráulica es una propiedad de los medios porosos que depende de la permeabilidad intrínseca, de la porosidad del medio y del grado de saturación que este tenga. El sedimento Chilolo presenta una conductividad hidráulica de 15.22 cm/hora, lo cual según la FAO se considera como un valor de Ks cuya evaluación es denominada como “muy rápida” (ver Tabla 16), por lo cual, cualquier fluido en contacto con este sedimento se infiltraría en poco tiempo. La muestra del suelo Bacanuchi presenta una conductividad hidráulica de 8.23 cm/hora, cuya evaluación es de una Ks “rápida”. Por su parte, el suelo Tinajas presenta una conductividad hidráulica de 7.67 cm/hora, es decir, según la FAO presenta una conductividad hidráulica “moderadamente rápida”. Finalmente, el sedimento El Álamo presenta la menor conductividad hidráulica, cuyo valor es de 5.25 cm/hora. A pesar de tratarse de un sedimento, su textura es muy parecida a los dos suelos, por lo que el valor de conductividad hidráulica no es del todo contradictorio. Tomando en cuenta todo lo anterior, es posible suponer que los dos suelos y el sedimento El Álamo tendrían una mayor interacción con una solución contaminante, lo que facilitaría mayores procesos físico-químicos y la posible retención de los contaminantes.

**Tabla 16. Evaluación de la conductividad hidráulica según la FAO.**

cm/hora	Evaluación
0.8	Muy lenta
0.8 - 2.0	Lenta
2.0 - 6.0	Moderada
6.0 - 8.0	Moderadamente rápida
8-0 - 12.5	Rápida
> 12.5	Muy rápida



## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

- ❖ **Densidad aparente:** La densidad aparente se define como la masa seca (105°C) de una unidad de volumen de suelo. Este volumen incluye a los sólidos presentes y a los poros, por lo que la densidad aparente refleja la porosidad total del suelo (FAO, 2009). La menor densidad aparente calculada se presenta en el sedimento El Álamo, con un valor de 1.04 g/cm<sup>3</sup>. Por su parte, el suelo Tinajas presenta la mayor densidad aparente, con un valor de 1.35 g/cm<sup>3</sup>. El resto de las muestras presenta valores entre 1.17 y 1.35 (g/cm<sup>3</sup>). La densidad aparente puede servir como un indicador de la compactación y de las restricciones al crecimiento de las raíces, a medida que esta aumenta, la productividad agrícola de los suelos disminuye, por otro lado, entre mayor es la densidad aparente, la compactación del suelo/sedimento aumenta, lo que está relacionado a la disminución en la porosidad. Tomando en cuenta este criterio, el sedimento El Álamo es la muestra menos compacta, mientras que el sedimento Tinajas presenta la mayor compactación de todas las muestras.
  
- ❖ **Densidad real:** Las partículas de un suelo o sedimento varían en su composición y en su densidad. La densidad de la fase sólida está definida como la masa total de los sólidos dividida por el volumen total de ellos. Los valores típicos varían de 2.5 a 2.8 g/cm<sup>3</sup>, siendo 2.65 g/cm<sup>3</sup> el valor representativo de muchos suelos y el valor de densidad de partícula para el cuarzo. La densidad real en las muestras varía desde un valor de 2.46 g/cm<sup>3</sup> para el suelo Tinajas y hasta 2.59 g/cm<sup>3</sup> para el suelo de Bacanuchi. Debido a esto, se puede inferir que la mineralogía de los sedimentos y suelos muestreados está constituida primordialmente por cuarzo y minerales con densidad parecida.
  
- ❖ **Porosidad:** La porosidad de un suelo/sedimento es la parte que puede ser ocupado por aire y/o agua. La porosidad depende de la textura, estructura, contenido de materia orgánica, etc. Las muestras presentan porosidades que van desde 45.12 % (suelo Tinajas) hasta 57.89% (sedimento El Álamo). Entre más pequeña es la porosidad en una muestra, menor es la capacidad de infiltración del agua u otros fluidos. Ambientalmente hablando, entre mayor porosidad exista, la capacidad de infiltración de una solución contaminante aumenta, por lo tanto también la probabilidad de contaminar cuerpos de agua. Es por ello que en las muestras con menor porosidad, que corresponden a los suelos Tinajas (45.12%) y Bacanuchi (48.26%) la probabilidad de retener una solución contaminante es mayor en comparación a las muestras de sedimento.
  
- ❖ **Superficie específica:** Muchos procesos físicos y químicos que ocurren en los suelos están relacionados con la superficie específica de los sólidos (superficie total del sólido por cada gramo del mismo). El movimiento y la retención de agua, la capacidad de intercambio catiónico y la retención de contaminantes están íntimamente relacionadas con la superficie específica. La muestra de suelo Bacanuchi presenta la mayor superficie específica (38.04 m<sup>2</sup>/g), seguida del suelo Tinajas (17.95 m<sup>2</sup>/g), sedimento El Álamo (7.28 m<sup>2</sup>/g) y finalmente el sedimento Chilolo (5.85 m<sup>2</sup>/g). Tomando en cuenta este parámetro, el suelo Bacanuchi presenta mayor capacidad de retención de contaminantes.

**B) Análisis químicos.**

➤ **Contenido de carbonatos.**

La estimación del contenido de carbonatos es aproximada, se estimó siguiendo el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe et al., 2006). Dicha prueba se basa en la efervescencia de las muestras en contacto con HCl al 10%. Las muestras localizadas en el arroyo Tinajas (suelo Tinajas, y sedimento El Álamo) no mostraron efervescencia alguna, por lo que la adición del ácido clorhídrico no causó efecto alguno, esto infiere que dichas muestras están libres de carbonatos.

Por su parte, en las muestras localizadas en el río Bacanuchi se observó efervescencia en ambas muestras, siendo ligera en el sedimento Chilolo y fuerte en el suelo Bacanuchi. Tomando en cuenta esto, se considera que el sedimento Chilolo presenta una concentración baja de carbonatos (0.5 a 2%), mientras que el suelo Bacanuchi presenta una concentración media (2 a 10 % de CaCO<sub>3</sub>). La tabla 17 muestra el contenido aproximado de carbonatos en las muestras superficiales tomadas en el arroyo Tinajas y el río Bacanuchi.

**Tabla 17. Contenido aproximado de carbonatos en las muestras superficiales.**

Muestra	Contenido de carbonatos		
	Efervescencia	Evaluación	% CaCO <sub>3</sub>
<b>Suelo Tinajas</b>	Reacción invisible e inaudible	Libre de carbonatos	0
<b>Sedimento El Álamo</b>	Reacción invisible e inaudible	Libre de carbonatos	0
<b>Sedimento Chilolo</b>	Reacción ligera, apenas visible	Bajo	0.5 a 2
<b>Suelo Bacanuchi</b>	Efervescencia fuerte, pero breve	Medio	2 a 10

➤ **Punto de carga cero (PZC).**

Se obtuvo el punto de carga cero (PZC) en todas las muestras superficiales, los resultados se muestran en la figura 31.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

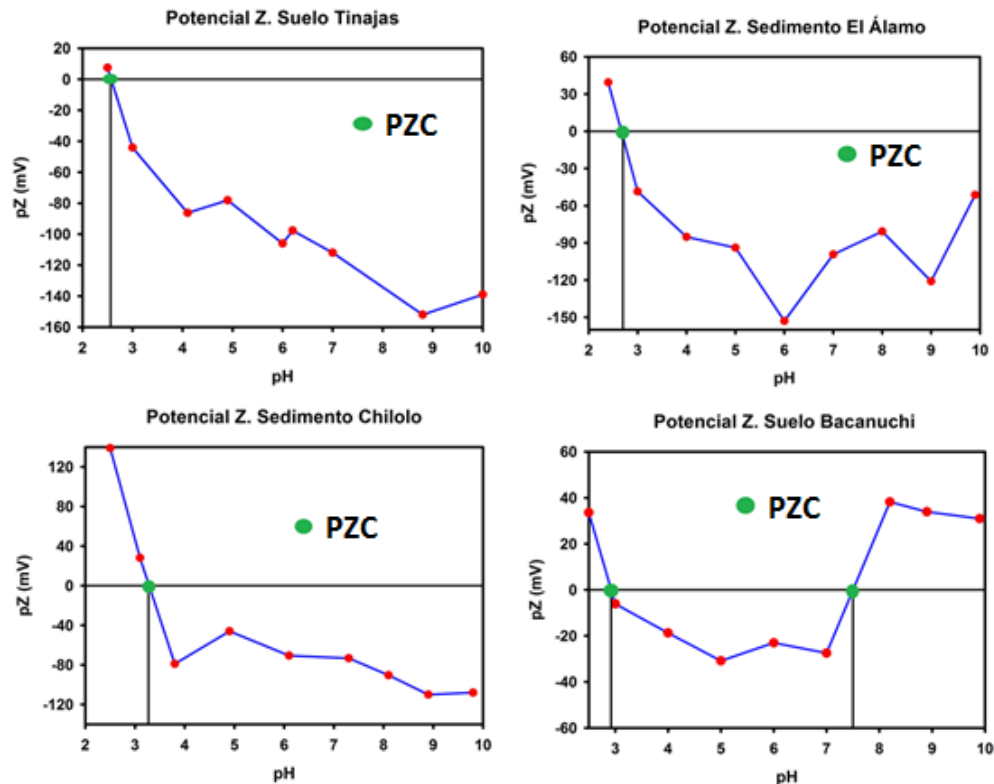


Figura 31. Potencial de carga cero (PZC) en las muestras superficiales.

Para el suelo Tinajas se observa un punto de carga cero con un pH de 2.55, lo cual puede corresponder a algún mineral de arcilla. Dicho valor implica que cuando se tiene un pH superior a este valor, las partículas de este suelo tienen una carga negativa preferente, por lo que pueden retener cationes metálicos.

Para el sedimento El Álamo, se determinó un PZC igual a 2.68, al igual que en el suelo Tinajas este valor puede corresponder a filosilicatos. Cuando en el medio existe un pH superior a 2.68, las partículas de este sedimento se cargan negativamente preferentemente y pueden atraer vía sorción a partículas cargadas positivamente (cationes metálicos).

En lo que corresponde al sedimento Chilolo, la gráfica de potencial Z sugiere que este sedimento presenta un punto de carga cero igual a 3.24, por lo que las partículas se cargan negativamente primordialmente a valores de pH superiores a 3.24, debido a esto pueden retener vía sorción a partículas cargadas positivamente cuando el pH del medio es superior a este valor.

Finalmente, en el suelo Bacanuchi se observan dos probables puntos de carga cero, el primero de ellos a un pH de 2.92 (que puede corresponder a minerales arcillosos) y el segundo a un valor de pH de 7.49 (el cual puede asociarse a minerales de hierro, como oxihidróxidos de Fe o bien, a minerales como la calcita). Tomando en cuenta lo anterior, es probable que este suelo pueda retener vía sorción tanto aniones como cationes.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### ➤ Carbono orgánico total

La tabla 18 muestra los resultados de la evaluación del contenido de carbono total en las muestras superficiales tomadas en el arroyo Tinajas y el río Bacanuchi.

**Tabla 18. Contenido de carbono total en las muestras superficiales.**

Muestra	Carbono total (CT)	Carbono inorgánico total (CIT)	Carbono orgánico (COT)
	%C		
Suelo Tinajas	0.94	0.01	0.93
Sedimento El Álamo	0.33	0.01	0.32
Sedimento Chilolo	1.04	0.15	0.89
Suelo Bacanuchi	0.88	0.29	0.59

Se observa que todas las muestras presentan un contenido de carbono orgánico total (COT) de entre 0.32 % (sedimento El Álamo) y hasta 0.93 % (suelo Tinajas). Dicho porcentaje se encuentra dentro del intervalo de contenido de carbono orgánico considerado como “muy bajo” (Tabla 19). Debido a ello, es posible suponer que en estos suelos y sedimentos la importancia del carbono orgánico en la retención de EPT es baja.

**Tabla 19. Evaluación del contenido de carbono orgánico en suelos. Tomado de Siebe et al, 2006.**

%	Evaluación del contenido de carbono orgánico
0.5 a 1	Muy bajo
1 a 2	Bajo
2 a 4	Medio
4 a 10	Medio alto
10 a 15	Alto
15 a 20	Muy alto

De igual forma, en la tabla 18 se observan los resultados del contenido de carbono inorgánico total (suma de dióxido de carbono, ácido carbónico, bicarbonato y carbonato) en las muestras evaluadas. Se confirma que en el suelo Tinajas y el sedimento El Álamo (muestras que no efervescieron con la adición de HCl) las concentraciones de carbono inorgánico total son prácticamente de 0, por lo que no se tiene la presencia de ningún tipo de carbonato.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

Por su parte, el sedimento Chilolo que se había evaluado en la tabla 17 como una muestra con bajo contenido de carbonatos, presenta un valor de 0.15% de carbono inorgánico total, el cual resulta mayor en comparación al suelo Tinajas y al sedimento El Álamo, pero se mantiene como una concentración baja. En lo que respecta al suelo Bacanuchi, en donde se observó en campo una efervescencia fuerte pero breve al reaccionar con ácido clorhídrico (HCl al 10%), la determinación del contenido de carbono inorgánico total fue de 0.29%, aunque efectivamente resulta ser la muestra con mayor contenido de carbono inorgánico (entre los que se encuentran los carbonatos) su concentración es baja, lo que contradice lo visto en campo.

Tomando en cuenta todos los análisis físicos y químicos realizados en las muestras superficiales, es posible resumir los siguientes puntos:

- El suelo Bacanuchi presenta características que le confieren mayor capacidad de amortiguamiento en comparación a las otras muestras, ya que presenta el mayor porcentaje de arcillas (texturalmente hablando), la mayor superficie específica (la cual se relaciona a las partículas más pequeñas que presenta), a su posible retención vía sorción de aniones y cationes (ya que presenta dos puntos de carga cero) y además, su concentración en carbonatos es la mayor de todas las muestras, lo que implicaría su capacidad para neutralizar la acidez, lo que podría facilitar mayores procesos de precipitación de nuevas fases minerales (fases secundarias que pueden retener EPT).
- El suelo Tinajas no presenta carbonatos, lo que imposibilitaría el amortiguamiento de la acidez en este suelo, sin embargo, presenta una textura con tamaños de partícula de arcillas (hasta en un 11%), una porosidad menor en relación a las demás muestras, y una superficie específica de 17.95 m<sup>2</sup>/g, que en conjunto le permitirían retener contaminantes por procesos físico-químicos.
- El sedimento El Álamo presenta una textura con 10% de arcillas, y la menor conductividad hidráulica de todas las muestras, además presenta un punto de carga cero de 2.68 (que puede corresponder a minerales arcillosos), todo lo cual le confiere cierta capacidad para retener EPT, sin embargo, su nulo contenido en carbonatos imposibilitaría su capacidad de neutralizar una solución ácida.
- Finalmente, el sedimento Chilolo parece ser el menos amortiguador, ya que su textura arenosa y su baja cantidad de partículas del tamaño de arcillas le imposibilitaría retener una solución contaminante (tomando en cuenta que presenta la menor superficie específica, es posible decir que las partículas de este sedimento no son lo suficientemente reactivas para retener vía sorción contaminantes), la cual se infiltraría rápidamente (la conductividad hidráulica de este sedimento es la mayor de todas las muestras). No obstante, se trata de la segunda muestra con mayor contenido de carbonatos, lo que le podría dar cierta capacidad para neutralizar la acidez de una solución ácida, facilitando que los EPT no se encuentren solubles.
- La baja concentración de carbono orgánico en todas las muestras puede implicar que este parámetro no tenga relevancia en la retención de contaminantes metálicos.

### 5.3 Evaluación de la movilidad de elementos potencialmente tóxicos en suelos y sedimentos de la zona de estudio mediante experimentos en columnas inalteradas.

#### 5.3.1 Condiciones experimentales

Como se mencionó en la sección 4.3.1, para evaluar la movilidad y retención de EPT en columnas de suelo y sedimento se colectó en campo una muestra compuesta de la solución ácida ferrocuprífera, que corresponde a la misma solución derramada en el repeso "Tinajas 1". Dicha solución fue caracterizada por medio de Espectroscopia de Plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES), los resultados se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Características de la muestra compuesta de la solución ácida ferrocuprífera.

Muestra compuesta de solución ácida ferrocuprífera	Elemento	mg/L	Elemento	mg/L
	Al	4264.80	Mn	643.92
	As	1.08	Pb	0.18
	Cd	4.05	Zn	377.29
	Cr	1.21	ion SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	30021
	Cu	787.13	pH	2.43
	Fe	3430.09	CE (mS/cm)	17.26

El nombre de solución ácida ferrocuprífera está relacionado con su composición química, la cual refleja altas concentraciones disueltas de Hierro (Fe), Aluminio (Al) y Cobre (Cu), principalmente, aunque el mayor compuesto disuelto es el ion sulfato en una concentración de 30021 mg/L, por lo que se trata de una solución ácida (pH = 2.43) sulfatada. La solución contiene 13 elementos potencialmente tóxicos disueltos en diferentes concentraciones (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, V y Zn), de los cuales 9 fueron seleccionados para este estudio (elementos presentes en la tabla 20) con base en tres criterios: 1) estar normados (As, Cd, Cr y Pb, norma NOM 127), 2) se encuentran en altas concentraciones en la solución ácida ferrocuprífera (> 300 mg/L, Al, Cu, Fe, Mn y Zn) y 3) por sus altos valores de fondo en la región de estudio (principalmente Fe y Cu). Los siguientes elementos también se presentan en la solución ácida ferrocuprífera: Na = 31.74 (mg/L), Ca = 0.71 (mg/L) y K = 0.51 (mg/L).

Cabe destacar que la composición química de la solución ácida fue determinada por la CONAGUA el 08 de agosto de 2014 (2 días después del derrame). Los resultados de esa caracterización se muestran en la tabla 21. Se observan diferencias significativas con las concentraciones mostradas en la tabla 20, sin embargo, es importante notar que la muestra de la solución ácida usada para este trabajo (Tabla 20) se tomó varios meses después de sucedido el derrame (aproximadamente 6 meses después), por lo que estuvo expuesta al medio ambiente y por lo mismo, las concentraciones solubles de los metales muestran cambios en relación a la muestra tomada inmediatamente después del derrame.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

**Tabla 21. Composición química del derrame de solución ácida ferrocuprífera del represo “Tinajas 1” determinada por CONAGUA el 8 de Agosto de 2014.**

Elemento	Concentración	Elemento	Concentración
	mg/L		mg/L
Fe	1080	As	43
Al	461	Cd	7.8
Cu	114	Pb	2.5
Mn	98	Cr	1.5
Zn	51		

Los experimentos en columnas inalteradas de suelos y sedimentos se realizaron con el objetivo de determinar la movilidad de los elementos presentes en la tabla 20, en condiciones parecidas a la realidad, es decir, evaluar si estos EPT se retienen o se liberan en o desde las columnas al pasar a través de la estructura y porosidad originales de ambas matrices. Mediante estos experimentos se evaluó la capacidad amortiguadora de los suelos y sedimentos.

Los parámetros que fueron monitoreados durante los experimentos son: el pH, la conductividad eléctrica, el flujo de los lixiviados en la base de las columnas, el potencial redox, así como la variación de la concentración de EPT en la solución de suelo en diferentes profundidades y en la base de las mismas.

### 1. Columna de suelo Tinajas.

Ubicación: Terraza del arroyo Tinajas

Distancia al sitio del derrame: 6.7 Km

Altura de la columna: 20.5 cm

Volumen de poro: 1980 cm<sup>3</sup>

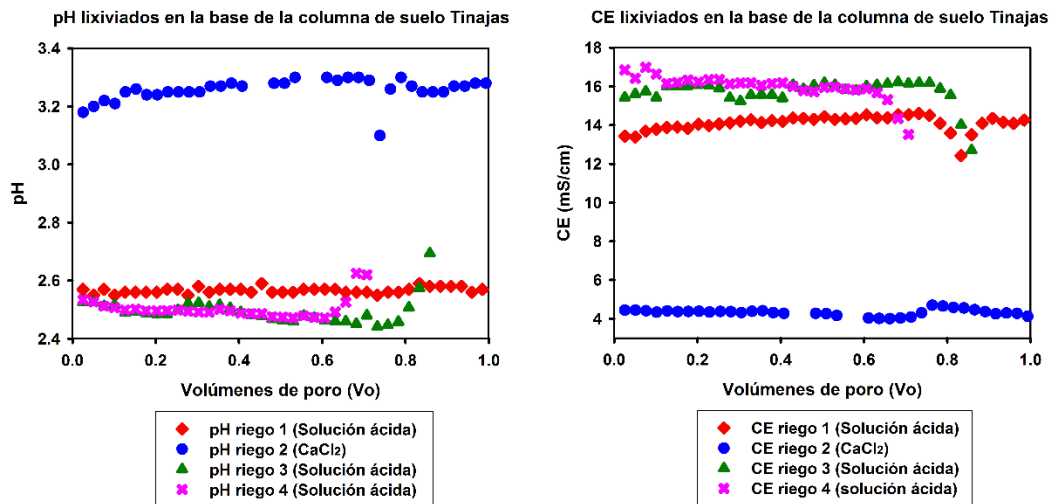
Número de riegos: 4.

Se realizaron 4 riegos en la columna de suelo Tinajas, el primero de ellos con la solución ácida ferrocuprífera y el segundo con una solución de CaCl<sub>2</sub>, con el propósito de simular la llegada de la solución ácida y posteriormente la subida del arroyo Tinajas producida por precipitaciones pluviales. El tercer y cuarto riego se realizaron con la solución ácida para facilitar cambios físico-químicos en la columna que permitieran observar de forma más evidente los efectos que el paso de la solución ácida ferrocuprífera provocaron en el suelo. Los resultados se muestran a continuación.

#### a) pH y Conductividad Eléctrica.

En la figura 32 se observan las modificaciones en el pH y la conductividad eléctrica en la base de la columna para cada riego. Se muestran las curvas de variación de los parámetros antes mencionados versus el volumen de poro.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES



**Figura 32. pH y CE en los lixiviados colectados en la base de la columna Tinajas en cada uno de los riegos.**

Durante el riego 1 con la solución ácida el pH de la solución de lixiviado en la base de la columna se mantuvo con poca variación, teniendo un valor de 2.5 unidades todo el tiempo, dicho valor es cercano al valor de pH de la solución aplicada en el riego (ver Tabla 20). En lo que respecta al segundo riego, el pH original de la solución de CaCl<sub>2</sub> (0.005 M) era de 6.44, el cual disminuye durante el riego hasta un valor mínimo de 3.1 unidades, esto sugiere que al pasar la solución de cloruro de calcio a través del suelo la acidez de la solución de lixiviado aumenta, sin embargo, se mantiene en un valor de pH de entre 3.1 y 3.3 unidades durante la duración del experimento. En lo que respecta al tercer y cuarto riego el pH disminuye ligeramente en comparación al primer riego, hasta un mínimo de 2.44 y 2.42 unidades, respectivamente, sin embargo, tomando en cuenta que el pH de la solución ácida ferrocuprífera es de 2.43, no existió una modificación en el pH de los lixiviados. Se puede inferir la poca capacidad amortiguadora de acidez en este suelo, considerando la nula presencia de carbonatos de este suelo (ver tablas 17 y 18) no se favorece la neutralización de la acidez de la solución ferrocuprífera, por lo que el pH de los lixiviados durante los riegos 1, 3 y 4 se mantiene prácticamente sin cambios en relación al pH original.

La conductividad eléctrica de los primeros lixiviados en el riego 1 fue de alrededor de 13.5 mS/cm, llegando hasta 14.24 mS/cm después de un volumen de poro. Por su parte, la conductividad eléctrica alcanza valores máximos de 16.22 y 16.98 mS/cm en el tercer y cuarto riego, respectivamente. Tomando en cuenta que la CE de la solución ácida ferrocuprífera es de 17.26 mS/cm, se observa que en los 3 riegos existe una disminución de la misma durante el tiempo de los experimentos, siendo más evidente en el primer riego. Debido a ello, es posible que algunos iones disueltos de la solución ácida aplicada en los 3 riegos hayan quedado retenidos al estar en contacto con los sólidos del suelo. Para el segundo riego no existe una modificación evidente en la CE al pasar por el suelo, ya que la CE original de la solución de CaCl<sub>2</sub> era de 4.4 mS/cm, alcanzando un valor máximo de 4.69 mS/cm durante este riego, sin embargo, se mantiene en un promedio de 4.5 mS/cm, esto se debe a que la fuerza iónica de la solución de CaCl<sub>2</sub> era precisamente la fuerza iónica del suelo.



b) Flujo de lixiviados en la base de la columna

Con el propósito de determinar cambios estructurales y de porosidad en el suelo Tinajas por medio del movimiento de los lixiviados infiltrados en cada riego, se monitoreó el flujo de los mismos. Los resultados se presentan en la figura 33, donde se observa la variación de la velocidad del lixiviado versus el volumen de poro.

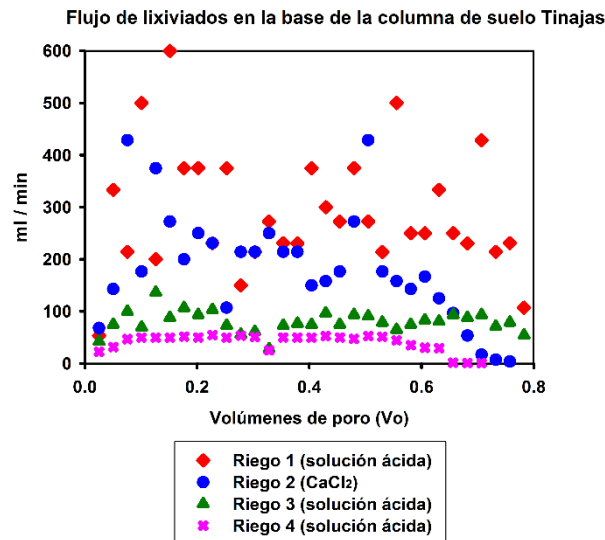


Figura 33. Flujo de lixiviados en la base de la columna del suelo Tinajas. El valor de 0 en  $V_o$  corresponde al inicio de la salida de lixiviados en la base de la columna.

El flujo en la base de la columna de suelo Tinajas durante el primer riego ocurrió de forma heterogénea, cambiando considerablemente con el tiempo (con una tendencia a disminuir), yendo desde un valor máximo de 600 ml/min a 0.15 volúmenes de poro, hasta un valor mínimo de 107.14 ml/min a 0.78 volúmenes de poro. Por su parte, en el segundo riego el flujo alcanza el estado estacionario a 0.76 volúmenes de poro, a pesar de tener algunos valores sin una tendencia clara, el flujo en el segundo riego es más lento y homogéneo en comparación al primer riego. Al comparar lo observado en los riegos con la solución ácida ferrocuprífera y la solución de cloruro de calcio, aparentemente la primera tiene un efecto en la estructura del suelo que se modifica a medida que el flujo avanza en la columna. Los flujos en la base de la columna para el tercer y cuarto riego son más homogéneos y en general presentan un flujo más lento en comparación a los anteriores riegos, alcanzando el estado estacionario a 0.71 volúmenes de poro en el cuarto riego. De forma general se observa que el primer riego presenta flujos rápidos y dada su acidez se trata de un fluido erosivo que probablemente promueve un cambio en el tamaño de los poros. El flujo en el segundo riego con la solución de  $\text{CaCl}_2$  es más lento y homogéneo y, además, menos agresivo en términos erosivos en comparación al primer riego. Los últimos dos riegos, al tratarse de la solución ácida y observar un comportamiento homogéneo, hacen pensar en que la estructura del suelo fue modificada, una hipótesis que explique este resultado puede ser el hecho de la formación de flujos preferenciales por los que pasa el flujo de la solución aplicada o bien, el reacomodo de las partículas del suelo que se movieron de la parte alta de la columna a la parte baja de la misma, en donde se acumularon.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

c) Curvas de elución de elementos potencialmente tóxicos en la base y a diferentes profundidades de la columna.

Con la intención de conocer el comportamiento de los EPT presentes en la solución ácida en contacto con el suelo Tinajas se realizaron curvas de elución para cada uno de los elementos analizados. Dichos gráficos muestran la variación de la concentración del elemento de interés (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn), de manera adimensional ( $C/C_0$ , concentración del elemento en el lixiviado respecto a la concentración del elemento en la solución aplicada) versus el volumen de poro. Los resultados se muestran en las figuras 34 y 35.

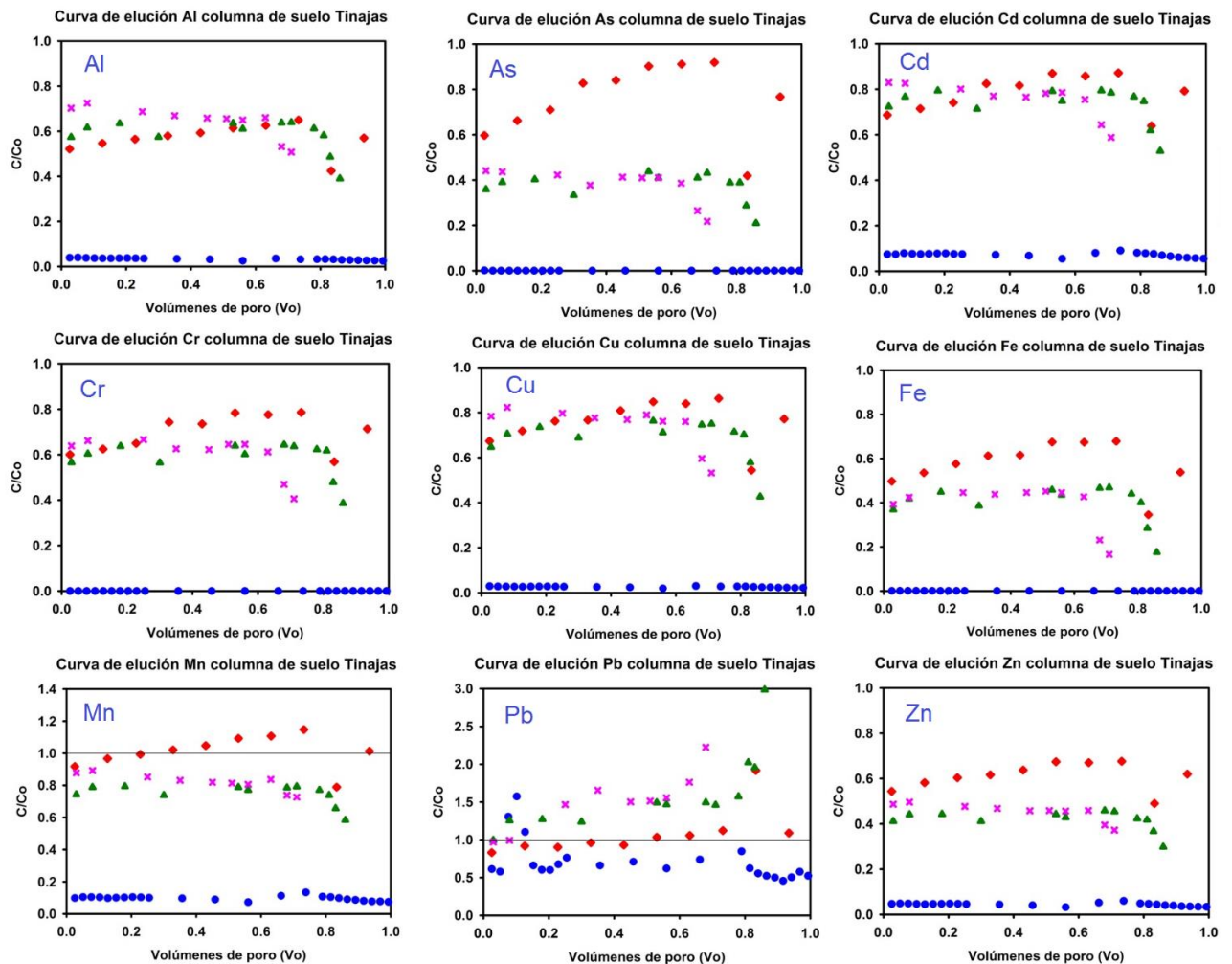


Figura 34. Curvas de elución de EPT en la base de la columna de suelo Tinajas.  $C/C_0$  concentración adimensional del elemento,  $V_0$ , volúmenes de poro; rombos rojos: primer riego con la solución ácida ferrocupriferá; puntos azules corresponden al segundo riego en el cual se aplicó  $\text{CaCl}_2$  0.005M; triángulos verdes corresponden al tercer riego con la solución ácida ferrocupriferá; cruces rosas corresponden al cuarto riego con la solución ácida ferrocupriferá. Mayor a 1 en  $C/C_0$  implica liberación del elemento desde el suelo.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La figura 34 presenta las curvas de elución de los diferentes EPT retenidos y/o liberados. Cabe destacar que el primer riego con la solución ácida y el segundo riego con la solución de  $\text{CaCl}_2$  pretenden simular lo ocurrido en campo, la llegada del derrame ácido y las precipitaciones en el arroyo Tinajas. Los posteriores riegos (tercero y cuarto) se realizaron con la intención de favorecer cambios físico-químicos en el suelo con el objetivo de que el suelo estuviera más tiempo en contacto con la solución ácida ferrocuprífera.

Los porcentajes retenidos de cada EPT señalados en las siguientes páginas (para las cuatro columnas) se refieren a la relación entre la suma de las masas de cada EPT de todos los lixiviados colectados durante cada riego y la masa de cada EPT presente en la solución ácida ferrocuprífera añadida en los experimentos, tal como se señaló en las ecuaciones 2-6. Por su parte, los porcentajes liberados señalados en los riegos con  $\text{CaCl}_2$  (para el caso de las columnas Tinajas, El Álamo y Chilolo) corresponden a la relación entre la masa lixiviada de cada EPT durante ese riego y la masa de cada EPT retenida durante el primer riego (tal como lo ilustra la ecuación 7). La descripción a detalle de cada EPT para las curvas de elución de la figura 34 se presenta a continuación:

**Aluminio (Al):** Durante el primer riego, el primer lixiviado colectado a 0.03  $V_o$  presentó una relación C/Co igual a 0.52. La mínima relación C/Co se dio a 0.83  $V_o$ , con un valor de 0.42. Tomando en cuenta los balances de masa para Al durante el primer riego el porcentaje retenido es de 51.25%. Por su parte, el área bajo la curva para este riego es de 0.57, lo que implica una retención de 43%. En ningún volumen de poro se observa un valor mayor a 1 en la relación C/Co, lo que puede implicar que la concentración lixiviada de Al nunca fue mayor a la añadida, por lo que es de esperarse que no exista liberación de Al desde el suelo. Tomando en cuenta la retención de Al durante el primer riego (igual a 51.25% usando balances de masa), se determinó una liberación de hasta 4.47% después del segundo riego, lo que puede implicar que tras el paso de la solución de  $\text{CaCl}_2$  la lixiviación de Al es mínima. En lo que respecta al tercer y cuarto riego, se determinaron porcentajes de retención de Al iguales a 47.54% y 51.64%, respectivamente, utilizando balances de masa. El área bajo la curva para el tercer riego es de 0.50, lo que implica una retención del 50% después del paso de la solución ácida ferrocuprífera. Por su parte, en el cuarto riego, el área bajo la curva es de 0.45, lo que implicaría una retención de 55% del Al añadido. En ningún lixiviado colectado durante el tercer y cuarto riego se determinó una relación C/Co mayor a 1, por lo que es posible decir que no existió liberación de Al desde el suelo.

**Arsénico (As):** Se observa que el As inicia con una relación C/Co igual a 0.60 en un volumen de poro de 0.03 durante el primer riego, llegando a un valor de C/Co mínimo de 0.42 a 0.83  $V_o$ . Tomando en cuenta los balances de masa, se calculó una retención de As igual a 36.9% durante el primer riego. Con el cálculo del área bajo la curva se determinó un valor de 0.76, lo que implica una retención de 24% de As durante el primer riego. En ningún lixiviado se determinó un valor C/Co mayor o igual a 1, lo que implica que en ningún tiempo hubo liberación de As desde el suelo. En lo que respecta al segundo riego, se calculó una liberación de hasta 0.19% del As retenido en el primer riego. Se observa que en todos los volúmenes de poro analizados se presentan valores C/Co iguales o cercanos a 0, lo que implica que durante este riego no se lixivió As, por lo que se infiere que todo lo retenido durante el primer riego permanece de esa forma tras el paso de la solución de  $\text{CaCl}_2$ . La retención de As para el tercer riego es de 66.64% (tomando en cuenta balances de masa)

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

y de 68% tomando en cuenta el área bajo la curva. Por su parte, en el cuarto riego se determinó una retención de As igual a 71.65% mediante balances de masa y de 73% con la determinación del área bajo la curva.

Cadmio (Cd): En lo que respecta al Cd, el primer lixiviado colectado a 0.03 Vo presentó un valor C/Co igual a 0.69. El mínimo valor de C/Co durante el primer riego fue de 0.64 a 0.83 Vo. El porcentaje retenido de Cd después del primer riego fue de 32.28% tomando en cuenta balances de masa y de 21% tomando en cuenta el área bajo la curva (valor de C/Co igual a 0.79). Después del segundo riego se determinó una liberación de hasta 15.79% del porcentaje retenido de Cd durante el primer riego (tomando en cuenta el valor calculado con los balances de masa). Finalmente, en el tercer riego se determinó un porcentaje de retención de Cd igual a 34.15% con el uso de las ecuaciones 2-6 y de 38% con el cálculo del área bajo la curva (ecuación 8). Por su parte, después del cuarto riego, se calculó una retención de Cd igual a 43.4% y 48%, con los balances de masa y el área bajo la curva, respectivamente. En ninguno de los riegos la relación C/Co es mayor a 1, lo que implica que nunca salió más Cd del que se agregó en la solución ácida ferrocuprífera.

Cromo (Cr): Considerando los balances de masa, se calculó una retención de Cr igual a 39.69%. Por su parte, el área bajo la curva es igual a 0.71 durante el primer riego, por lo que la retención es de 29%. Para el segundo riego, en ninguno de los lixiviados colectados se determinó concentración soluble de Cr, por lo que aparentemente no existe liberación del mismo después del paso de la solución que simula las precipitaciones ocurridas en el arroyo Tinajas, lo cual puede implicar que el Cr presente y/o retenido en el suelo antes de este riego es estable, por lo que no se libera del mismo. La retención de Cr calculada con el uso de las ecuaciones 2-6 después del tercer y cuarto riego es igual a 47.52% y 55.06%, respectivamente. Por su parte, con el uso de la ecuación 8 (área bajo la curva) se determinó una retención de Cr igual a 50% para el tercer riego y de 58% para el cuarto riego. En ningún volumen de poro se presenta un valor mayor a 1 en la relación C/Co para ningún riego, por lo que es posible decir que no existió liberación de Cr desde el suelo tras el paso de la solución ácida ferrocuprífera.

Cobre (Cu): El primer lixiviado colectado durante el primer riego a 0.03 Vo presentó una relación C/Co igual a 0.67. La mínima relación C/Co se dio a 0.83 Vo, con un valor de 0.54. Tomando en cuenta los balances de masa para Cu es posible decir que la retención del mismo es de 35%. Por su parte, se determinó una retención de 23% considerando el área bajo la curva. Tomando en cuenta la retención de Cu durante el primer riego (igual a 35% con el balance de masa), se determinó una liberación de hasta 5.17% después del segundo riego, en el cual se observa que muchos de los lixiviados colectados presentan una relación C/Co de Cu cercana a 0, es decir, la concentración lixiviada de Cu después de este riego es baja. En lo que respecta al tercer y cuarto riego, se determinaron mediante balances de masa porcentajes de retención iguales a 38.74% y 44.59%, respectivamente, y porcentajes mediante el cálculo del área bajo la curva iguales a 41% (tercer riego) y 48% para el cuarto riego. En ningún volumen de poro de ningún riego se observa un valor mayor a 1 en la relación C/Co, lo que puede implicar que la concentración lixiviada de Cu nunca fue mayor a la añadida, por lo que es de esperarse que no exista liberación del mismo desde el suelo.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Hierro (Fe): El Fe inicia con una relación C/Co igual a 0.50 en un volumen de poro de 0.03 durante el primer riego, llegando a un valor mínimo de C/Co igual a 0.35 a 0.83 Vo. Considerando las masas de todos los lixiviados, se calculó una retención de Fe igual a 52.30% durante el primer riego. Por su parte, mediante el uso de la ecuación 8 se determinó una retención de 42% de Fe durante el primer riego. En lo que respecta al segundo riego, se calculó una liberación de hasta 0.09% del Fe retenido en el primer riego. Se observa que en todos los volúmenes de poro analizados se presentan valores C/Co iguales a 0, lo que implica que durante este riego no se lixivió Fe, por lo que se infiere que todo lo retenido durante el primer riego permanece de esa forma tras el paso de la solución de  $\text{CaCl}_2$ . La retención de Fe para el tercer riego es de 64.37% (mediante balances de masa) y de 66% (tras el cálculo del área bajo la curva). Para el cuarto riego la retención es de 70.97% (con el uso de balances de masa) y de 72% mediante el uso de la ecuación 8. En ningún lixiviado se determinó un valor C/Co mayor o igual a 1, lo que implica que en ningún tiempo hubo liberación de Fe desde el suelo.

Manganeso (Mn): En lo que respecta al Mn, el primer lixiviado colectado a 0.03 Vo presentó un valor C/Co igual a 0.92, lo que implica que la concentración determinada de Mn fue muy parecida a la añadida en la solución ácida ferrocuprífera, por lo cual es posible suponer flujos preferenciales durante este riego al inicio del mismo. El porcentaje retenido calculado para el Mn después del primer riego es de 12.91% con el uso de balances de masa. Sin embargo, el área bajo la curva calculada para el Mn en este riego es igual a 1.02, lo que implicaría que no existió retención de este EPT durante el primer riego e incluso se observa en la figura 34 que durante el primer riego se observaron algunos valores de C/Co mayores a 1 para el Mn, lo que implica que en diferentes momentos la concentración de Mn en los lixiviados colectados fue mayor a la añadida, por lo cual es posible suponer la liberación del mismo desde el suelo en diferentes momentos. Considerando la posible retención de Mn calculada con el balance de masas (igual a 12.91 %) después del segundo riego se determinó una liberación de hasta 52.35%, lo que implica que más de la mitad del Mn retenido (en caso de haber existido retención) se lixivió después del paso de la solución de  $\text{CaCl}_2$ . Finalmente, en el tercer riego se determinó un porcentaje de retención de Mn igual a 32.86% mediante balances de masa y de 37% mediante el cálculo del área bajo la curva. Por su parte, después del cuarto riego, se calculó una retención de Mn igual a 38.53% (con balances de masa, ecuaciones 2-6) y de 44% (mediante el uso de la ecuación 8).

Plomo (Pb): Considerando los balances de masa y el cálculo del área bajo la curva no se determinó la retención de Pb durante ningún riego. Durante el primer riego se observa que en varios lixiviados se presentaron valores de C/Co mayores a 1, siendo el máximo valor de 1.92 a 0.83Vo, es decir, tras el paso de la solución ácida ferrocuprífera se observa la liberación de Pb desde el suelo en diferentes momentos. Por su parte, después del paso de la solución de  $\text{CaCl}_2$ , se observa que el Pb se lixivia en mayores proporciones en relación a lo agregado en la solución ácida ferrocuprífera en varios momentos, alcanzando concentraciones de hasta 0.62 mg/L, es decir, hasta 3.44 veces más de la presente en la solución ácida (cuya concentración es igual a 0.18 mg/L). Por su parte, en el tercer y cuarto riego existe liberación de Pb desde el suelo en diferentes momentos, con valores de C/Co de hasta 2.99 y 2.22, respectivamente, lo que implica que después de la interacción del suelo con la solución ácida la concentración del Pb es de hasta casi 3 veces más en relación a su concentración en la solución ácida ferrocuprífera.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

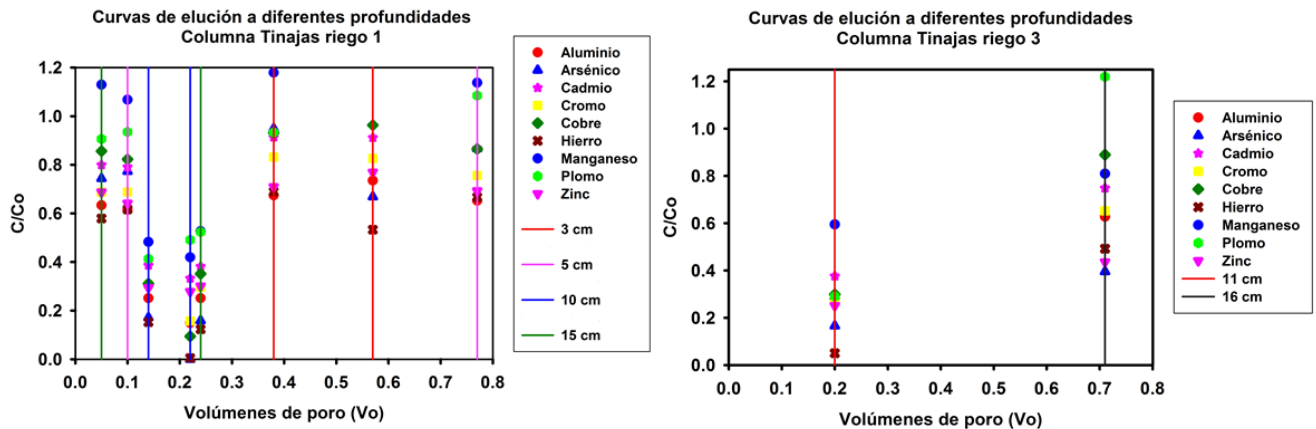
Zinc (Zn): En el caso del Zn, el primer lixiviado colectado durante el primer riego a 0.03 Vo presentó una relación C/Co igual a 0.54. La mínima relación C/Co se dio a 0.83 Vo, con un valor de 0.49. Tomando en cuenta la concentración de Zn de todos los lixiviados colectados y el balance de masa realizado para el Zn se determinó una retención de 47.14%. Por su parte, se calculó una retención igual a 38% de Zn con el uso de la ecuación 8. Considerando la retención de Zn durante el primer riego (igual a 47.14% con el uso de las ecuaciones 2-6), se determinó una liberación de hasta 6.59% después del segundo riego, en el cual se observa que la mayoría de los lixiviados colectados presentan una relación C/Co cercana a 0, es decir, la concentración lixiviada de Zn después de este riego es baja, por lo que se infiere que lo retenido durante el primer riego permanece de esa forma tras el paso de la solución de CaCl<sub>2</sub>. En lo que respecta al tercer y cuarto riego, se determinaron porcentajes de retención de Zn mediante balances de masa iguales a 62.52% y 65.99%, respectivamente y de 65% y 69% con el cálculo del área bajo la curva. En ningún volumen de poro se observa un valor mayor a 1 en la relación C/Co, lo que puede implicar que la concentración lixiviada de Zn nunca fue mayor a la añadida, por lo que es de esperarse que no exista liberación del mismo desde el suelo.

Los resultados obtenidos por medio de las curvas de elución en la base de la columna de suelo (tanto con el uso de balances de masa como con el cálculo del área bajo la curva) permiten afirmar que el suelo tiene la capacidad de retener en diferentes proporciones a los diferentes EPT presentes en la solución ácida ferrocuprífera, con excepción del Pb, el cual parece liberarse desde el suelo tras el paso de la solución ácida. Esta retención parece continuar después del paso de la solución de CaCl<sub>2</sub>, lo que implicaría que ante un evento de precipitaciones como el sucedido en el arroyo Tinajas después del derrame ácido no existiría la liberación de los EPT retenidos en el suelo, con la excepción del Pb, el cual se libera en mayores concentraciones. Se observa que este suelo presenta capacidad amortiguadora incluso después de un segundo y tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera, ya que aparentemente retiene a todos los EPT analizados (con excepción nuevamente del Pb).

Tomando en cuenta la acidez de la solución del suelo (la nula presencia de carbonatos en este suelo imposibilita que la acidez sea neutralizada después de la infiltración de la solución ácida) la mayoría de los metales deberían de estar en forma soluble, sin embargo, su retención puede deberse a la presencia de minerales de arcilla (el punto de carga cero de este suelo es de 2.55 como se ve en la figura 31, lo que significa que a valores de pH mayores a este valor puede ocurrir la retención de cationes metálicos) o a la posible precipitación de minerales secundarios (principalmente minerales de hierro, tomando en cuenta las altas concentraciones de este elemento en la solución ácida ferrocuprífera) formados por la interacción del suelo y la solución ácida, lo cuales podrían ser importantes en la posible retención de los mismos.

Durante el experimento, se colectaron muestras de solución de suelo a lo largo de la columna en el primer y tercer riego (a 3, 5, 10, 11 y 15 cm de profundidad) en diferentes momentos. La Figura 35 muestra la concentración de los diferentes elementos retenidos ( $C/Co < 1$ ) y/o liberados desde el suelo ( $C/Co > 1$ ).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES



**Figura 35. Concentración de EPT en muestras de solución de suelo colectadas a diferentes profundidades en la columna de suelo Tinajas durante el primer y tercer riego.**

Tomando en cuenta que en el primer riego a 15 cm y 0.05  $V_o$  la concentración de Mn que salió de la columna es similar a la aplicada, es posible la existencia de flujos preferenciales al inicio del riego (tal como se mencionó anteriormente), no obstante, a esa misma profundidad y 0.24  $V_o$  la concentración de Mn disminuye en el tiempo (es decir, queda retenido en el suelo) por lo que es probable que los flujos preferenciales dejaron de ocurrir debido a que el suelo de la columna comenzó a hidratarse con la solución aplicada.

Considerando la figura 35, se observa que el suelo tiene la capacidad de retener a varios de los EPT estudiados en diferentes profundidades. Los EPT retenidos por el suelo en las profundidades analizadas coinciden con los elementos retenidos en la base de la columna, principalmente: Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe y Zn, por su parte, el Mn se libera del suelo en todas las profundidades analizadas (con excepción de la profundidad de 10 cm) y el Pb lo hace a la profundidad de 5 cm y 0.78  $V_o$ . Estos resultados coinciden con la base de la columna, en la cual se determinaron relaciones  $C/Co$  mayores a 1 para Mn y Pb en varios de los lixiviados analizados.

En el primer riego se tienen muestras a 3, 5, 10 y 15 cm. A 3 cm y 0.38 volúmenes de poro el Al es el elemento que más se retiene (hasta en un 35%,  $C/Co=0.65$ ). Por su parte, a 3 cm y 0.57 volúmenes de poro el Fe se retiene hasta en un 45% ( $C/Co=0.55$ ). A 5 cm y 0.1 volúmenes de poro el Fe y el Al quedan retenidos en el suelo hasta en un 39% ( $C/Co=0.61$ ). A 5 cm y 0.78 volúmenes de poro el Al es nuevamente el elemento más retenido en un porcentaje de 36% ( $C/Co=0.64$ ). A 10 cm el elemento más retenido es el Fe en un porcentaje de 83% (a 0.13 volúmenes de poro) y 100% ( $C/Co=0$ ) a 0.22 volúmenes de poro. Finalmente, a 15 cm y 0.05 volúmenes de poro el Fe se retiene hasta en un 41% ( $C/Co=0.59$ ). A 15 cm y 0.24 volúmenes de poro el Fe es el más retenido hasta en un 87% ( $C/Co=0.13$ ).

Para el tercer riego se analizaron muestras de solución de suelo a 11 y 16 cm. En la muestra colectada a 11 cm y 0.20  $V_o$  el Fe es el elemento más retenido hasta en un 94% ( $C/Co=0.06$ ). Por su parte, a 16 cm y 0.71 volúmenes de poro la máxima retención es para el As con un  $C/Co$  igual a 0.39 (retención de 61%).

d) Concentración de aniones disueltos.

Para cada riego se realizó el análisis mediante cromatografía iónica de los aniones disueltos en las muestras colectadas en la base de la columna. Cabe destacar que el único anión detectado en los lixiviados colectados de todos los riegos en esta columna fue el sulfato, lo cual es entendible tomando en cuenta las altas concentraciones disueltas de este anión en la solución ácida ferrocuprífera (ver Tabla 20). Los resultados se presentan en la figura 36.

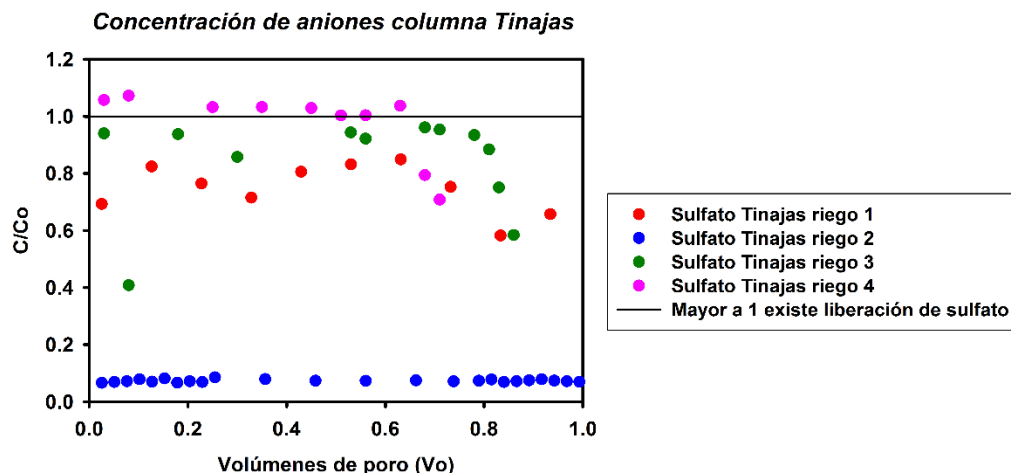


Figura 36. Concentración de sulfatos en los cuatro riegos de la columna de suelo Tinajas.

Tomando en cuenta que el contenido de sulfatos en la solución ácida ferrocuprífera es de 30021 mg/L (ver Tabla 20) es de esperarse que el sulfato sea el anión principal en la solución de los lixiviados colectados. Se observan sus altas concentraciones en los 3 riegos con la solución ácida ferrocuprífera. En el primer riego el sulfato presenta una retención igual a 32.14% del total añadido (tomando en cuenta balances de masa). Para el tercer riego, se retiene un 24.25% del sulfato presente en la solución ácida. Finalmente, en el cuarto riego, existe una relación C/Co de 1.1, lo que implica que se liberó sulfato desde el suelo en ese instante, sin embargo, comienza a retenerse después de 0.67 Vo, con una retención total igual a 27.69%. La concentración del sulfato en la solución de lixiviado disminuye considerablemente en el segundo riego con la solución de CaCl<sub>2</sub> (debido a que la concentración de sulfatos añadida en este riego es nula y además, el hecho de no existir sulfato soluble después de este riego implica la poca liberación del sulfato retenido en el primer riego), no obstante, sigue siendo el único anión disuelto detectado.

## 2. Columna de sedimento El Álamo

Ubicación: Lecho del arroyo Tinajas  
 Distancia al sitio del derrame: 14 Km  
 Altura de la columna: 21 cm  
 Volumen de poro: 2123 cm<sup>3</sup>  
 Número de riegos: 4.

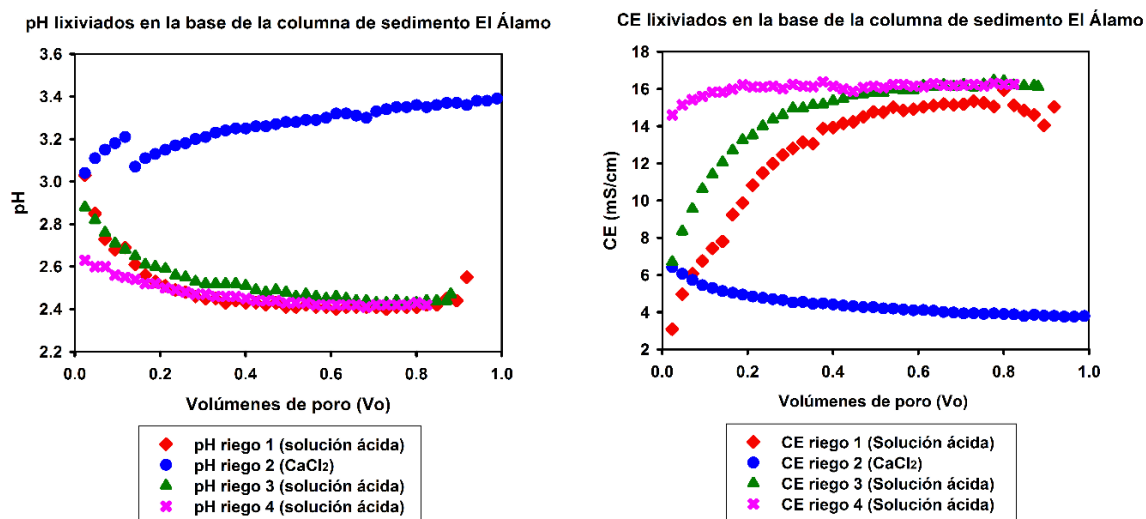


## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se realizaron 4 riegos en la columna de sedimento El Álamo, el primero de ellos con la solución ácida ferrocuprífera y el segundo con una solución de  $\text{CaCl}_2$ , con el propósito de simular la llegada de la solución ácida ferrocuprífera y posteriormente la crecida del arroyo Tinajas producida por precipitaciones pluviales. El tercer y cuarto riego se realizaron con la solución ácida para promover cambios físico-químicos en la columna por el paso de la solución ácida a través del sedimento. Los resultados se muestran a continuación.

### a) pH y Conductividad Eléctrica.

En la figura 37 se observan las modificaciones en el pH y la conductividad eléctrica en la base de la columna para cada riego. Se muestran las curvas de variación de los parámetros mencionados versus el volumen de poro.



**Figura 37. pH y CE en los lixiviados colectados en la base de la columna El Álamo en cada uno de los riegos.**

Durante el primer riego con la solución ácida el pH de la solución de lixiviado comenzó con un valor de 3.03, estabilizándose a un valor promedio de 2.5. Tomando en cuenta esto, se observa poca variación del pH de la solución ácida ferrocuprífera al entrar en contacto con este sedimento (el pH de la solución ácida ferrocuprífera es de 2.43). El pH durante el segundo riego con  $\text{CaCl}_2$  (0.005 M) comienza con un valor de 3 y llega a un máximo de 3.4 unidades a 1 Vo, tomando en cuenta que el pH de esta solución originalmente era de 6.44, se observa una disminución al pasar por el sedimento, sin embargo, conforme la solución se encuentra más tiempo en contacto con el sedimento se observa una tendencia al aumento del pH, contrario al primer riego. En lo que respecta al tercer y cuarto riego, el pH de la solución del lixiviado presenta un valor mínimo de 2.43 y 2.41 unidades, respectivamente, con una tendencia a disminuir ligeramente conforme el paso del tiempo del experimento, sin embargo, considerando que el pH de la solución agregada es de 2.43 unidades, se observa poco cambio en este parámetro durante la duración de ambos riegos. Tomando en cuenta que al igual que el suelo Tinajas, el sedimento El Álamo no presenta carbonatos (ver Tablas 17 y 18) es de esperarse la inexistente capacidad neutralizadora del pH en el sedimento al estar en contacto con la solución ácida ferrocuprífera.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La conductividad eléctrica de los primeros lixiviados en el riego 1 fue de alrededor de 3.09 mS/cm, llegando hasta un valor máximo de 15.95 mS/cm después de 0.80 volúmenes de poro, la CE aumentó conforme la solución ácida estaba en contacto con el sedimento, llegando a estabilizarse después de 0.5  $V_o$  a un valor promedio de 15 mS/cm. Considerando que el valor de la CE de la solución ácida es de 17.26 mS/cm, se observa una ligera disminución de este parámetro en la solución de lixiviado durante el tiempo del experimento. La conductividad eléctrica en el segundo riego varía desde un máximo de 6.42 mS/cm a 0.05  $V_o$  y un valor mínimo de 3.76 mS/cm a 0.97 volúmenes de poro, la CE original de la solución de  $CaCl_2$  fue de 4.4 mS/cm, por lo que se observa poco cambio de la misma durante su paso por el sedimento. Finalmente, la conductividad eléctrica alcanza valores máximos de 16.45 y 16.28 mS/cm en el tercer y cuarto riego, respectivamente, siendo menores al valor original de la solución ácida ferrocuprífera, por lo que probablemente algunos iones disueltos presentes en la solución original quedaron retenidos al pasar por la columna de sedimento.

### b) Flujo de lixiviados en la base de la columna

Con el propósito de determinar cambios estructurales y de porosidad en el sedimento El Álamo por medio del movimiento de los lixiviados infiltrados en cada riego, se monitoreó el flujo de los mismos. Los resultados se presentan en la figura 38, donde se observa la variación de la velocidad del lixiviado versus el volumen de poro.

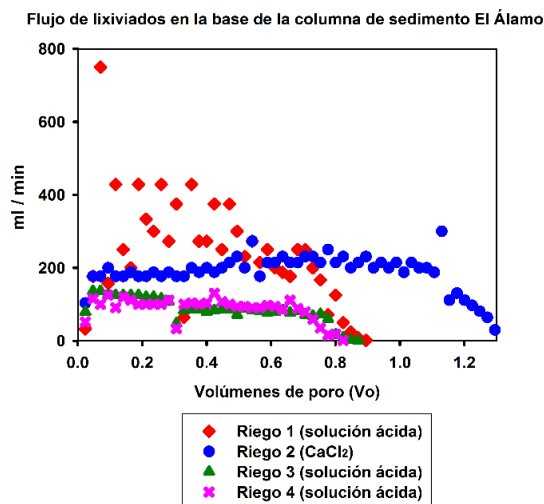


Figura 38. Flujo de lixiviados en la base de la columna de sedimento El Álamo. El valor de 0 en  $V_o$  corresponde al inicio de la salida de lixiviados en la base de la columna.

El flujo en la base de la columna de sedimento El Álamo durante el primer riego con la solución ácida ferrocuprífera ocurrió de forma heterogénea, disminuyendo con el tiempo desde un valor máximo de 750 ml/min a 0.07 volúmenes de poro hasta alcanzar el estado estacionario a 0.89 volúmenes de poro.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

Por su parte, en el segundo riego el flujo alcanza el estado estacionario a 1.32 volúmenes de poro, el flujo en el segundo riego es más lento y homogéneo en comparación al primer riego, lo que demuestra que la velocidad depende del fluido lixiviado.

Los flujos en la base de la columna para el tercer y cuarto riego son homogéneos y en general presentan un flujo más lento en comparación a los anteriores riegos, alcanzando el estado estacionario a 0.87 volúmenes de poro en el tercer riego y a 0.82 volúmenes de poro en el cuarto riego.

El primer riego presenta flujos rápidos y dada su acidez (valores de pH entre 2.5 y 3 unidades) se trata de un fluido erosivo que probablemente provoca cambios en el tamaño de los poros.

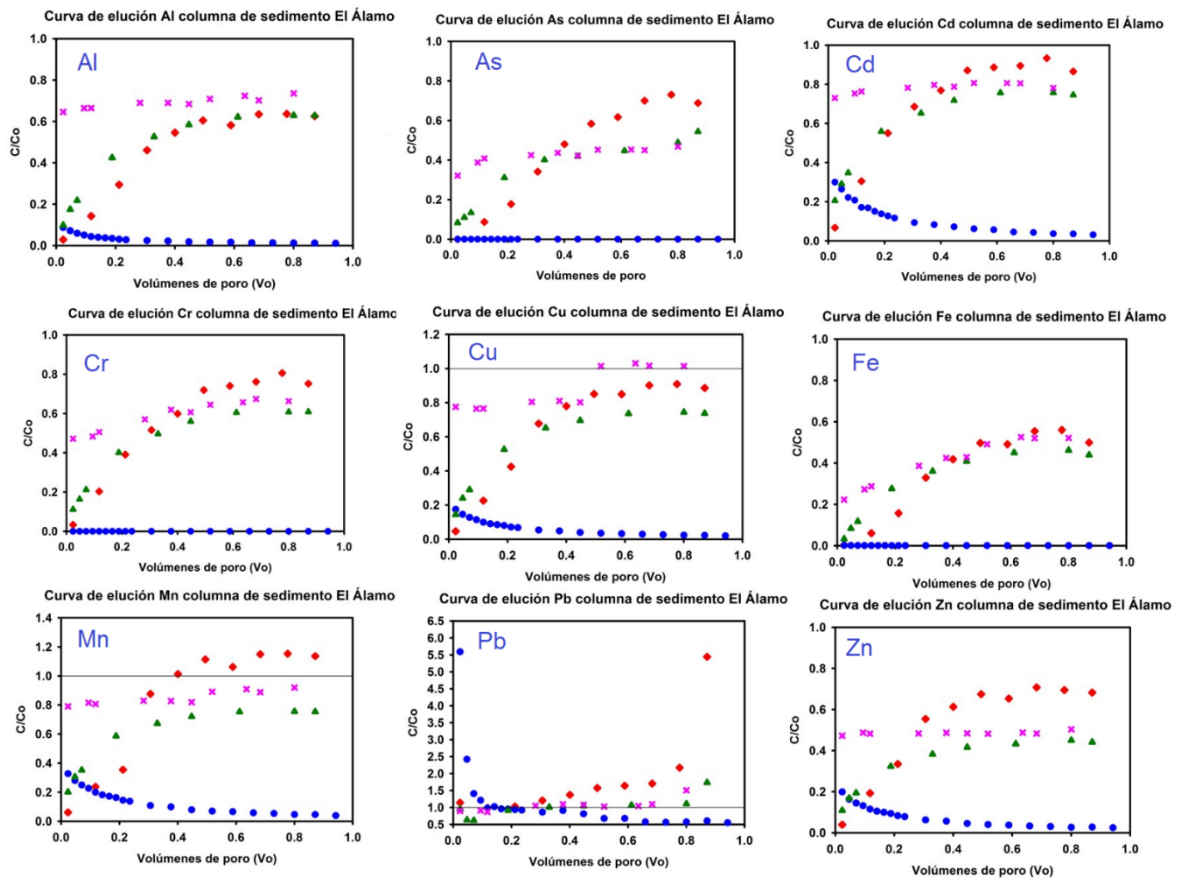
El flujo en el segundo riego con la solución de  $\text{CaCl}_2$  al ser menos erosivo en comparación al primer riego (en términos de acidez) permite que sea más lento y homogéneo, desplazándose a través del sedimento a velocidades prácticamente constantes. En los últimos dos riegos, al tratarse de la solución ácida ferrocuprífera y observar un comportamiento homogéneo (diferente al primer riego), hacen suponer que la estructura del sedimento fue modificada, probablemente por el reacomodo de las partículas del mismo, en donde quizá se desplazaron de la parte alta de la columna (en donde fueron erosionadas) a la parte baja de la misma (en donde se acumularon).

c) Curvas de elución de elementos potencialmente tóxicos en la base y a diferentes profundidades de la columna.

Con la intención de conocer el comportamiento de los EPT presentes en la solución ácida en contacto con el sedimento El Álamo se realizaron curvas de elución para cada uno de los elementos. Dichos gráficos muestran la variación de la concentración del elemento de interés (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn) de manera adimensional ( $C/C_0$ , concentración del elemento en el lixiviado respecto a la concentración del elemento en la solución aplicada) versus el volumen de poro. Los resultados se muestran en las figuras 39 y 40.

La figura 39 presenta las curvas de elución de los EPT retenidos ( $C/C_0 < 1$ ) y/o liberados ( $C/C_0 > 1$ ) en la base de la columna de sedimento El Álamo. En dicha figura se puede observar que todos los EPT presentan una misma tendencia en los riegos con la solución ácida ferrocuprífera, el cual se asocia al aumento de la relación  $C/C_0$  conforme al aumento de los volúmenes de poro, es decir, al inicio de los riegos no se determinaron concentraciones solubles de los diferentes EPT en los lixiviados colectados debido probablemente a que en esos tiempos aún no llegaba totalmente la solución ácida a la base de la columna de sedimento. Con el paso del tiempo del experimento (y la llegada de la solución ácida ferrocuprífera a la base de la columna) aumentaron las concentraciones en disolución, llegando a un valor máximo de  $C/C_0$  para cada EPT a partir del cual se observa una tendencia constante o con ligera disminución. Debido a ello, los últimos lixiviados colectados en cada riego implican la máxima interacción (máximo tiempo de contacto) entre la solución ácida y el sedimento. La descripción a detalle de cada curva se presenta en las siguientes páginas.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES



**Figura 39.** Curvas de elución de EPT en la base de la columna de sedimento El Álamo.  $C/Co$  concentración adimensional del elemento,  $V_o$  volúmenes de poro; puntos rojos: primer riego con la solución ácida ferrocuprífera; puntos azules corresponden al segundo riego en el cual se aplicó  $CaCl_2$  0.005M; puntos verdes corresponden al tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera; puntos rosas corresponden al cuarto riego con la solución ácida ferrocuprífera. Mayor a 1 en  $C/Co$  implica liberación del elemento desde el sedimento.

Aluminio (Al): Se observa que el Al inicia con una relación  $C/Co$  igual a 0.03 en un volumen de poro de 0.02 durante el primer riego, llegando a un valor de  $C/Co$  máximo de 0.64 a 0.78  $V_o$ . Tomando en cuenta los balances de masa, se calculó una retención de Al igual a 67.77% durante el primer riego. Con el cálculo del área bajo la curva se determinó un valor de 0.39, lo que implica una retención de 61% del Al durante el primer riego. En lo que respecta al segundo riego, se calculó una liberación de hasta 2.38% del Al retenido en el primer riego. Se observa que en todos los volúmenes de poro analizados se presentan valores  $C/Co$  iguales o cercanos a 0, lo que implica que durante este riego no se lixivió Al, por lo que se infiere que todo lo retenido durante el primer riego permanece de esa forma tras el paso de la solución de  $CaCl_2$ . La retención de Al para el tercer riego es de 70.71% (tomando en cuenta balances de masa) y de 57% tomando en cuenta el área bajo la curva. Por su parte, en el cuarto riego se determinó una retención de Al igual a 48.19% mediante balances de masa y de 47% con la determinación del área bajo la curva. En ningún lixiviado se determinó un valor  $C/Co$  mayor o igual a 1 para ningún riego, lo que implica que en ningún tiempo existió liberación de Al desde el sedimento.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Arsénico (As): Durante el primer riego, el primer lixiviado colectado a 0.02 Vo presentó una relación C/Co igual a 0. La máxima relación C/Co se dio a 0.78 Vo, con un valor de 0.73. Tomando en cuenta los balances de masa para As durante el primer riego el porcentaje retenido es de 68.82%. Por su parte, el área bajo la curva de As para este riego es de 0.38, lo que implica una retención de 62%. Tomando en cuenta la retención de As durante el primer riego (igual a 68.82% usando balances de masa), no se determinó liberación del mismo después del segundo riego, lo que puede implicar que tras el paso de la solución de  $\text{CaCl}_2$  la lixiviación de As es nula. En lo que respecta al tercer y cuarto riego, se determinaron porcentajes de retención de As iguales a 77.96% y 68.32%, respectivamente, utilizando balances de masa. El área bajo la curva para el tercer riego es de 0.32, lo que implica una retención de 68% después del paso de la solución ácida ferrocuprífera. Por su parte, en el cuarto riego, el área bajo la curva es de 0.33, lo que implicaría una retención de 67% del As añadido. En ningún volumen de poro se observa un valor mayor a 1 en la relación C/Co para ningún riego, lo que puede implicar que la concentración lixiviada de As nunca fue mayor a la añadida, por lo que es de esperarse que no exista liberación del mismo desde el sedimento.

Cadmio (Cd): Considerando los balances de masa, se calculó una retención de Cd igual a 51.70% durante el primer riego. Por su parte, el área bajo la curva es igual a 0.59 durante el primer riego, por lo que la retención de Cd es de 41%. En lo que respecta al segundo riego, se calculó una liberación de hasta 11.63% del Cd retenido en el primer riego (considerando el valor de 51.70%). La retención de Cd calculada con el uso de las ecuaciones 2-6 después del tercer y cuarto riego es igual a 62.24% y 41.40%, respectivamente. Por su parte, con el uso de la ecuación 8 (área bajo la curva) se determinó una retención de Cd igual a 45% para el tercer riego y de 39% para el cuarto riego. En ningún volumen de poro se presenta un valor mayor a 1 en la relación C/Co para ningún riego, por lo que es posible decir que no existió liberación de Cd desde el sedimento tras el paso de la solución ácida ferrocuprífera.

Cromo (Cr): En lo que respecta al Cr, el primer lixiviado colectado a 0.02 Vo presentó un valor C/Co igual a 0.03. El máximo valor de C/Co durante el primer riego fue de 0.81 a 0.78Vo. El porcentaje retenido de Cr después del primer riego fue de 60.94% tomando en cuenta balances de masa y de 52% tomando en cuenta el área bajo la curva (valor de C/Co igual a 0.48). Para el segundo riego, en ninguno de los lixiviados colectados se determinó concentración soluble de Cr, por lo que aparentemente no existe liberación del mismo después del paso de la solución que simula las precipitaciones ocurridas en el arroyo Tinajas, lo cual puede implicar que el Cr presente y/o retenido en el suelo antes de este riego es estable, por lo que no se libera del mismo tras el paso de la solución de  $\text{CaCl}_2$ . Finalmente, en el tercer riego se determinó un porcentaje de retención de Cr igual a 71.77% con el uso de las ecuaciones 2-6 y de 58% con el cálculo del área bajo la curva (ecuación 8). Por su parte, después del cuarto riego, se calculó una retención de Cr igual a 55.79% y 54%, con los balances de masa y el área bajo la curva, respectivamente. En ninguno de los riegos la relación C/Co es mayor a 1, lo que implica que nunca salió más Cr del que se agregó en la solución ácida ferrocuprífera.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cobre (Cu): El Cu inicia con una relación C/Co igual a 0.05 en un volumen de poro de 0.02 durante el primer riego, llegando a un valor máximo de C/Co igual a 0.91 a 0.78 Vo. Considerando el balance de masas, se calculó una retención de Cu igual a 53.65% durante el primer riego. Por su parte, mediante el uso de la ecuación 8 se determinó una retención de 43% de Cu durante el primer riego. En lo que respecta al segundo riego, se calculó una liberación de hasta 6.44% del Cu retenido en el primer riego. Se observa que en todos los volúmenes de poro analizados se presentan valores C/Co iguales a 0, lo que implica que durante este riego no se lixivió Cu, por lo que se infiere que prácticamente todo lo retenido durante el primer riego permanece de esa forma tras el paso de la solución de  $\text{CaCl}_2$ . La retención de Cu para el tercer riego es de 64.27% (mediante balances de masa) y de 47% (tras el cálculo del área bajo la curva). Para el cuarto riego la retención es de 34.02% (con el uso de balances de masa) y de 32% mediante el uso de la ecuación 8. En los primeros 3 riegos en ningún lixiviado se determinó un valor C/Co mayor o igual a 1 para el Cu, sin embargo, en algunos lixiviados después de 0.5 Vo para el cuarto riego se determinaron relaciones C/Co mayores a 1 para Cu, lo que implica que en ciertos momentos la concentración lixiviada en la base de la columna fue mayor a la añadida, lo que implicaría una posible liberación de este elemento desde el sedimento.

Hierro (Fe): El primer lixiviado colectado durante el primer riego a 0.02 Vo presentó una relación C/Co igual a 0 para el Fe. La máxima relación C/Co se dio a 0.78 Vo, con un valor de 0.56. Tomando en cuenta los balances de masa para Fe de todos los lixiviados colectados, es posible decir que la retención del mismo es de 74.73%. Por su parte, se determinó una retención de 69% considerando el área bajo la curva. Tomando en cuenta la retención de Fe durante el primer riego (igual a 74.73% con el balance de masa), se determinó una liberación de 0.02% después del segundo riego, en el cual se observa que prácticamente todos los lixiviados colectados presentan una relación C/Co de Fe igual a 0, es decir, la concentración lixiviada de Fe después de este riego es nula. En lo que respecta al tercer y cuarto riego, se determinaron mediante balances de masa porcentajes de retención de Fe iguales a 80.27% y 69.39%, respectivamente, y porcentajes mediante el cálculo del área bajo la curva iguales a 70% (tercer riego) y 68% para el cuarto riego. En ningún riego se observan valores mayores a 1 en la relación C/Co, lo que puede implicar que la concentración lixiviada de Fe nunca fue mayor a la añadida, por lo que es de esperarse que no exista liberación del mismo desde el sedimento.

Manganeso (Mn): En lo que respecta al Mn, el primer lixiviado colectado a 0.02 Vo presentó un valor C/Co igual a 0.06. La máxima relación C/Co se dio a 0.78 Vo, con un valor de 1.15. El porcentaje retenido calculado para el Mn después del primer riego es de 42.29% con el uso de balances de masa y de 29% utilizando el área bajo la curva. Sin embargo, se observa en la figura 39 que durante el primer riego se presentaron algunos valores de C/Co mayores a 1 para el Mn, lo que implica que en diferentes momentos la concentración de Mn en los lixiviados colectados fue mayor a la añadida, por lo cual es posible suponer la liberación del mismo desde el sedimento en diferentes momentos. Considerando la retención de Mn calculada con el balance de masas durante el primer riego (igual a 42.29 %), después del segundo riego se determinó una liberación de hasta 16.18% del Mn retenido durante el primer riego. Finalmente, en el tercer riego se determinó un porcentaje de retención de Mn igual a 61.74% mediante balances de masa y de 45% mediante el cálculo del área bajo la curva. Por su parte, después del cuarto riego, se calculó una retención de Mn igual a 36.27%

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

(con balances de masa, ecuaciones 2-6) y de 34% (mediante el uso de la ecuación 8).

Plomo (Pb): En lo que respecta al primer riego, no se determinó retención de Pb ni con el uso de balances de masa ni con el cálculo del área bajo la curva. Se observa que prácticamente todos los lixiviados colectados presentan valores de C/Co mayores a 1, lo que implica que las concentraciones de Pb en la base de la columna son mayores a las presentes en la solución ácida ferrocuprífera, lo que implicaría la liberación de Pb desde el sedimento. Para el segundo riego se observa que en varios volúmenes de poro se tienen concentraciones de Pb mayores a las encontradas en la solución ácida ferrocuprífera, lo que implica que sin importar la solución lixiviada el Pb se libera desde el sedimento. Contrario a lo observado en el primer riego, se determinó la retención de este elemento después del tercer y cuarto riego. Para el tercer riego se determinó un porcentaje de retención de Pb igual a 31.94% mediante balances de masa y de 15% mediante el cálculo del área bajo la curva. Por su parte, después del cuarto riego, se calculó una retención de Pb igual a 20.79% con el uso de balances de masa (ecuaciones 2-6) y de 19% mediante el cálculo del área bajo la curva (ecuación 8).

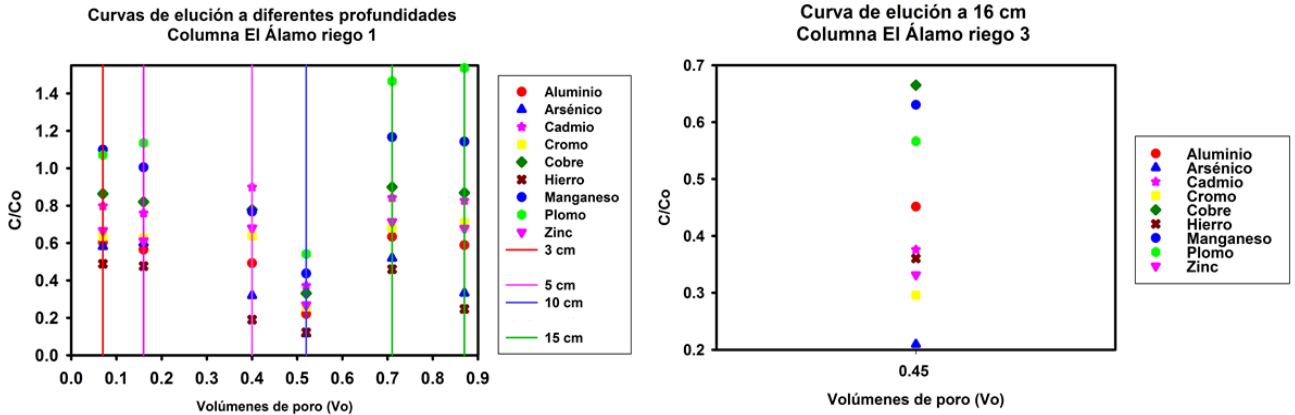
Zinc (Zn): Para el primer riego y tomando en cuenta la concentración de Zn de todos los lixiviados colectados y el balance de masa realizado para este elemento se determinó una retención de 63.59%. Por su parte, se calculó una retención igual a 55% con el uso de la ecuación 8. Considerando la retención de Zn durante el primer riego (igual a 63.59% con el uso de las ecuaciones 2-6), se determinó una liberación de hasta 6.29% después del segundo riego, en el cual se observa que la mayoría de los lixiviados colectados presentan una relación C/Co cercana a 0, es decir, la concentración lixiviada de Zn después de este riego es baja, por lo que se infiere que lo retenido durante el primer riego permanece de esa forma tras el paso de la solución de  $\text{CaCl}_2$ . En lo que respecta al tercer y cuarto riego, se determinaron porcentajes de retención de Zn mediante balances de masa iguales a 78.12% y 63.60%, respectivamente, y de 69% y 63% con el cálculo del área bajo la curva. En ningún riego se observan valores mayores a 1 en la relación C/Co, lo que puede implicar que la concentración lixiviada de Zn nunca fue mayor a la añadida, por lo que es de esperarse que no existió liberación del mismo desde el sedimento.

Al igual que el suelo Tinajas, en este sedimento se observan condiciones para la retención de los diferentes EPT presentes en la solución ácida ferrocuprífera. Dicha capacidad de retención puede ser explicada por su mineralogía (el PZC de este sedimento en la superficie es de 2.68 como se ve en la figura 31, lo cual posibilitaría que por arriba de este valor los cationes metálicos sean retenidos vía sorción probablemente por minerales arcillosos que se pueden encontrar a lo largo de todo el sedimento) ya que su baja concentración en carbono orgánico y la acidez de la solución de los lixiviados (debido a la ausencia de carbonatos) no explicarían su capacidad para retenerlos.

La forma de las curvas de elución y los cálculos de la retención de los diferentes EPT mediante balances de masa y el cálculo del área bajo la curva, permiten decir que la capacidad de retención de EPT disminuye en el cuarto riego en relación a los previos riegos con la solución ácida ferrocuprífera.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Durante el experimento, se colectaron muestras de la solución del sedimento a lo largo de la columna en el primer y tercer riego (a 3, 5, 10, 15 y 16 cm de profundidad) en diferentes momentos. La Figura 40 muestra la concentración de los diferentes elementos retenidos ( $C/Co < 1$ ) y/o liberados desde el sedimento ( $C/Co > 1$ ).



**Figura 40. Concentración de EPT en muestras de solución de sedimento colectadas a diferentes profundidades en la columna de sedimento El Álamo durante el primer y tercer riego.**

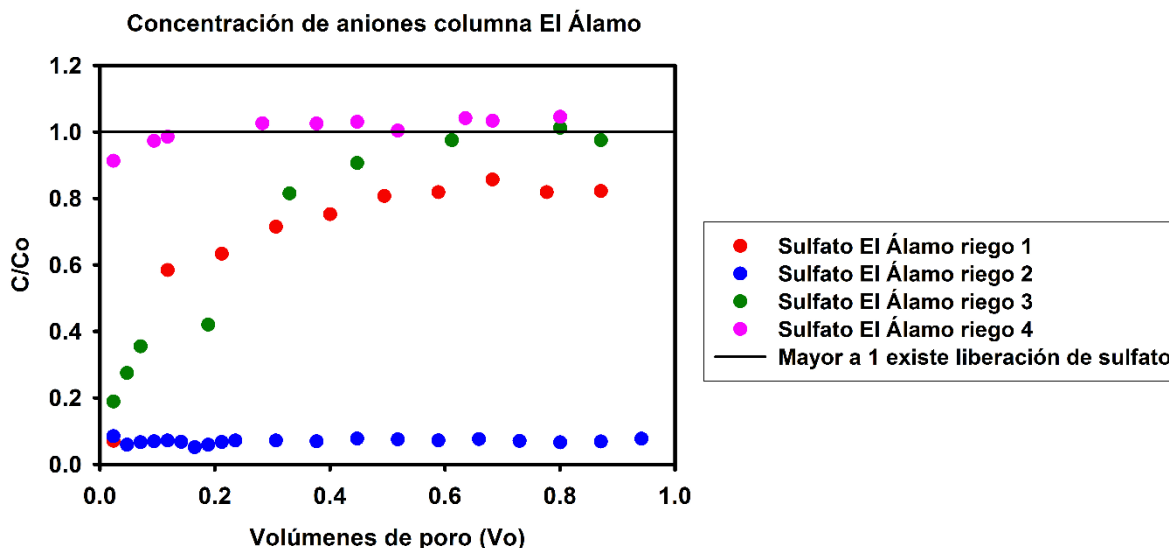
Los EPT retenidos por el sedimento en las profundidades analizadas son los mismos que fueron retenidos en la base de la columna, principalmente: Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe y Zn. Por su parte, los EPT liberados en ciertas profundidades ( $C/Co$  mayor a 1) son Mn y Pb (los cuales también presentaron valores de  $C/Co$  mayores a 1 en algunos lixiviados colectados en la base de la columna). Se observa que el sedimento presenta la capacidad de retener a los EPT presentes en la solución ácida ferrocuprífera a diferentes profundidades.

En el primer riego se tienen muestras a 3, 5, 10 y 15 cm. A 3 cm y 0.07 volúmenes de poro el Fe es el elemento que más se retiene hasta en un 51% ( $C/Co$  igual a 0.49). Por su parte, a 5 cm y 0.16 volúmenes de poro el Fe se retiene hasta en un 52%, siendo el elemento más retenido. A 5 cm y 0.4 Vo el Fe es nuevamente el EPT más retenido en el sedimento hasta en un 81%. A 10 cm y 0.52 volúmenes de poro el elemento más retenido es de nueva cuenta el Fe, en un porcentaje de 88%. Finalmente, a 15 cm y 0.71 volúmenes de poro el Fe se retiene hasta en un 54% ( $C/Co = 0.46$ ). A 15 cm y 0.87 volúmenes de poro el Fe es el más retenido hasta en un 75% ( $C/Co = 0.25$ ).

En el tercer riego se logró colectar únicamente una muestra de la solución del sedimento a una profundidad de 16 cm y un volumen de poro de 0.45. En dicha muestra se observa que el As es el elemento más retenido con una relación  $C/Co$  igual a 0.21, es decir, se retiene un máximo de 79% del arsénico contenido en la solución ácida ferrocuprífera. En esta muestra colectada, todos los elementos analizados fueron retenidos por el sedimento, teniendo el siguiente orden de retención: As > Cr > Zn > Fe > Cd > Al > Pb > Mn > Cu.



d) Concentración de aniones disueltos.



**Figura 41. Concentración de sulfatos en los cuatro riegos de la columna de sedimento El Álamo.**

Al igual que el suelo Tinajas, el sulfato es el único anión detectado en la solución de los lixiviados en la base de la columna. En los tres riegos con la solución ácida ferrocuprífera (riego 1, 3 y 4) se observa una tendencia al aumento de la relación C/Co, es decir, conforme aumenta el tiempo de interacción entre la solución ácida y el sedimento se tienen mayores concentraciones disueltas de sulfato. Los cálculos del porcentaje retenido de sulfato indican un porcentaje de 51.02% en el primer riego y de 56.49% en el tercer riego, esto puede relacionarse a la posible precipitación de minerales sulfatados. Por su parte, en el cuarto riego la relación C/Co durante la mayor parte del experimento fue cercana o mayor a 1, esto puede implicar la liberación del sulfato desde el sedimento en algunos lixiviados analizados. En lo que respecta al segundo riego, las relaciones C/Co son cercanas a 0, lo que implica que las concentraciones de sulfato en los lixiviados colectados en este riego son menores en comparación a los riegos con la solución ácida ferrocuprífera, lo que implica que al estar en contacto la solución de  $\text{CaCl}_2$  con el sedimento no se liberan los sulfatos retenidos en el primer riego.

### 3. Columna de sedimento Chilolo

Ubicación: lecho del río Bacanuchi, cercano a la intersección del arroyo Tinajas y el río Bacanuchi.

Distancia al sitio del derrame: 24.5 Km

Altura de la columna: 22.3 cm

Volumen de poro: 1765  $\text{cm}^3$

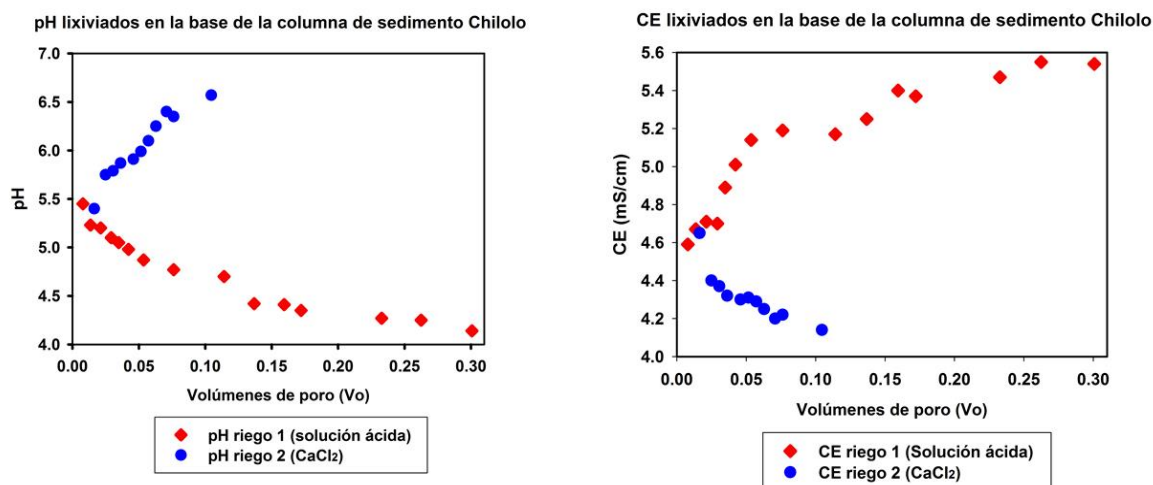
Número de riegos: 2

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A diferencia de las columnas anteriores, en la columna de sedimento Chilolo se realizaron únicamente 2 riegos, el primero de ellos con la solución ácida ferrocuprífera y el segundo con una solución de  $\text{CaCl}_2$ , con el propósito de simular la llegada del derrame de la solución ácida ferrocuprífera y posteriormente la crecida del arroyo Tinajas producida por precipitaciones pluviales. Los resultados de los riegos en esta columna se muestran en las siguientes páginas.

### a) pH y Conductividad Eléctrica.

Se muestran en la figura 42 las modificaciones en el pH y la conductividad eléctrica en la base de la columna Chilolo para cada riego.



**Figura 42. pH y CE en los lixiviados colectados en la base de la columna de sedimento Chilolo en cada uno de los riegos.**

A diferencia de los riegos en la columna de suelo Tinajas y la columna de sedimento El Álamo, en la columna de sedimento Chilolo no se logró rescatar lixiviados a más de 0.30 volúmenes de poro para el primer riego y 0.10 volúmenes de poro para el segundo, debido a fugas laterales en la columna, por lo mismo, la interacción entre las soluciones infiltradas y el sedimento fue menor en comparación a las columnas anteriores. Debido a esto, la acidez en la columna Chilolo durante el primer riego se mantuvo por encima del pH de la solución ácida ferrocuprífera (pH 2.43), teniendo un valor mínimo igual a 4.1 a 0.3 Vo, esto puede deberse a dos factores, el primero de ellos relacionado a las fugas existentes y la poca interacción de la solución ácida con el sedimento que provocaron que el pH de la solución de los lixiviados en la base de la columna fuera mayor al pH original. Por otro parte, el contenido de carbonatos es mínimo en esta columna (ver tabla 17 y 18), sin embargo, no se descartan reacciones de los mismos al interaccionar con la solución ácida, facilitando que la acidez de la solución haya disminuido llegando a valores máximos de pH de 5.5. En el segundo riego con la solución de  $\text{CaCl}_2$ , se observa una tendencia al aumento del pH conforme interacciona la solución con el sedimento, variando de 5.4 a un máximo de 6.57 unidades a 0.10 volúmenes de poro. Considerando que el pH de la solución agregada en el segundo riego es igual a 6.44 se observa que después de 0.10 volúmenes de poro el pH se mantiene sin cambios importantes en la base de la columna.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En lo que respecta a la conductividad eléctrica, se observa una tendencia a su aumento en el primer riego y a su disminución en el segundo. Para el primer riego la CE comienza con un valor de 4.6 mS/cm hasta un máximo de 5.57 mS/cm a 0.30  $V_o$ . Considerando que la conductividad eléctrica de la solución ácida ferrocuprífera agregada en la columna durante el primer riego es de 17.26 mS/cm se observa una disminución importante en este parámetro en los lixiviados colectados en la base de la columna, lo cual puede estar relacionado a las fugas laterales que ocasionaron la pérdida de gran parte de la solución ácida que nunca alcanzó la parte profunda de la columna. No obstante, a 0.30 volúmenes de poro la solución ácida que logró infiltrarse a través del sedimento y salió por la base de la columna presenta valores de CE muy por debajo del valor original, por lo cual no se descarta que muchos de los iones disueltos en la solución hayan sido retenidos a lo largo de la columna provocando una disminución de este parámetro en los lixiviados colectados en la base de la misma.

Por otro lado, en el segundo riego solo se colectaron lixiviados hasta 0.10 volúmenes de poro, producto de nuevas fugas laterales durante el experimento. Los primeros lixiviados presentaron valores de CE de 4.65 mS/cm alcanzando un mínimo de 4.19 mS/cm a 0.10  $V_o$ , dado que la CE de la solución de  $\text{CaCl}_2$  fue de 4.4 mS/cm se observan pocos cambios en este parámetro durante el segundo riego.

b) Flujo de lixiviados en la base de la columna.

Con la intención de determinar cambios estructurales y de porosidad en la columna Chilolo, se monitoreó el flujo de los lixiviados a través del sedimento en los dos riegos realizados. Los resultados se observan en la figura 43 donde se presenta la variación de la velocidad del lixiviado versus el volumen de poro.

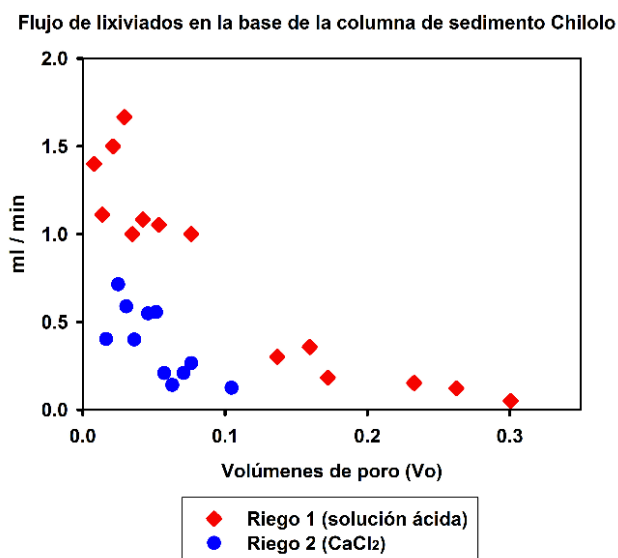


Figura 43. Flujo de lixiviados en la base de la columna de sedimento Chilolo. El valor de 0 en  $V_o$  corresponde al inicio de la salida de lixiviados en la base de la columna.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A diferencia de lo esperado, al tratarse de un sedimento muy poroso, las velocidades de los lixiviados son muy bajas, alcanzando valores máximos de 1.7 ml/min en el primer riego y 0.71 ml/min en el segundo riego. Si se consideran las fugas laterales existentes en la columna durante la realización de ambos riegos en diferentes profundidades, los primeros lixiviados colectados en la base presentaron bajas velocidades producto de las mismas fugas. Los cambios estructurales y de porosidad en este sedimento deben ser mínimos, debido a la poca interacción entre la solución ácida ferrocuprífera y el sedimento, de igual forma el pH en la solución de los lixiviados durante el primer riego nunca fue menor a 4 unidades, por lo que el poder erosivo de la solución es menor que en las columnas anteriores (en términos de acidez).

c) Curvas de elución de elementos potencialmente tóxicos en la base y a diferentes profundidades de la columna.

Con la intención de conocer el comportamiento de los EPT presentes en la solución ácida en contacto con el sedimento Chilolo, se realizaron curvas de elución para cada uno de los elementos de interés. Los resultados se muestran en las figuras 44 y 45.

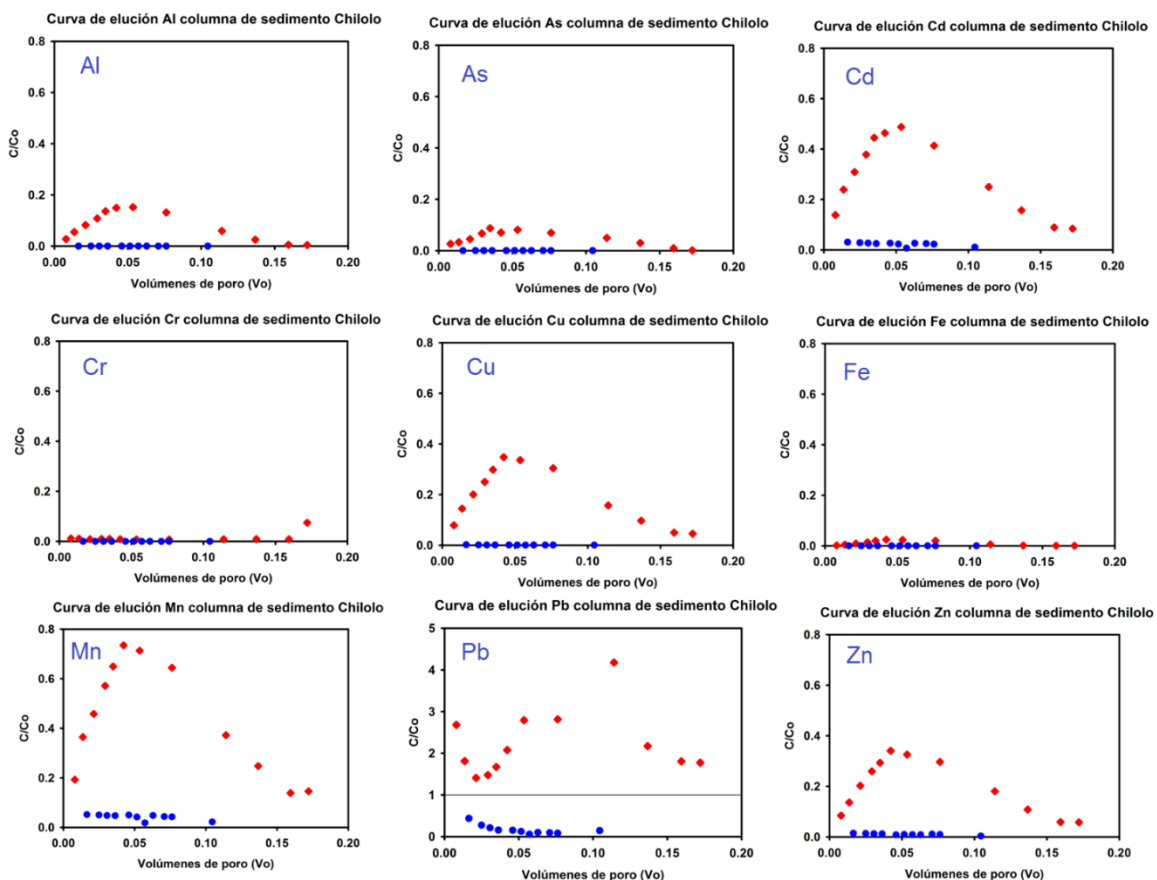


Figura 44. Curvas de elución de EPT en la base de la columna de sedimento Chilolo.  $C/C_o$  concentración adimensional del elemento,  $V_o$ , volúmenes de poro; puntos rojos: primer riego con la solución ácida ferrocuprífera; puntos azules: corresponden al segundo riego en el cual se aplicó  $\text{CaCl}_2$  0.005M. Mayor a 1 en  $C/C_o$  implica la liberación del elemento desde el sedimento.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La figura 44 presenta las curvas de elución de los EPT retenidos ( $C/Co < 1$ ) y/o liberados ( $C/Co > 1$ ) en la base de la columna de sedimento. Las curvas de elución de los EPT analizados durante el primer riego presentan similitudes en su comportamiento. Con excepción del Pb, todas las curvas inician con valores de  $C/Co$  cercanos o iguales a cero en el primer riego, lo que puede indicar que los primeros lixiviados colectados presentaron poca interacción entre la solución ácida y el sedimento, ya que prácticamente no existen concentraciones disueltas de ningún EPT. Conforme pasa el tiempo del experimento, se observan valores máximos de  $C/Co$  para cada EPT en diferentes volúmenes de poro a partir de los cuales la relación  $C/Co$  disminuye hasta valores cercanos a 0. Los valores máximos de  $C/Co$  para cada EPT analizado se presentan a continuación, junto con el porcentaje retenido para cada elemento tomando en cuenta los balances de masa (ecuaciones 2-6) y el cálculo del área bajo la curva (ecuación 8).

Aluminio (Al):  $C/Co$  máximo de 0.15 a 0.054 volúmenes de poro. La retención para Al es igual a 94.69% usando balances de masa y de 98.7% tomando en cuenta el área bajo la curva.

Arsénico (As):  $C/Co$  máximo de 0.09 a 0.035 volúmenes de poro. La retención para As es igual a 96.76% usando balances de masa y de 99.2% tomando en cuenta el área bajo la curva.

Cadmio (Cd):  $C/Co$  máximo de 0.49 a 0.054 volúmenes de poro. La retención para Cd es igual a 79.35% considerando las ecuaciones 2-6 y de 84.7% considerando la ecuación 8.

Cromo (Cr):  $C/Co$  máximo de 0.07 a 0.17 volúmenes de poro. La retención para Cr es igual a 98.82% tomando en cuenta los balances de masa y de 99.6% usando el área bajo la curva.

Cobre (Cu):  $C/Co$  máximo de 0.35 a 0.042 volúmenes de poro. La retención para Cu es igual a 86.74% y 90.6% tomando en cuenta el balance de masas y el área bajo la curva, respectivamente.

Hierro (Fe):  $C/Co$  máximo de 0.025 a 0.042 volúmenes de poro. La retención para Fe es igual a 99.30% tomando en cuenta los balances de masa y de 99.8% considerando la ecuación 8.

Manganeso (Mn):  $C/Co$  máximo de 0.74 a 0.042 volúmenes de poro. La retención para Mn es igual a 68.71% usando balances de masa y de 77% tomando en cuenta el área bajo la curva.

Zinc (Zn).  $C/Co$  máximo de 0.34 a 0.042 volúmenes de poro. La retención para Zn es igual a 86.05% considerando las ecuaciones 2-6 y de 90.7% considerando la ecuación 8.

Se observa que en la mayoría de los elementos a partir de 0.042-0.054 volúmenes de poro la retención aumenta (se presenta una disminución de la relación  $C/Co$  en las gráficas), tendiendo a ser del 100% a los 0.20 volúmenes de poro (sin cambios hasta 0.3 Vo) para el Al, As, Cu y Fe. En lo que corresponde al Pb, existe liberación del mismo a partir del sedimento, ya que en todos los volúmenes de poro la relación de su concentración en los lixiviados colectados versus su concentración en la solución ácida ferrocuprífera ( $C/Co$ ) es

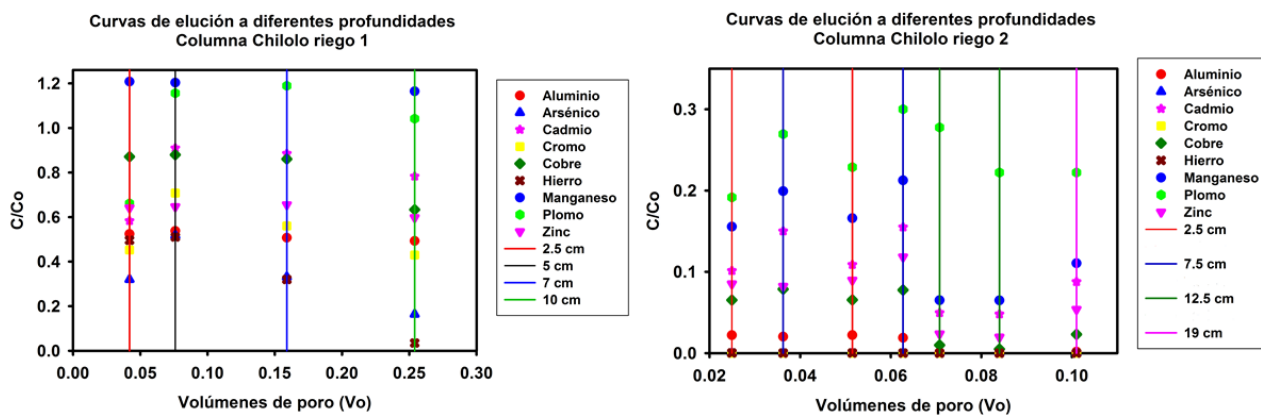
## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

mayor a 1, llegando hasta 4.18 a 0.11  $V_o$ , es decir, 4.18 veces mayor en relación a su concentración inicial en la solución ácida. El balance de masa y el cálculo del área bajo la curva indican que el Pb se libera desde el sedimento, ya que las concentraciones solubles de este elemento en la base de la columna son mayores a las presentes en la solución ácida ferrocuprífera.

Para el segundo riego, las curvas de elución inician con concentraciones similares a las concentraciones obtenidas en los últimos lixiviados del primer riego. Se observa además que esta concentración se mantiene constante en todos los lixiviados colectados en el segundo riego, teniendo relaciones C/Co de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn y Zn de cero o cercanas a cero, lo que implica que no se tienen concentraciones solubles de ninguno de ellos en los lixiviados colectados en todos los volúmenes de poro, es decir, todo lo que fue retenido después del primer riego se encuentra estable después de su interacción con la solución de  $CaCl_2$  y no se libera desde el sedimento.

Cabe destacar que la máxima acidez en el sedimento después del primer riego fue de 4.1 unidades, siendo este valor 1.6 unidades mayor en relación a los primeros lixiviados de las columnas Tinajas y El Álamo, lo que implicaría que los EPT son menos solubles y pueden ser precipitados y/o retenidos en el sedimento en mayor proporción que las anteriores columnas. Al igual que en el suelo Tinajas y el sedimento El Álamo, en esta columna debe jugar un papel importante la mineralogía del sedimento en la retención de los EPT disueltos en la solución ácida ferrocuprífera que sí logró infiltrarse en la columna y no se perdió en las fugas laterales.

Durante el experimento, se colectaron muestras de agua de poro a lo largo de la columna (a 2.5, 5, 7 y 10 cm de profundidad en el primer riego y 2.5, 7.5, 12.5 y 19 cm en el segundo riego) en diferentes momentos. La Figura 45 muestra la concentración de los diferentes elementos retenidos y/o liberados desde el sedimento en los dos riegos.



**Figura 45. Concentración de EPT en muestras de solución de sedimento colectadas a diferentes profundidades en la columna de sedimento Chilolo en los dos riegos realizados.**

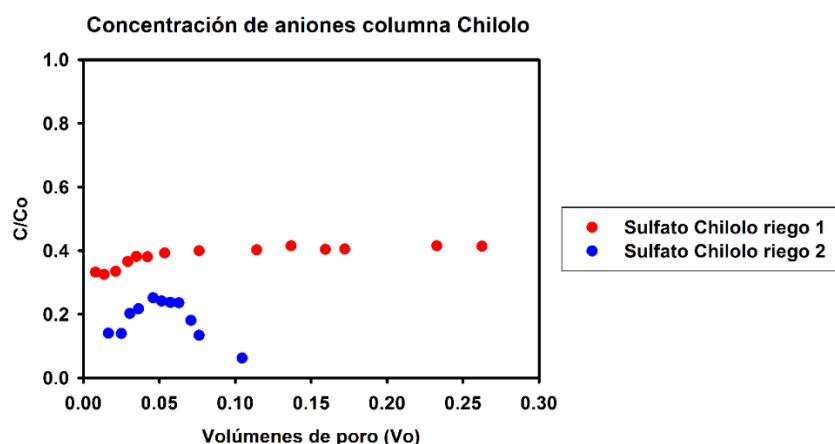
En el primer riego se colectó una muestra a 2.5 cm y 0.04  $V_o$ , en la cual se encuentran retenidos todos los elementos analizados con la excepción de Mn, el cual presenta una relación C/Co de 1.2. A esta profundidad el elemento más retenido es As, con una retención máxima de 68%. Por su parte, a 5cm y 0.07  $V_o$  se liberan Pb y Mn, siendo el Fe y As los

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

más retenidos en un porcentaje de hasta 49 y 45%, respectivamente. A 7 cm y 0.16  $V_o$  nuevamente el Fe y As son los EPT más retenidos, en un porcentaje de 69 y 65%. Finalmente, a 10 cm y 0.26  $V_o$ , el Fe se retiene hasta en un 97%. Se observa que a medida que el frente de humedad avanza en profundidad la retención de Fe aumenta.

En el segundo riego, se tienen muestras de agua de poro a 2.5 cm (a 0.027 y 0.051 volúmenes de poro), a 7.5 cm (0.035 y 0.062 volúmenes de poro), a 12.5 cm (0.07 y 0.082  $V_o$ ) y finalmente a 19 cm de profundidad y 0.10 volúmenes de poro. En todas las profundidades se tiene una retención del 100% de Fe, Cr y As, el resto de los elementos presentan una relación C/Co menor a 0.3 en todas las profundidades. Estos resultados sugieren que el sedimento Chilolo presenta condiciones para retener a los EPT disueltos en la solución ácida ferrocuprífera en diferentes profundidades y tras el paso de la solución de  $CaCl_2$ , dichos EPT permanecen retenidos.

d) Concentración de aniones disueltos.



**Figura 46. Concentración de sulfatos en los dos riegos de la columna de sedimento Chilolo.**

El sulfato es el único anión disuelto detectado en ambos riegos de la columna de sedimento Chilolo. Para el primer riego se tiene una relación C/Co de 0.32 a 0.008  $V_o$  la cual aumenta hasta un máximo de 0.41 en 0.26  $V_o$ . La retención de sulfato para el primer riego es de 67.07% (por medio de balances de masa). Para el segundo riego la relación C/Co varía entre 0.06 y 0.25, siendo el valor de 0.06 en el último lixiviado colectado a 0.10  $V_o$ , tomando en cuenta que este lixiviado es el valor más confiable al ser la última muestra colectada (lo que implica un mayor tiempo de interacción entre la solución aplicada y el sedimento) es posible decir que el sulfato retenido en el sedimento durante el primer riego se encuentra de esa forma después del segundo riego, ya que las concentraciones solubles del mismo al finalizar el riego son muy bajas en comparación a la concentración original.

Es importante destacar las fugas laterales ocurridas en ambos riegos, debido a ello se perdió un porcentaje importante de la solución añadida en diferentes partes de la columna. Tomando en consideración lo anterior, se tiene el inconveniente de que únicamente se consiguió tomar muestras de los lixiviados hasta 0.3  $V_o$  en el primer riego y 0.10  $V_o$  en el segundo riego, por lo que la interacción entre ambas soluciones con el sedimento no fue la ideal (tomando en cuenta el tiempo de interacción de las columnas anteriores).

4. Columna de suelo Bacanuchi

Ubicación: Terraza del río Bacanuchi  
 Distancia al sitio del derrame: 40.3 Km  
 Altura de la columna: 21.5 cm  
 Volumen de poro: 2197 cm<sup>3</sup>  
 Número de riegos: 3

En la columna de suelo Bacanuchi se realizaron 3 riegos, todos ellos con la solución ácida ferrocuprífera. Al estar alejado del arroyo Tinajas, no se realizó la simulación de las precipitaciones con la solución de CaCl<sub>2</sub>, sino que únicamente se buscó facilitar la interacción de la solución ácida ferrocuprífera con el suelo de la terraza del río Bacanuchi y promover cambios físicos y químicos en este suelo producto de dicha interacción.

a) pH y Conductividad Eléctrica.

En la figura 47 se observan las modificaciones de pH y conductividad eléctrica vs el volumen de poro en la base de la columna de suelo Bacanuchi para cada uno de los 3 riegos.

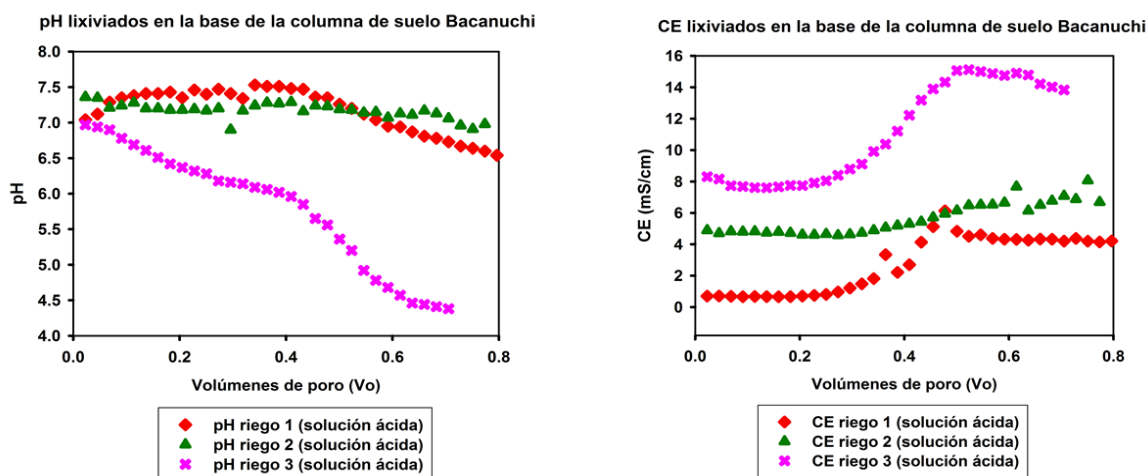


Figura 47. pH y CE en los lixiviados colectados en la base de la columna Bacanuchi en cada uno de los riegos.

En lo que respecta a la gráfica de pH se observa que durante el primer riego el pH en la solución de lixiviado comienza con un valor de 7.04, es decir, el suelo tiene la capacidad desde el inicio de la infiltración, de neutralizar el pH de la solución ácida ferrocuprífera (pH=2.43). Como se vio en apartados anteriores, este suelo contiene carbonatos que reaccionaron con la adición de HCl (ver Tabla 17), por lo que se observa la capacidad que tiene para neutralizar la acidez. Incluso durante un segundo riego con la solución ácida ferrocuprífera el suelo Bacanuchi sigue presentando las condiciones para neutralizar la acidez de la solución, se observa que durante el segundo riego el pH varía entre 7.36 al inicio del experimento y hasta un valor mínimo de 6.91 al final del mismo. Es hasta el tercer riego en donde el suelo comienza a perder su capacidad neutralizadora, ya que el último lixiviado colectado presenta un pH de 4.38.

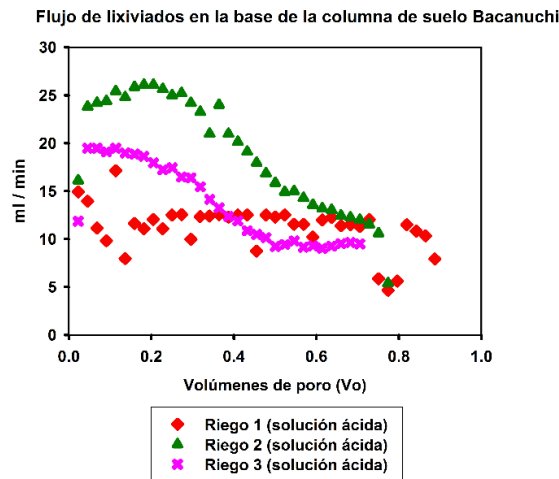


## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La conductividad eléctrica durante el primer riego tiende a aumentar conforme la solución ácida interacciona con el suelo, llegando a un valor máximo de 6.14 mS/cm a 0.48 volúmenes de poro, a partir de este volumen de poro, la CE se estabiliza sin tener un cambio significativo en el suelo. En el segundo riego, la CE aumenta en comparación con el primero, sin embargo, el cambio no es significativo sino hasta el tercer riego, en donde la conductividad alcanza un valor máximo de 15.12 mS/cm. El aumento en la conductividad eléctrica en el tercer riego puede relacionarse al aumento de la acidez en el mismo riego, que facilita la disolución de iones, los cuales promueven el aumento de este parámetro. En los 3 riegos se observa una conductividad eléctrica promedio menor a la originalmente presente en la solución ácida (17.26 mS/cm) lo que indica que muchos iones disueltos (que están relacionados a la CE) fueron retenidos en el suelo probablemente por precipitación química o vía sorción.

b) Flujo de lixiviados en la base de la columna.

Con la intención de determinar cambios estructurales en el suelo Bacanuchi, se monitorearon los flujos de lixiviados en la base del suelo en cada uno de los riegos. Los resultados se observan en la figura 48, donde se presenta la variación de la velocidad del lixiviado versus el volumen de poro.



**Figura 48.** Flujo de lixiviados en la base de la columna de suelo Bacanuchi. El valor de 0 en  $V_o$  corresponde al inicio de la salida de lixiviados en la base de la columna.

El flujo en la base de la columna de suelo durante el primer riego comienza con una velocidad de 14.93 ml/min, estabilizándose a un valor cercano a 12 ml/min durante gran parte del riego, para finalizar en 7.92 ml/min a 0.89 volúmenes de poro. En general, el comportamiento es homogéneo, con algunos valores sin tendencia clara. Tomando en cuenta que el suelo neutraliza la acidez de la solución ácida infiltrada desde el comienzo del experimento, es poco probable que el suelo haya cambiado estructuralmente, ya que al tener un valor de pH neutro la capacidad erosiva es mínima. Durante el segundo y tercer riego, la velocidad de los flujos tiende a disminuir gradualmente conforme interacciona la solución con el suelo, sin embargo, no se llega al estado estacionario en ningún momento durante la duración de los experimentos. Considerando que las velocidades de los flujos en

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

la base de la columna durante los 3 riegos son muy parecidas y el comportamiento es homogéneo y con la misma tendencia, es poco probable que este suelo haya sufrido modificaciones en la porosidad, no obstante, cabe recordar que después del tercer riego la acidez aumenta y el suelo pierde su capacidad neutralizadora, por lo que probablemente un cuarto riego con la solución ácida podría causar modificaciones físicas en esta columna.

c) Curvas de elución de elementos potencialmente tóxicos en la base y a diferentes profundidades de la columna.

Con la intención de conocer el comportamiento de los EPT presentes en la solución ácida en contacto con el suelo Bacanuchi, se realizaron curvas de elución para cada uno de los elementos de interés. Dichos gráficos muestran la variación de la concentración de los EPT (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn), de manera adimensional ( $C/C_0$ , concentración del elemento en el lixiviado respecto a la concentración del elemento en la solución aplicada) versus el volumen de poro. Los resultados se muestran en las figuras 49 y 50.

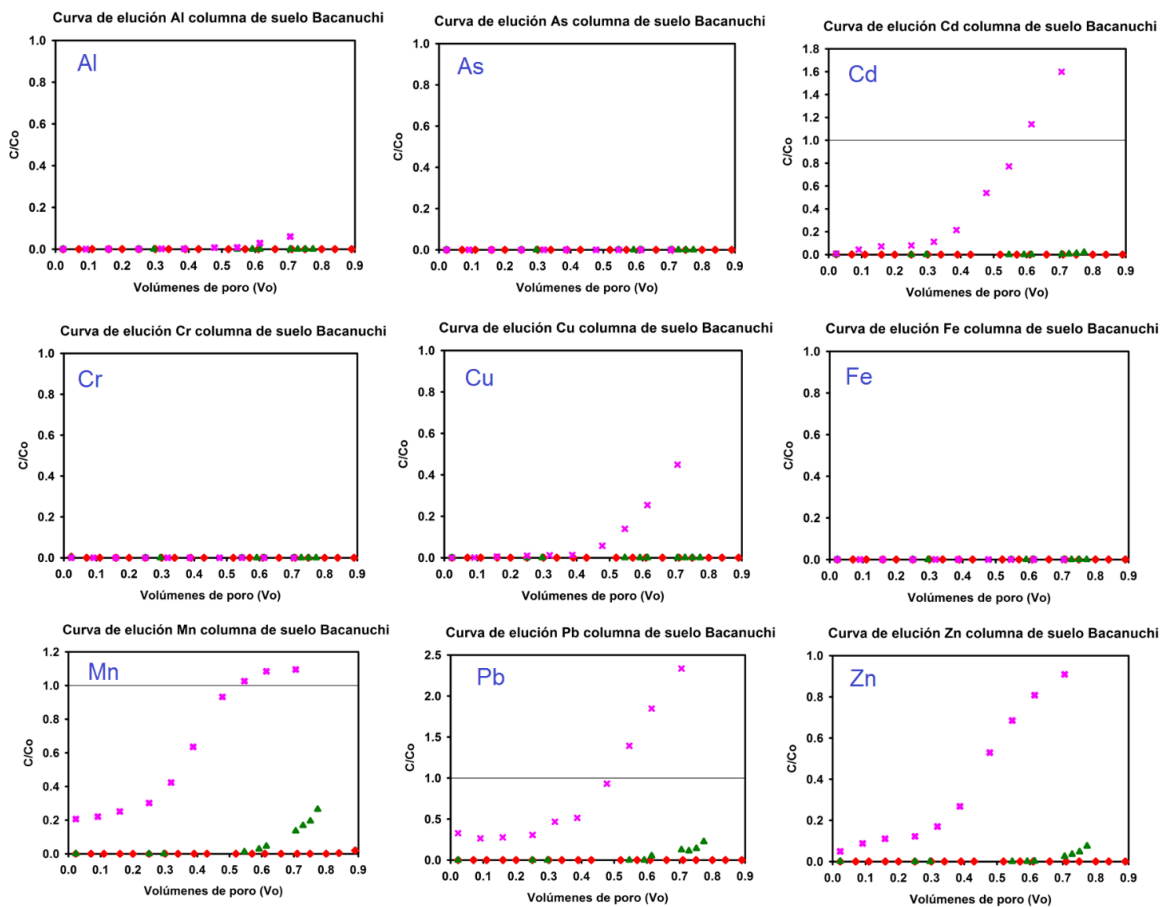


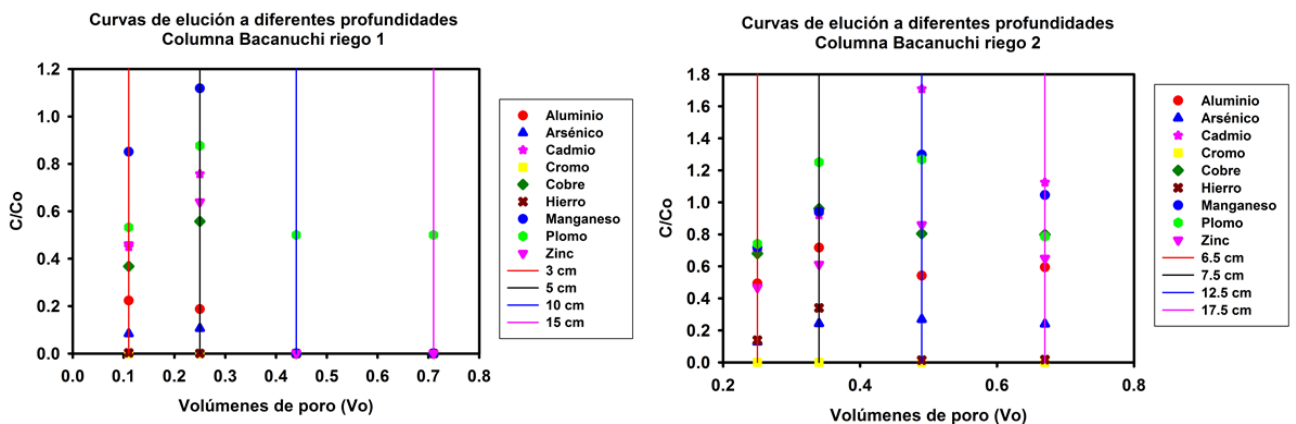
Figura 49. Curvas de elución de EPT en la base de la columna de suelo Bacanuchi.  $C/C_0$  concentración adimensional del elemento,  $V_0$ , volúmenes de poro; puntos rojos: primer riego con la solución ácida ferrocuprífera; triángulos verdes: corresponden al segundo riego con la solución ácida ferrocuprífera; cruces rosas: tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera. Mayor a 1 en  $C/C_0$  implica liberación del elemento desde el suelo.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La forma de las curvas de elución en el suelo Bacanuchi presentes en la figura 49 evidencia una fuerte capacidad de retención de los EPT contenidos en la solución ácida. Durante el primer riego, todos los EPT analizados presentan retenciones de 100% (99.82% en el caso del Mn) usando balances de masa, en ningún volumen de poro ocurre la liberación de alguno de ellos. Tomando en cuenta la neutralidad del pH en la solución de los lixiviados, es entendible que estos elementos no se encuentren solubles, por lo que pueden estar precipitados o sorbidos en las fases sólidas del suelo. Durante el segundo riego con la solución ácida, todos los elementos se encuentran retenidos en un máximo de 100%, con excepción del Mn (retención máxima de 93.63%), Pb (retención máxima de 99.14%) y Zn (retención máxima de 98.60%), los cuales se liberan en pequeñas proporciones a partir de 0.7 Vo. Para el tercer riego, en el cual el suelo comienza a perder su capacidad neutralizadora de acidez, solamente el As, Cr y Fe son retenidos al 100%, mientras que el Al, Cu y Zn se liberan sin superar su concentración original en la solución ácida ferrocuprífera, los que sí lo hacen son el Cd, Mn y Pb, los cuales presentan una relación C/Co mayor a 1 después de 0.5 Vo, lo que implica que después de este tiempo su concentración es mayor a la presente originalmente en la solución ácida, por lo cual es posible decir que se liberan desde el suelo a partir de ese instante.

Es importante notar la relevancia del pH en la capacidad de retener los EPT, ya que al encontrarse en condiciones de neutralidad, la precipitación de los mismos debe ser fundamental para facilitar su nula concentración en la solución del suelo. Tomando en cuenta la figura 31, se determinaron dos probables puntos de carga cero en la superficie de este suelo (2.91 y 7.49), los cuales pueden corresponder a minerales arcillosos en el primer caso y probablemente minerales carbonatados u oxihidróxidos de Fe para el segundo PCZ, considerando estos puntos, es probable que este suelo tenga la capacidad de retener vía sorción tanto aniones como cationes metálicos.

Durante el experimento, se colectaron muestras de solución de suelo a lo largo de la columna en el primer y segundo riego (a 3, 5, 10, y 15 cm de profundidad en el primer riego y a 6.5, 7.5, 12.5 y 17.5 cm en el segundo riego) en diferentes momentos. La Figura 50 muestra la concentración de los diferentes elementos retenidos ( $C/Co < 1$ ) y/o liberados ( $C/Co > 1$ ) desde el suelo.



**Figura 50. Concentración de EPT en muestras de solución de suelo colectadas a diferentes profundidades en la columna de suelo Bacanuchi durante el primer y segundo riego.**

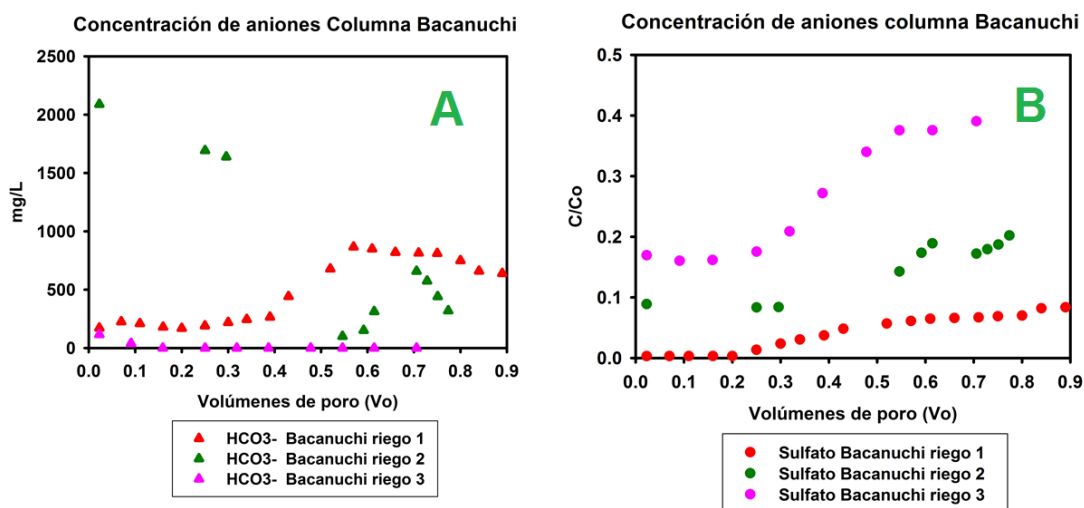
## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la figura 50 correspondiente al primer riego, se observa que a 10 y 15 cm de profundidad ocurre lo mismo que en la base de la columna, todos los EPT se encuentran retenidos hasta en un 99-100%, con excepción del Pb, el cual se encuentra retenido en el suelo en un máximo de 50%. A diferencia del comportamiento anterior, en los primeros centímetros (3 y 5) no existe una retención total de todos los EPT (con excepción del Cr y Fe), sin embargo, el suelo si presenta la capacidad de retenerlos en diferentes proporciones. Tomando en cuenta los comportamientos antes señalados, es posible afirmar que conforme el frente de humedad de la solución ácida ferrocuprífera avanza en profundidad en la columna, la retención aumenta.

En lo que respecta al segundo riego, se observa que a 6.5 cm de profundidad y 0.25  $V_o$ , todos los elementos se encuentran retenidos en diferentes proporciones, siendo el Cr (retenido al 100%) y el Fe (en un 86%) los elementos más retenidos en el suelo Bacanuchi. A 7.5 cm y 0.34  $V_o$ , existe liberación de Pb desde el suelo en una magnitud 1.25 veces mayor a su concentración inicial, no obstante, el resto de los elementos se encuentran retenidos en el suelo en diferentes porcentajes, siendo el Cr nuevamente el más retenido en un 100%. A los 12.5 y 17.5 cm existe una retención total nuevamente para el Fe y el Cr, siendo a 12.5 cm la retención en el siguiente orden: Cr=Fe>As>Al>Cu>Zn y liberándose desde el suelo Cd, Pb y Mn. Por su parte, a 17.5 cm el orden de retención tiene el siguiente orden: Cr=Fe>As>Al>Zn>Pb>Cu>Mn>Cd.

### d) Concentración de aniones disueltos.

Para cada riego se realizó el análisis mediante cromatografía iónica de los aniones disueltos en las muestras colectadas en la base de la columna, los resultados se presentan en la figura 51. A diferencia de las anteriores columnas (donde solo se detectaron sulfatos) y dada la posible presencia de carbonatos y la neutralidad en el pH durante el primer y el segundo riego, se determinó la presencia de bicarbonatos disueltos en la solución de los lixiviados colectados.



**Figura 51. Concentración de bicarbonatos (imagen A) y sulfatos (Imagen B) en los tres riegos de la columna de suelo Bacanuchi.**

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se observa en la gráfica 51 A la concentración de bicarbonatos (se presentan en mg/L y no en C/Co debido a que la solución ácida ferrocuprífera no presenta ninguna concentración soluble de bicarbonatos con la cual relacionar la concentración de bicarbonatos). En el primer riego conforme aumenta el tiempo del experimento, la concentración disuelta de bicarbonatos aumenta, la tendencia es contraria en el segundo riego, ya que al empezar el experimento la concentración de bicarbonatos es máxima (2090 mg/L) y esta disminuye gradualmente hasta llegar a 593 mg/L a 0.77 Vo. Finalmente, en el tercer riego, conforme la acidez aumenta (ver Figura 47), la concentración de los bicarbonatos llega a 0, lo cual se asocia a la desaparición de todos los carbonatos presentes originalmente en el suelo (este comportamiento explica el valor bajo de pH al finalizar el tercer riego).

El otro anión presente en los lixiviados es el sulfato (Figura 51B), el cual aumenta gradualmente en cada uno de los riegos en relación a la duración del experimento. Para el riego 1 la concentración inicial de sulfatos comienza con un C/Co igual a 0 por lo que al iniciar el experimento no se detectan sulfatos solubles en la base de la columna, después de 0.89 volúmenes de poro la relación C/Co es igual a 0.08. La retención de sulfato en el primer riego es de 94.62%. Por su parte, en el riego 2 la C/Co inicial es de 0.09 (prácticamente la misma con la que terminó el primer riego), finalizando con una relación C/Co de 0.20 a 0.77 Vo. La retención de sulfatos después del segundo riego es igual a 88.77%. Finalmente, la concentración de sulfatos durante el tercer riego va de un valor de C/Co de 0.17 a un C/Co final de 0.39, con una retención igual a 80.27% (tomando en cuenta balances de masa). Considerando que la concentración de sulfatos en la solución ácida ferrocuprífera es de 30021 mg/L, en todos los riegos queda retenido en diferentes relaciones, por lo que es de esperarse la precipitación de minerales sulfatados, como el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), el cual puede formarse por la presencia del calcio de los minerales carbonatados.

### **Resumen de los balances de masa:**

En las tablas 22-25 puede observarse el resumen de los resultados del balance de masas para cada una de las columnas en los riegos con la solución ácida ferrocuprífera. En dichas tablas es posible observar para cada EPT la masa añadida en cada riego, la masa lixiviada en la base de la columna, la masa retenida y el porcentaje retenido de cada uno de los EPT analizados.

En lo que respecta al suelo Tinajas (Tabla 22), se observa que el orden de retención después del primer riego es el siguiente:  $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Mn}$ . Con la única excepción del Al, se observa que con el paso de los riegos aumenta la retención de los diferentes EPT.

La ausencia de carbonatos en este suelo señalada con anterioridad, no permitiría la neutralización de la acidez, sin embargo, es factible que con el paso de los riegos la posible presencia de silicatos favorezcan la neutralización, facilitando un ligero aumento en el pH (comparando los valores de pH de los lixiviados colectados en la base de la columna con el valor original de la solución ácida ferrocuprífera) y con ello la posible formación de precipitados secundarios que podrían explicar el aumento en la retención después del tercer riego.

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 22. Resumen del balance de masas en la columna de suelo Tinajas en los riegos con la solución ácida. NSR: No se retuvo.**

<b>Columna de suelo Tinajas</b>					
<b>EPT</b>	<b># de riego</b>	<b>mg añadidos</b>	<b>mg lixiviados</b>	<b>mg retenidos</b>	<b>% retenido</b>
<b>Al</b>	1	8529.68	4157.94	4371.74	<b>51.25</b>
	3	8529.68	4474.70	4054.98	<b>47.54</b>
	4	8529.68	4125.28	4404.40	<b>51.64</b>
<b>As</b>	1	2.16	1.36	0.80	<b>37.04</b>
	3	2.16	0.72	1.44	<b>66.67</b>
	4	2.16	0.61	1.55	<b>71.76</b>
<b>Cd</b>	1	8.10	5.48	2.62	<b>32.35</b>
	3	8.10	5.33	2.77	<b>34.20</b>
	4	8.10	4.58	3.52	<b>43.46</b>
<b>Cr</b>	1	2.42	1.46	0.96	<b>39.67</b>
	3	2.42	1.27	1.15	<b>47.52</b>
	4	2.42	1.08	1.34	<b>55.37</b>
<b>Cu</b>	1	1574.26	1023.13	551.13	<b>35.01</b>
	3	1574.26	964.35	609.91	<b>38.74</b>
	4	1574.26	872.22	702.04	<b>44.59</b>
<b>Fe</b>	1	6860.18	3271.85	3588.33	<b>52.31</b>
	3	6860.18	2444.62	4415.56	<b>64.37</b>
	4	6860.18	1990.60	4869.58	<b>70.98</b>
<b>Mn</b>	1	1287.84	1121.57	166.27	<b>12.91</b>
	3	1287.84	864.70	423.14	<b>32.86</b>
	4	1287.84	791.67	496.17	<b>38.53</b>
<b>Pb</b>	1	0.36	0.92	-0.56	<b>NSR</b>
	3	0.36	0.52	-0.16	<b>NSR</b>
	4	0.36	0.49	-0.13	<b>NSR</b>
<b>Zn</b>	1	754.58	398.87	355.71	<b>47.14</b>
	3	754.58	282.83	471.75	<b>62.52</b>
	4	754.58	256.20	498.38	<b>66.05</b>

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 23. Resumen del balance de masas en la columna de sedimento El Álamo en los riegos con la solución ácida. NSR: No se retuvo.**

<b>Columna de sedimento El Álamo</b>					
<b>EPT</b>	<b># de riego</b>	<b>mg añadidos</b>	<b>mg lixiviados</b>	<b>mg retenidos</b>	<b>% retenido</b>
<b>Al</b>	1	9041.46	2914.33	6127.13	<b>67.77</b>
	3	8529.68	2497.98	6031.70	<b>70.71</b>
	4	8529.68	4420.09	4109.59	<b>48.18</b>
<b>As</b>	1	2.29	0.71	1.58	<b>68.83</b>
	3	2.16	0.48	1.68	<b>77.96</b>
	4	2.16	0.68	1.48	<b>68.32</b>
<b>Cd</b>	1	8.59	4.15	4.44	<b>51.70</b>
	3	8.10	3.058	5.04	<b>62.24</b>
	4	8.10	4.75	3.35	<b>41.40</b>
<b>Cr</b>	1	2.57	1.00	1.56	<b>60.94</b>
	3	2.42	0.68	1.74	<b>71.77</b>
	4	2.42	1.07	1.35	<b>55.78</b>
<b>Cu</b>	1	1668.72	773.30	895.42	<b>53.66</b>
	3	1574.26	562.47	1011.79	<b>64.27</b>
	4	1574.26	1038.61	535.65	<b>34.03</b>
<b>Fe</b>	1	7271.79	1837.37	5434.42	<b>74.73</b>
	3	6860.18	1353.46	5506.72	<b>80.27</b>
	4	6860.18	2099.62	4760.56	<b>69.39</b>
<b>Mn</b>	1	1365.11	787.66	577.45	<b>42.30</b>
	3	1287.84	492.66	795.18	<b>61.75</b>
	4	1287.84	820.57	467.27	<b>36.28</b>
<b>Pb</b>	1	0.38	0.49	-0.11	<b>NSR</b>
	3	0.36	0.25	0.11	<b>31.94</b>
	4	0.36	0.29	0.07	<b>20.79</b>
<b>Zn</b>	1	799.85	291.22	508.64	<b>63.59</b>
	3	754.58	165.06	589.52	<b>78.13</b>
	4	754.58	274.63	479.95	<b>63.60</b>

Para el sedimento El Álamo (Tabla 23), el orden de retención de EPT después del primer riego es el siguiente: Fe > As > Al > Zn > Cr > Cu > Cd > Mn. Comparando los resultados del primer riego y el tercer riego, es posible observar una clara disminución en la retención de algunos EPT, entre ellos: Al, Cd, Cr, Cu, Fe y Mn, lo que reflejaría una disminución en la capacidad amortiguadora de este sedimento con el paso de los riegos.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tabla 24. Resumen del balance de masas en la columna de sedimento Chilolo en el riego con la solución ácida. NSR: No se retuvo.

Columna de sedimento Chilolo					
EPT	# de riego	mg añadidos	mg lixiviados	mg retenidos	% retenido
Al	1	3753.06	199.21	3553.85	94.69
As	1	0.95	0.03	0.92	96.76
Cd	1	3.56	0.74	2.83	79.35
Cr	1	1.06	0.01	1.05	98.82
Cu	1	692.67	91.83	600.85	86.74
Fe	1	3018.48	21.28	2997.20	99.30
Mn	1	566.65	177.32	389.33	68.71
Pb	1	0.16	0.25	-0.09	NSR
Zn	1	332.02	46.31	285.70	86.05

En el caso del sedimento Chilolo (Tabla 24), se observan porcentajes de retención mayores al 68% para todos los EPT (con excepción del Pb), teniendo el siguiente orden de retención: Fe > Cr > As > Al > Cu > Zn > Cd > Mn.

Finalmente, se observa claramente la alta capacidad de retención de EPT que presenta el suelo Bacanuchi (Tabla 25), ya que después del primer riego todos los EPT se retienen prácticamente en un 100%, siendo el Mn el EPT menos retenido (en un porcentaje igual a 99.82%). Esta retención está probablemente influenciada por fenómenos de precipitación de fases minerales secundarias, debido a la neutralidad en el pH. Se observa claramente que con el paso de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera la capacidad de retener a los diferentes EPT disminuye, lo cual puede ser un reflejo del agotamiento de la capacidad neutralizadora de este suelo.



**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 25. Resumen del balance de masas en la columna de suelo Bacanuchi.**

<b>Columna de suelo Bacanuchi</b>					
<b>EPT</b>	<b># de riego</b>	<b>mg añadidos</b>	<b>mg lixiviados</b>	<b>mg retenidos</b>	<b>% retenido</b>
<b>Al</b>	<b>1</b>	9382.65	0.063	9382.59	<b>100.00</b>
	<b>2</b>	8529.68	1.551	8528.13	<b>99.98</b>
	<b>3</b>	8529.68	208.180	8321.50	<b>97.56</b>
<b>As</b>	<b>1</b>	2.38	0.000	2.38	<b>100.00</b>
	<b>2</b>	2.16	0.000	2.16	<b>100.00</b>
	<b>3</b>	2.16	0.000	2.16	<b>100.00</b>
<b>Cd</b>	<b>1</b>	8.91	0.001	8.91	<b>99.99</b>
	<b>2</b>	8.10	0.024	8.08	<b>99.70</b>
	<b>3</b>	8.10	2.782	5.32	<b>65.65</b>
<b>Cr</b>	<b>1</b>	2.66	0.000	2.66	<b>100.00</b>
	<b>2</b>	2.42	0.000	2.42	<b>100.00</b>
	<b>3</b>	2.42	0.000	2.42	<b>100.00</b>
<b>Cu</b>	<b>1</b>	1731.69	0.26	1731.43	<b>99.99</b>
	<b>2</b>	1574.26	0.25	1574.01	<b>99.98</b>
	<b>3</b>	1574.26	111.13	1463.13	<b>92.94</b>
<b>Fe</b>	<b>1</b>	7546.20	0.02	7546.17	<b>100.00</b>
	<b>2</b>	6860.18	0.31	6859.87	<b>100.00</b>
	<b>3</b>	6860.18	0.09	6860.09	<b>100.00</b>
<b>Mn</b>	<b>1</b>	1416.62	2.37	1414.26	<b>99.82</b>
	<b>2</b>	1287.84	82.00	1205.84	<b>93.63</b>
	<b>3</b>	1287.84	596.65	691.19	<b>53.67</b>
<b>Pb</b>	<b>1</b>	0.40	0.00	0.40	<b>100.00</b>
	<b>2</b>	0.36	0.02	0.34	<b>95.11</b>
	<b>3</b>	0.36	0.23	0.13	<b>35.03</b>
<b>Zn</b>	<b>1</b>	830.04	0.04	830.00	<b>100.00</b>
	<b>2</b>	754.58	10.57	744.01	<b>98.60</b>
	<b>3</b>	754.58	211.65	542.93	<b>71.95</b>

Los resultados mostrados en las tablas 22-25 reflejan que el Fe es el elemento que más se retiene en todas las columnas, lo cual puede estar asociado a la precipitación de minerales de Fe.

Por el contrario, el elemento que menos se retiene es el Mn, no obstante, el caso del Pb es de interés, ya que en las columnas Tinajas, El Álamo y Chilolo se observa su nula retención (incluso se observa una liberación del mismo), lo cual contradice lo que en la

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

literatura se ha mencionado, ya que se trata del metal menos móvil (Kabata-Pendías, 2001). Es de importancia notar que el Pb es el EPT con la menor concentración soluble en la solución ácida ferrocuprúfera colectada en campo (ver Tabla 20) cuya concentración es igual a 0.18 mg/L (las variaciones en las concentraciones de Pb en los lixiviados colectados pueden alterar y cambiar los resultados fácilmente), valor que se encuentra por debajo de la concentración determinada por CONAGUA (ver Tabla 21) la cual es de 2.5 mg/L. Si se considera el valor de Pb determinado por CONAGUA, el Pb es mucho menos móvil de lo que se ha mencionado hasta este punto. Tomando en cuenta el valor de Pb determinado por CONAGUA, los resultados del balance de masas para cada columna se muestran en la siguiente tabla.

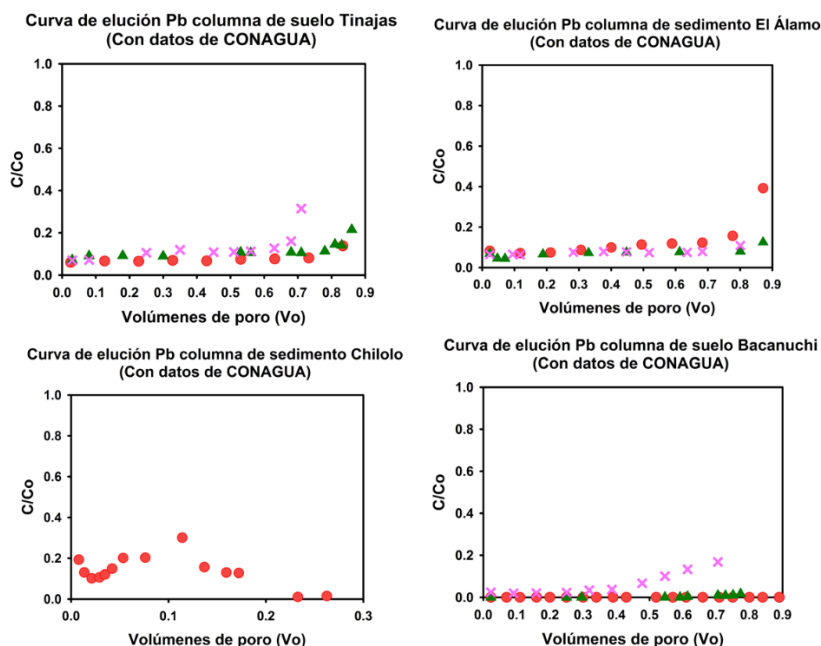
**Tabla 26. Balances de masa para Pb en cada columna utilizando la concentración determinada por CONAGUA.**

Columna de suelo Tinajas					
EPT	# de riego	mg añadidos	mg lixiviados	mg retenidos	% retenido
Pb	1	5.00	0.92	4.08	<b>81.6</b>
	3	5.00	0.52	4.48	<b>89.6</b>
	4	5.00	0.49	4.51	<b>90.2</b>
Columna de sedimento El Álamo					
EPT	# de riego	mg añadidos	mg lixiviados	mg retenidos	% retenido
Pb	1	5.30	0.49	4.81	<b>90.75</b>
	3	5.00	0.25	4.75	<b>95</b>
	4	5.00	0.29	4.71	<b>94.2</b>
Columna de sedimento Chilolo					
EPT	# de riego	mg añadidos	mg lixiviados	mg retenidos	% retenido
Pb	1	2.20	0.25	1.95	<b>88.64</b>
Columna de suelo Bacanuchi					
EPT	# de riego	mg añadidos	mg lixiviados	mg retenidos	% retenido
Pb	1	5.50	0.00	5.50	<b>100</b>
	2	5.00	0.02	4.98	<b>99.6</b>
	3	5.00	0.23	4.77	<b>95.4</b>

Considerando el valor de Pb de 2.5 mg/L, se observa una clara retención de Pb en todas las columnas. En el caso de la columna Tinajas, el Pb sería el elemento más retenido en un porcentaje de hasta 81.6% en el primer riego. Por su parte, en la columna El Álamo la retención de Pb calculada es igual a 90.75% después del primer riego, lo que lo convertiría, al igual que en la columna Tinajas, en el elemento menos móvil tras el paso de la solución ácida ferrocuprúfera. En lo que corresponde a la columna Chilolo, los balances de masa de la tabla 24 señalan que el Pb no se retiene, lo cual cambia al utilizar los datos de CONAGUA, ya que la retención calculada es de 88.64%. Finalmente, se observa una retención de 100% de Pb en el primer riego de la columna Bacanuchi (el cual no varía con el valor anterior),

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Sin embargo, la diferencia se observa en el tercer riego, ya que el Pb se retiene en un porcentaje de 95.4% (el cual difiere claramente del presentado en la tabla 25, cuyo porcentaje es de 35.03%). En la Figura 52 se observan las curvas de elución de Pb usando el valor de 2.5 mg/L.



**Figura 52.** Curvas de elución de Pb en las columnas tomando en cuenta el valor de Pb determinado por CONAGUA. Círculos rojos: primer riego con la solución ácida. Triángulos verdes: Segundo riego con la solución ácida. Cruces rosas: Tercer riego con la solución ácida.

### Resumen de resultados para el primer riego con la solución ácida ferrocuprífera.

La tabla 27 resume los resultados en todas las columnas para el primer riego con la solución ácida ferrocuprífera (el cual es el único riego que coincide en las cuatro columnas).

**Tabla 27.** Resumen del primer riego en cada una de las columnas analizadas. En letras rojas se observa la retención determinada mediante balances de masa. En letras verdes se observa la retención calculada con el uso del área bajo la curva. NSR: No se retuvo.

primer riego	pH mínimo	pH máximo	Retención de los diferentes EPT (%)								
			Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Suelo Tinajas	2.55	3.01	51.2	36.9	32.2	39.6	35.0	52.3	12.9	NSR	47.1
			43.0	24.0	21.0	29.0	23.0	42.0	NSR	NSR	38.0
Sedimento El Álamo	2.40	3.03	67.7	68.8	51.7	60.9	53.6	74.7	42.2	NSR	63.5
			61.0	62.0	41.0	52.0	43.0	69.0	29.0	NSR	55.0
Sedimento Chilolo	4.14	5.45	94.6	96.7	79.3	98.8	86.7	99.3	68.7	NSR	86.0
			98.7	99.2	84.7	99.6	90.6	99.8	77.0	NSR	90.7
Suelo Bacanuchi	6.47	7.53	100	100	100	100	100	100	99.8	100	100
			100	100	100	100	100	100	100	100	100

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

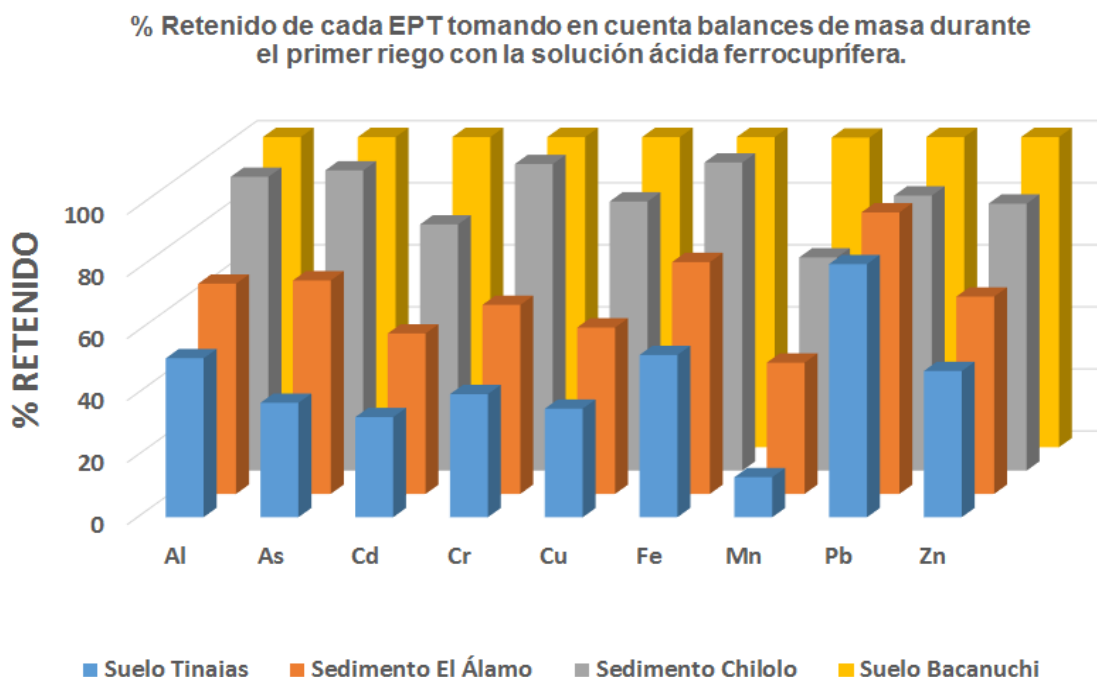
Los resultados de la tabla 27 permiten decir que el suelo Bacanuchi es el mejor amortiguador de los EPT presentes en la solución ácida ferrocuprífera, reteniendo completamente a todos los elementos estudiados (la retención calculada es del 100% para prácticamente todos los EPT, tanto con el uso de balances de masa como con el cálculo del área bajo la curva). Por su parte, el sedimento Chilolo parece ejercer una retención importante, no obstante, cabe recordar que en esa columna ocurrieron fugas (fue la única con este problema) por lo que solo se pudieron obtener lixiviados a un máximo de 0.30 volúmenes de poro, esto impidió que la solución ácida y el sedimento interactuaran de la misma forma que las otras columnas (considerando el tiempo de interacción en volúmenes de poro), por lo que los resultados no son comparables en su totalidad con las otras columnas. El suelo tinajas retiene a todos los elementos en diferentes proporciones, su retención puede deberse a fenómenos de sorción en minerales arcillosos o a la precipitación de minerales secundarios que pueden retener a los EPT. Finalmente, la columna de sedimento El Álamo también retiene en diferentes proporciones a los diferentes EPT. Como se observa en la tabla 27, el pH de los lixiviados colectados está íntimamente relacionado con la capacidad de retención de cada columna, ya que el suelo Bacanuchi presenta los valores de pH más altos, lo que favorece una mayor retención de los EPT probablemente por procesos de precipitación de fases que pueden retener a los EPT. Por su parte, el suelo Tinajas tiene un valor de pH más bajo en comparación al suelo Bacanuchi, por lo que la retención de los EPT claramente disminuye.

Es importante destacar nuevamente el caso del Pb, el cual se observa únicamente se retiene en la columna Bacanuchi durante el primer riego, sin embargo, como se mencionó anteriormente, esto puede ser un reflejo de su baja concentración presente en la solución ácida usada en estos experimentos, lo que ocasiona una mayor variación en los resultados.

Los resultados de retención determinados mediante balance de masas parecen sobreestimar los resultados calculados con el área bajo la curva en las columnas de suelo Tinajas y del sedimento El Álamo. Cabe recordar que en los cálculos de las ecuaciones 2-6 se multiplicó por 3 la masa de los lixiviados de cada EPT ya que se analizaron una tercera parte de los lixiviados colectados en la base de la columna, debido a ello, es factible que los resultados estén sobreestimados en relación a los resultados con el otro método, no obstante, mediante ambos métodos se observó la retención de los diferentes EPT. En el sedimento Chilolo ambos cálculos son muy parecidos e incluso los resultados del balance de masas son menores a los determinados por el área bajo la curva, debido a que en este sedimento no existe sobreestimación de los resultados ya que se analizaron el total de lixiviados colectados. En lo que respecta al suelo Bacanuchi, ambos métodos confirman que la retención de los diferentes EPT durante el primer riego es del 100% (99.82% para el Mn en los resultados del balance de masas), lo que lo convierte en el mejor amortiguador de los diferentes EPT presentes en la solución ácida ferrocuprífera.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la figura 53 se ilustra la retención para cada uno de los EPT estudiados en este trabajo (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn) durante el primer riego con la solución ácida ferrocuprífera en las columnas Tinajas, El Álamo, Chilolo y Bacanuchi. Cabe aclarar que el porcentaje retenido de los diferentes EPT se refiere a la retención determinada por medio de balances de masa (en el caso particular del Pb, se utilizó la concentración determinada por la CONAGUA, con el fin de evidenciar que este elemento no es necesariamente móvil).



**Figura 53. Retención de EPT durante el primer riego con la solución ácida ferrocuprífera en las columnas Tinajas, El Álamo, Chilolo y Bacanuchi.**

La figura 53 evidencia que el suelo Bacanuchi presenta la mayor retención de cada uno de los EPT analizados. En lo que respecta al sedimento Chilolo, se observan altos porcentajes de retención de todos los EPT, no obstante, como se mencionó anteriormente, la existencia de fugas impidió la salida completa de la solución ácida añadida, por lo que los resultados en esta columna no deben considerarse totalmente confiables. Finalmente, las columnas de suelo Tinajas y de sedimento El Álamo presentan condiciones para retener a los diferentes EPT, sin embargo, esta retención es menor en comparación al suelo Bacanuchi. Comparando los dos suelos analizados se observa un comportamiento diferente relacionado a la ubicación de los sitios, ya que al considerar que el suelo Tinajas es la muestra tomada más al norte, y el suelo Bacanuchi es la muestra tomada más al sur, parece ser que la capacidad amortiguadora tiene una relación con la ubicación geográfica de las columnas, lo cual puede estar relacionado a la ausencia de carbonatos en la parte más alta (más al norte de la cuenca) y la presencia de carbonatos, los cuales neutralizan la acidez de la solución ácida ferrocuprífera en la columna Bacanuchi, lo que favorece la mayor retención de los EPT, los cuales probablemente precipitaron en nuevas fases minerales.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La retención de los diferentes EPT determinada por balances de masa y por el cálculo del área bajo la curva, puede deberse a fenómenos físicos y químicos. Físicamente puede estar relacionado a que el agua de los macroporos se quedó retenida en contra de la gravedad, impidiendo la salida de la solución lixiviada. Por su parte, químicamente puede retenerse por diferentes procesos, entre ellos precipitación y/o fenómenos de sorción. Por lo mismo, es importante mencionar que no es posible determinar si el porcentaje retenido de cada EPT se debió a procesos físicos o químicos, sin embargo, en todas las columnas después de los riegos se determinaron cambios de color, por lo que es factible suponer que un porcentaje de esa retención se debió a procesos químicos.

En el **ANEXO 6** se muestran los resultados para cada uno de los riegos realizados en cada columna, junto con los balances de masa. Por su parte, en el **ANEXO 7** se puede observar el resumen estadístico de los resultados presentados en la sección 5.3.1 correspondiente al análisis de las diferentes variables de los lixiviados (pH, CE, concentración de los diferentes EPT y la concentración de los diferentes aniones determinados).

### 5.3.2 Análisis del potencial redox en los diferentes riegos con la solución ácida.

Con la intención de observar la variación del potencial redox y su influencia en el comportamiento de los EPT en los suelos y sedimentos estudiados, se monitoreó en todas las columnas. Los resultados se observan a continuación, mediante gráficos que indican la variación del Eh a diferentes profundidades en cada columna versus el tiempo experimental.

#### 1. Columna de suelo Tinajas.

La figura 54 muestra el comportamiento del potencial redox (Eh) en la columna de suelo Tinajas en el transcurso del primer, tercer y cuarto riego (en el segundo riego no se instalaron electrodos redox ya que la intención era observar la modificación de este parámetro en los riegos con la solución ácida ferrocuprífera). El potencial redox en la columna Tinajas durante el primer riego disminuyó ligeramente al iniciar la infiltración de la solución ácida y se mantuvo alrededor de 0.3 V a las profundidades de 3.5 y 16 cm, mientras que a 2.5 y 10.5 cm el potencial redox varió poco, manteniéndose en un intervalo de entre 0.6-0.7 V. El potencial redox aumentó de 0.7 a 0.8 V en la profundidad de 9.6 cm, lo que implicaría que en ese sitio los poros no fueron visitados por el lixiviado (por lo que no ocurrió ninguna disminución del Eh) o bien, ocurrieron reacciones de óxido-reducción que promovieron el aumento del Eh. En lo que respecta al tercer y cuarto riego se observa una clara disminución del Eh a las profundidades de 5 y 14 cm, disminuyendo en ambos riegos a una profundidad de 5 cm desde 0.7 V a 0.4 V y a 14 cm desde 0.6 V hasta un mínimo de 0.2 V en el tercer riego. Por su parte, a 16 cm no se observa una modificación en la variación del potencial redox en ninguno de los dos riegos, manteniéndose en un valor promedio de 0.8 V.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tomando en cuenta que en los 3 riegos se instalaron electrodos redox a 16 cm, es posible hacer una comparación de la variación del parámetro a esa profundidad, se observa en el primer riego su disminución desde 0.77 hasta 0.35 V, lo que implica la llegada del lixiviado a esa profundidad, no obstante, en el tercer y cuarto riego el Eh se mantiene constante, lo que podría implicar que no existió interacción entre el lixiviado ácido y los poros presentes en el sitio de instalación por una posible modificación en la porosidad del suelo producto del poder erosivo de la solución ácida ferrocuprífera durante el primer riego o bien por flujos preferenciales que no facilitaron la interacción de la solución ácida ni la ocurrencia de reacciones redox en esa profundidad.

Es importante mencionar que el Eh de la solución ácida ferrocuprífera medido en laboratorio presentó un valor de 0.74 V, por lo que tomando en cuenta que en ninguna profundidad se mantiene este valor constante, es probable la ocurrencia de reacciones de óxido-reducción con el paso de la solución a través del suelo, cambiando notablemente el valor del Eh a lo largo de la columna.

De manera general, se observa que el Eh disminuye en algunas profundidades en cada riego, lo que podría implicar que la mayoría de los sitios en donde se instalaron los electrodos fueron visitados por el lixiviado. Las variaciones del Eh se mantienen entre 0.8 y 0.2 V, en la mayor parte de los casos. Lo anterior representa el cambio de una situación bien aireada a pobremente aireada. No se observa la disminución de Eh hasta valores negativos, esto significa que la columna de suelo Tinajas nunca se encontró en condiciones de saturación.

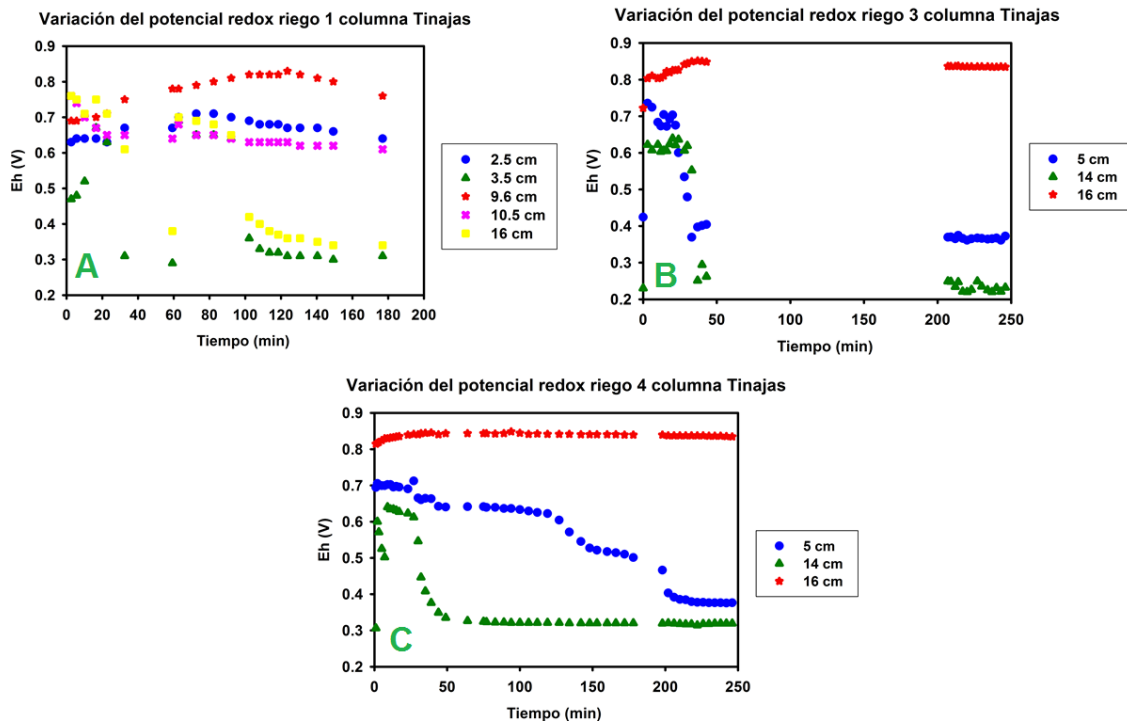


Figura 54. Variación del potencial redox durante el primer (A), tercer (B) y cuarto riego (C) con la solución ácida ferrocuprífera en la columna de suelo Tinajas.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 2. Columna de sedimento El Álamo.

La figura 55 muestra el comportamiento del potencial redox (Eh) en la columna El Álamo en el transcurso del primer, tercer y cuarto riego (todos los riegos con la solución ácida ferrocuprífera).

Durante el primer riego, el potencial redox en la columna de sedimento El Álamo disminuye al iniciar la infiltración de la solución ácida a las profundidades de 2.5 cm (desde 0.67 V hasta 0.5 V), 3.5 cm (desde 0.57 V hasta 0.26 V) y 16 cm (desde 0.67 V hasta 0.34 V). Por su parte, la variación del Eh a los 10.5 y 14 cm es mínima, manteniéndose constante en un valor de 0.8-0.85 V.

Durante el segundo y tercer riego se observa la disminución del Eh a las profundidades de 2 y 13.5 cm, siendo esta mínima a la profundidad de 2 cm y cambiando con mayor magnitud a los 13.5 cm desde un máximo de 0.7 V hasta un mínimo de 0.3 V.

La disminución del Eh en algunas profundidades de los 3 riegos puede implicar que la mayoría de los sitios en donde se instalaron los electrodos fueron visitados por el lixiviado, sin embargo, no se observa la disminución del Eh hasta valores negativos, lo que significa que en la columna El Álamo no se alcanzaron condiciones de saturación. Al igual que se comentó en la columna anterior, es posible que los cambios en el potencial redox a lo largo de la columna en cada uno de los riegos se deba no únicamente a la saturación de los poros por la llegada de la solución ácida, sino también al potencial redox de la propia solución ácida ferrocuprífera, la cual al interactuar con el sedimento posiblemente promueve reacciones de óxido-reducción que provocan cambios en el potencial redox del sistema.

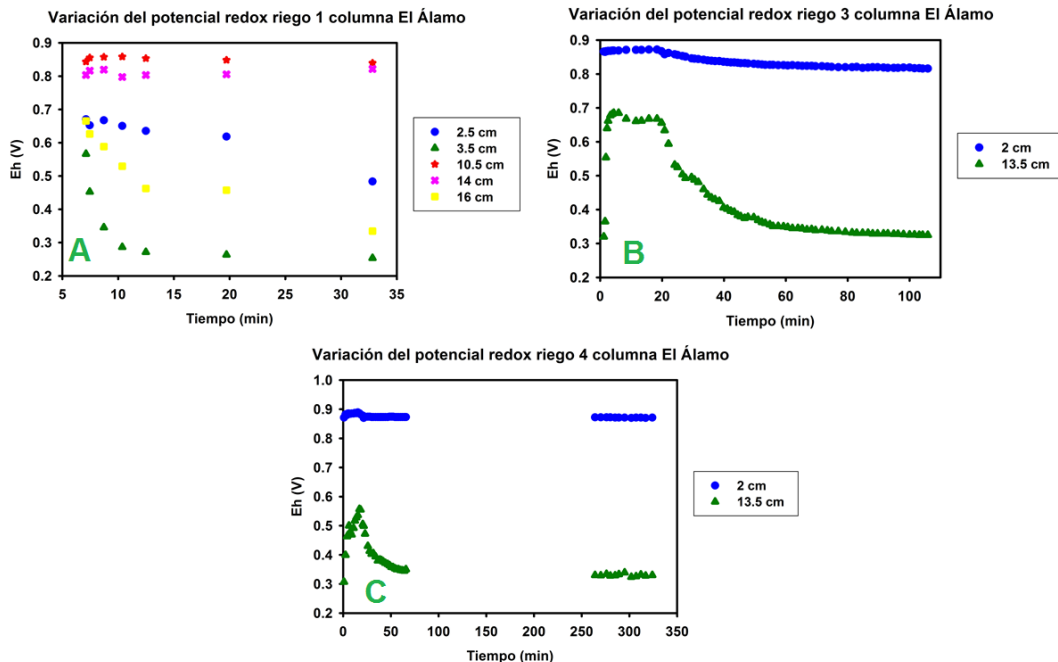


Figura 55. Variación del potencial redox durante el primer (A), segundo (B) y tercer riego (C) con la solución ácida ferrocuprífera en la columna de sedimento El Álamo.



3. Columna de sedimento Chilolo.

La figura 56 muestra el comportamiento del potencial redox (Eh) en la columna de sedimento Chilolo en el transcurso del primer y segundo riego (en este caso se instalaron electrodos redox en ambos riegos debido a que en esta columna solo se aplicó un riego con la solución ácida ferrocuprífera, por lo que se decidieron instalar también en el segundo riego con  $\text{CaCl}_2$ ).

A diferencia de las columnas Tinajas y El Álamo, no se observa una variación importante en el potencial redox en la columna de sedimento Chilolo con el paso del tiempo experimental en las diferentes profundidades analizadas, lo cual puede ser explicado por la poca interacción entre la solución ácida y el sedimento producto de la existencia de fugas en los dos riegos realizados y a su mayor porosidad en relación a las columnas anteriores. Los cambios más perceptibles se observan a las profundidades más superficiales (2 y 4.5 cm) en donde los valores de Eh disminuyen de 0.65 V hasta un mínimo de 0.59 V en el primer riego y de 0.70 a 0.65 V en el segundo riego para la profundidad de 2cm. Por su parte, también se puede observar una disminución (de 0.57 a 0.5V) en el segundo riego a una profundidad de 11cm. Dichas disminuciones del Eh sugieren que los poros fueron visitados por las soluciones lixiviadas en el sedimento a esas profundidades.

Debido a la menor interacción de los lixiviados en la columna, es de esperarse una menor saturación en este sedimento en comparación a las columnas Tinajas y El Álamo, por lo mismo el valor mínimo de Eh fue de 0.43 V a 11cm de profundidad durante el primer riego, lo que implica que nunca se alcanzó el estado de saturación.

Tomando en cuenta las ya mencionadas fugas en la columna durante los dos riegos y la poca interacción entre la solución ácida y los componentes del sedimento, es probable la existencia de pocas reacciones oxidantes y/o reductoras, por lo que el cambio del Eh es mínimo en las diferentes profundidades.

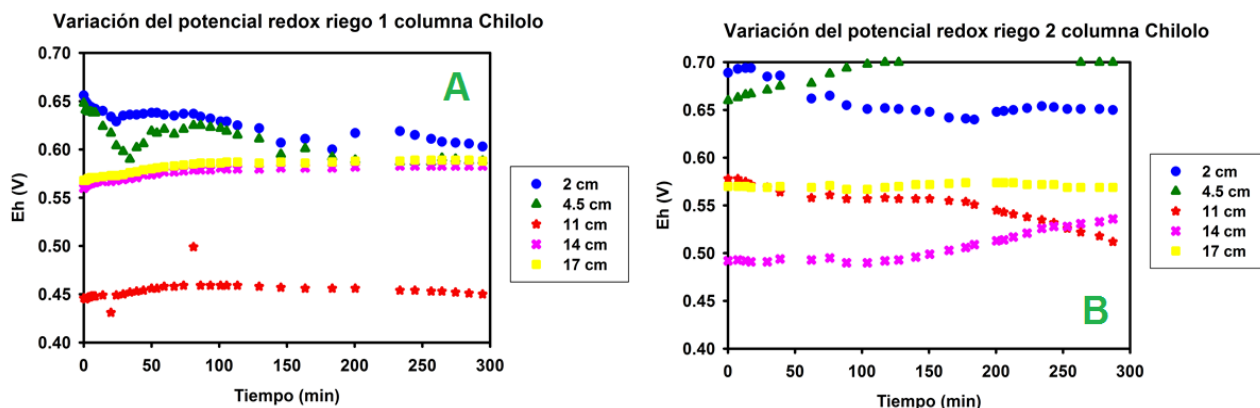


Figura 56. Variación del potencial redox durante el primer (A) y segundo (B) riego en la columna de sedimento Chilolo.

4. Columna de suelo Bacanuchi.

La figura 57 muestra el comportamiento del potencial redox (Eh) en la columna de suelo Bacanuchi durante los tres riegos con la solución ácida ferrocuprífera.

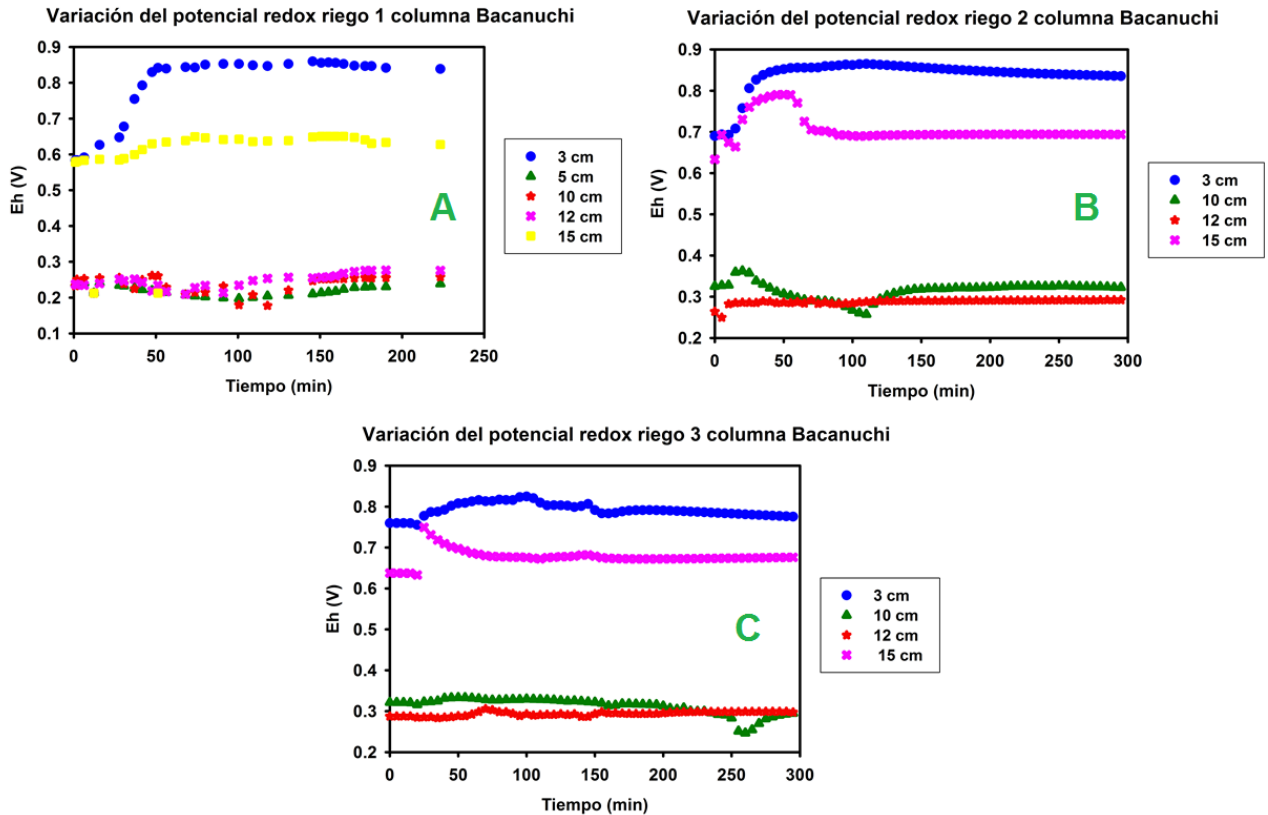


Figura 57. Variación del potencial redox durante el primer (A), segundo (B) y tercer riego (C) con la solución ácida ferrocuprífera en la columna de suelo Bacanuchi.

El potencial redox durante el primer riego varió al iniciar la infiltración de la solución ácida, por alguna razón este aumentó en el electrodo instalado a 3 cm (probablemente relacionado a reacciones de oxidación que promovieron el aumento del Eh), no obstante, en el resto de los electrodos el parámetro mostró una tendencia con ligera variación del Eh. El valor del potencial redox se mantuvo alrededor de 0.6 V en el electrodo instalado a 15 cm de profundidad, mientras que en los electrodos instalados a 5, 10 y 12 cm este se mantuvo alrededor de 0.25 V. Esto último se debe a que en estas profundidades el suelo se mantuvo saturado por más tiempo, reflejándose en una disminución del potencial redox.

En lo que respecta al segundo riego, nuevamente se observa un aumento en el potencial redox a 3cm de profundidad, desde 0.7V hasta 0.87 V, a pesar de que la tendencia difiere a lo que se esperaría del comportamiento del Eh (probablemente al pasar los primeros volúmenes de solución a esta profundidad, el flujo por gravedad se movió rápidamente hacia la parte baja de la columna) es factible la presencia de componentes que facilitan la oxidación del sistema a esa profundidad. A pesar de ello, se observa un comportamiento

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

sin cambios importantes en el Eh a 10,12 y 15 cm, variando únicamente en los primeros 60 minutos a 15 cm, sin cambiar después de este tiempo. La poca variación del potencial redox sugiere un flujo constante sin llegar a saturar los poros del suelo y debido a que solo se aplicó un volumen de poro en la columna, el volumen del líquido no fue suficiente para sobresaturar todos los poros de la columna (esto último provocaría potenciales redox muy bajos).

Finalmente, en el tercer riego se tiene un comportamiento idéntico en relación al segundo riego, mostrando el aumento del Eh a 3 cm (aunque en menor magnitud) y pocos cambios del mismo a 10, 12 y 15 cm (lo que implica un flujo constante del lixiviado).

Las variaciones del potencial redox se mantienen entre 0.85 y 0.19 V, lo cual representa el cambio de una situación bien aireada a pobremente aireada. No se observa la disminución de Eh hasta valores negativos, esto significa que la columna de suelo Bacanuchi nunca se encontró en condiciones de saturación.

### **Significado “físico” de los valores de Eh observados en las columnas considerando los EPT:**

Dado que la simulación de la lixiviación de la solución ácida ferrocuprífera en las columnas de la parte alta de la cuenca del río Sonora involucra altas concentraciones de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn y sulfatos, los cambios ocurridos en el Eh durante los riegos pueden influir en la ocurrencia de reacciones de óxido/reducción de estos elementos, las cuales se ilustran en la tabla 28. En dicha tabla se muestran las reacciones de cada uno de los EPT antes mencionados y el potencial normal (V) en donde ocurren dichas reacciones. Con base en la información de la tabla y tomando en cuenta que el potencial redox en todas las columnas en diferentes profundidades varía entre 0.9 y 0.2 V, las reacciones posibles son las siguientes:

a) Arsénico:  $\text{H}_3\text{AsO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_3\text{AsO}_3 + \text{H}_2\text{O}$  (0.57 V) → (Reacción 1).

$\text{H}_3\text{AsO}_3 + 3\text{H}^+ + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{As(s)} + 3\text{H}_2\text{O}$  (0.24 V) → (Reacción 2).

Esto implica que por debajo de 0.57 V y hasta 0.24 V el arsénico debe estar en un estado de oxidación de +3, arriba del valor de 0.57 V la especiación del As es de +5 y por debajo de 0.24 V el arsénico puede solidificarse.

b) Cobre:  $\text{Cu}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Cu(s)}$  (0.51 V) → (Reacción 3).

$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cu(s)}$  (0.34 V) → (Reacción 4).

A 0.51 V ocurre la reducción de  $\text{Cu}^+$  a  $\text{Cu}^0$  y a un valor de 0.34 V el cobre con número de oxidación +2 se reduce a  $\text{Cu}^0$ .

c) Hierro:  $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$  (0.77V) → (Reacción 5).

El hierro con número de oxidación +3 se reduce a  $\text{Fe}^{2+}$  en un potencial normal de 0.77V.

d) Manganeso:  $\text{MnO}_4^- + \text{e}^- \leftrightarrow \text{MnO}_4^{2-}$  (0.56 V) → (Reacción 6).

A un valor de 0.56 V ocurre la reducción de  $\text{Mn}^{7+}$  a  $\text{Mn}^{6+}$ .

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 28. Potenciales redox en reacciones de elementos metálicos.**  
Obtenido del siguiente link: <http://rt000uud.eresmas.net/redox.htm>

Metal	Semireacción	Potencial normal (V)
Aluminio	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{Al(s)}$	-1.67
Arsénico	$\text{H}_3\text{AsO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_3\text{AsO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	0.57
	$\text{H}_3\text{AsO}_3 + 3\text{H}^+ + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{As(s)} + 3\text{H}_2\text{O}$	0.24
Cadmio	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cd(s)}$	-0.4
Cromo	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	1.36
	$\text{Cr}^{3+} + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Cr}^{2+}$	-0.41
	$\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cr(s)}$	-0.91
Cobre	$\text{Cu}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Cu(s)}$	0.51
	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cu(s)}$	0.34
	$\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Cu}^+$	0.16
Hierro	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$	0.77
	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe(s)}$	-0.44
Manganeso	$\text{MnO}_4^- + \text{e}^- \leftrightarrow \text{MnO}_4^{2-}$	0.56
	$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	2.26
	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	1.51
	$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Mn}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.95
	$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Mn(s)}$	-0.2
Plomo	$\text{Pb}^{4+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}^{2+}$	1.69
	$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb(s)}$	-0.14
Zinc	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Zn(s)}$	-0.76
Oxígeno	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.23
	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.68
Azufre	$\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 6\text{e}^- \leftrightarrow \text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$	0.36
	$\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \leftrightarrow \text{S}^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}$	0.15

La tabla 28 refleja la posibilidad de ocurrencia de reacciones de óxido/reducción en cada una de las columnas, lo que implica el cambio en el estado de oxidación de muchos de los elementos presentes en la solución ácida.

Considerando los diferentes valores de potencial redox presentes en cada columna y los valores de pH medidos en los lixiviados colectados en la base de las columnas y en la solución de suelo a diferentes profundidades dentro de las columnas, se realizaron diagramas de Eh vs pH, con el propósito de determinar la forma química de cada EPT analizado. Dichos diagramas se presentan en la siguiente sección.

### 5.3.3 Diagramas Eh vs pH.

La estabilidad de los compuestos metálicos se puede visualizar a través de los diagramas Eh-pH. Conociendo los valores de Eh y pH a lo largo de las columnas, es posible determinar la forma en que los diferentes EPT contenidos en la solución ácida ferrocuprífera pueden presentarse, para entender su mayor o menor movilidad.

Tomando en cuenta que el ion sulfato se encuentra en las cuatro columnas en cantidades importantes debido a su alta concentración soluble en la solución ácida ferrocuprífera, se realizaron también diagramas Eh vs pH para el sulfato en todos los riegos de cada columna. De igual forma, se eligieron diferentes EPT con el fin de tener al menos un diagrama Eh vs pH para cada uno de los elementos analizados en este trabajo (Al, As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn; para el caso del Cd no se realizó ningún diagrama ya que el programa usado no presenta la opción de generar diagramas Eh vs pH para este elemento). Los diagramas fueron realizados con los datos obtenidos en la base de cada columna y al menos en una profundidad donde se haya colectado lixiviado en los lisímetros de succión instalados. Todos los diagramas se realizaron añadiendo la actividad de cada uno de los EPT de interés y de los iones determinados en cada lixiviado (principalmente sulfato, calcio, magnesio, potasio y sodio), la actividad de cada elemento fue calculada por medio del uso del software Visual Minteq.

De igual forma, la temperatura elegida en la realización de los diagramas fue de 20°C, ya que la variación de este parámetro no fue importante en los riegos realizados en las columnas, siendo en promedio 20°C.

Los puntos graficados en los diagramas corresponden a los valores de pH mínimo, pH máximo y pH promedio para cada riego, los cuales se emparejaron con los valores de Eh mínimo, Eh máximo y Eh promedio, que corresponden a los valores de potencial redox (Eh) más cercanos a la profundidad de interés. Los resultados se observan en las siguientes páginas.

#### 1. Columna de suelo Tinajas.

##### A) primer riego (solución ácida ferrocuprífera).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 29. Por su parte, los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 58.

**Tabla 29. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego en la base de la columna Tinajas. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 1, los puntos 4-6 a un Vo de 0.86, los puntos 7-9 a un Vo de 0.10.**

Riego 1. Columna de suelo Tinajas (Base de la columna)									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	2.81	2.81	2.81	2.58	2.58	2.58	2.55	2.55	2.55
Eh a 16 cm (V)	0.34	0.54	0.76	0.34	0.54	0.76	0.34	0.54	0.76

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

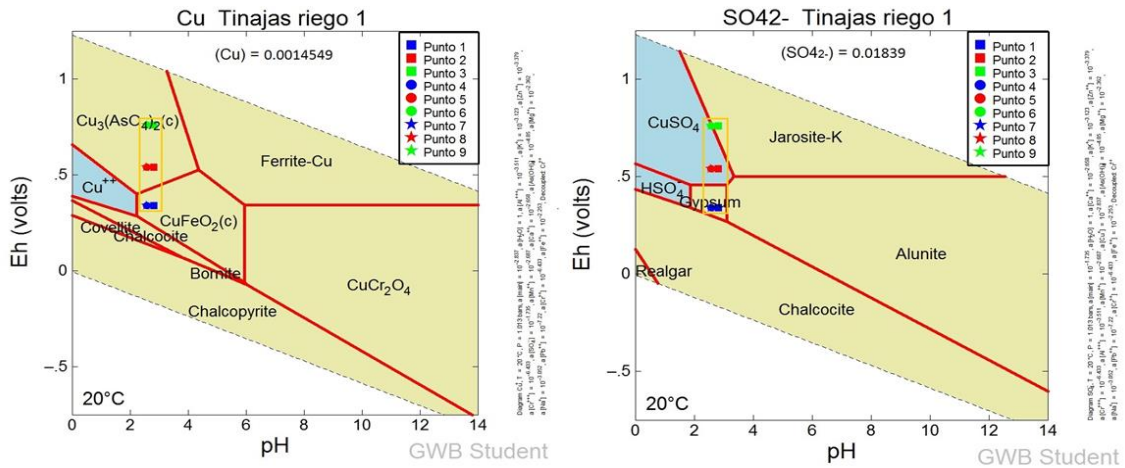


Figura 58. Diagramas Eh vs pH para cobre y sulfato en el primer riego en la base de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

Tomando en cuenta las condiciones de Eh y pH prevaletientes en el primer riego en la base de la columna de suelo Tinajas, es posible decir lo siguiente:

- En lo que respecta al cobre, éste puede estar asociado con el arsénico y el hierro formando los siguientes complejos:  $Cu_3(AsO_4)_2$  y  $CuFeO_2$ .
  - Considerando el diagrama Eh vs pH para el sulfato, en las condiciones más oxidantes ( $Eh=0.76$ ) es posible la formación del mineral jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ), el cual es un mineral que tiende a formarse en ambientes de pH ácido (1.5–3) y con altas concentraciones de sulfato (>3000 mg/L) (Jambor, 1994; Dold, 2002).
  - Tomando en cuenta el diagrama para el sulfato, en las condiciones más reductoras que se tienen en este sistema ( $Eh = 0.34$ ) es posible la formación de yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), el cual precipita en presencia de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) y calcio ( $Ca^{2+}$ ) por medio de la siguiente reacción:  $Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (Reacción 7).
- A diferentes profundidades: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 30 y los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 59.

Tabla 30. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego a 3 y 10 cm en la columna Tinajas. Los puntos a 3cm corresponden a un Vo de 0.38. Los puntos a 10 cm a un Vo de 0.14.

Riego 1. Columna de suelo Tinajas a diferentes profundidades			
Profundidad: 3 cm			
Puntos	1	2	3
pH	2.57	2.57	2.57
Eh a 2.5 cm (V)	0.63	0.67	0.71
Profundidad: 10 cm			
Puntos	1	2	3
pH	2.70	2.70	2.70
Eh a 10.5 cm (V)	0.61	0.65	0.76

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

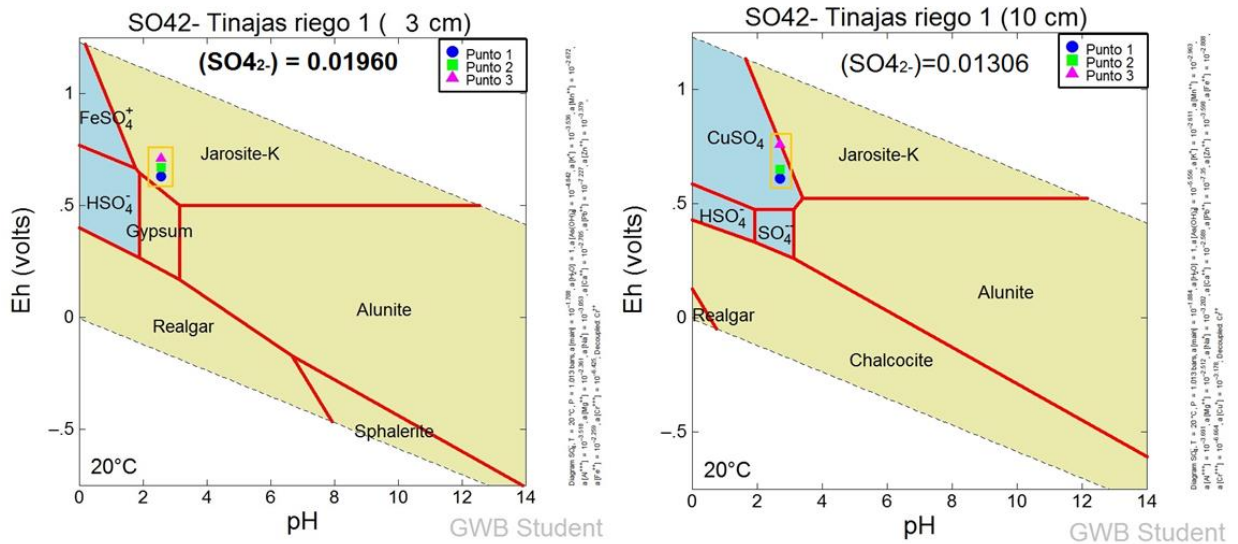


Figura 59. Diagramas Eh vs pH para sulfato en el primer riego a 3 y 10 cm de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

Como se observa en la figura 59, en ambas columnas existen las condiciones de Eh y pH para la formación del mineral jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ) tanto a los 3 como a los 10 cm de profundidad.

B) Segundo riego (Solución de  $CaCl_2$ ).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 31. Por su parte, los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 60.

Tabla 31. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el segundo riego en la base de la columna Tinajas. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 1.05, los puntos 4-6 a un Vo de 0.92, los puntos 7-9 a un Vo de 0.74.

Riego 2. Columna de suelo Tinajas									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	3.31	3.31	3.31	3.26	3.26	3.26	2.28	2.28	2.28
Eh a 16 cm (V)	0.34	0.54	0.76	0.34	0.54	0.76	0.34	0.54	0.76

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

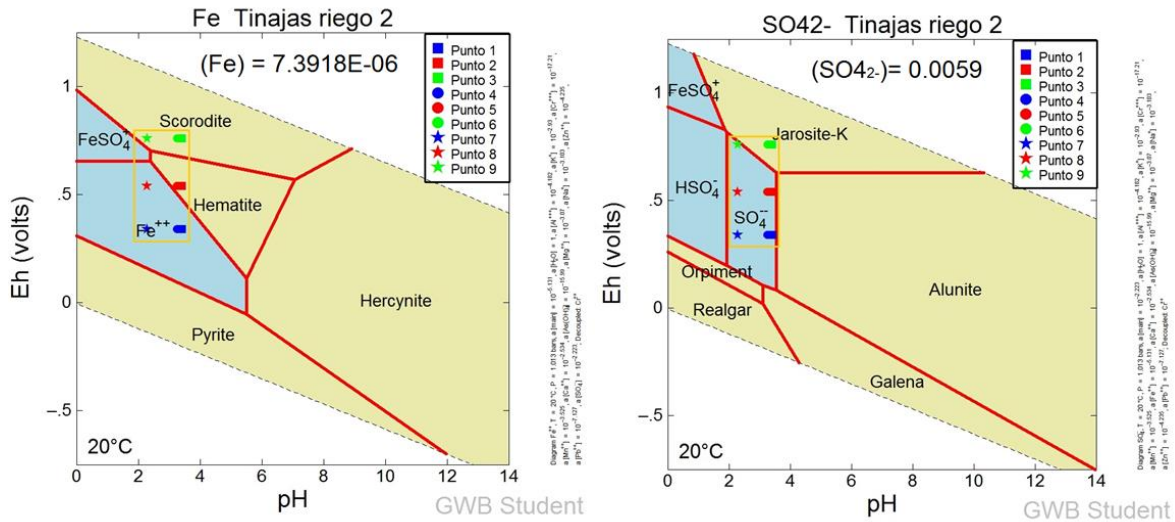


Figura 60. Diagramas Eh vs pH para hierro y sulfato en el segundo riego en la base de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

Considerando la figura 60, se puede mencionar lo siguiente:

- Tomando en cuenta las condiciones de potencial redox de 0.34 V, el hierro se encontraría como una especie soluble (las especies solubles se muestran en color azul) en los 3 valores de acidez que varían desde 2.28 hasta 3.31 unidades.
- A un valor de Eh de 0.54 V y pH igual a 3.26 y 3.31 unidades es posible la formación del mineral de hierro hematita ( $Fe_2O_3$ ).
- En las condiciones más oxidantes ( $Eh = 0.76 V$ ), es posible que el hierro precipite como escorodita ( $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$ ), mineral de origen secundario producto de la oxidación del mineral pirita.
- En lo que respecta al sulfato, en todos los puntos graficados se observa que las condiciones promueven que se encuentre soluble, sin embargo, en condiciones más oxidantes (0.76 V) es factible la formación de jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ).

C) Tercer riego (solución ácida ferrocuprífera).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 32, por su parte, los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 61.

Tabla 32. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el tercer riego en la base de la columna Tinajas. Los puntos 1-3 corresponden a un  $V_o$  de 0.86, los puntos 4-6 a un  $V_o$  de 0.71, los puntos 7-9 a un  $V_o$  de 0.53.

Riego 3. Columna de suelo Tinajas									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	2.69	2.69	2.69	2.49	2.49	2.49	2.44	2.44	2.44
Eh a 16 cm (V)	0.72	0.82	0.85	0.72	0.82	0.85	0.72	0.82	0.85



CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

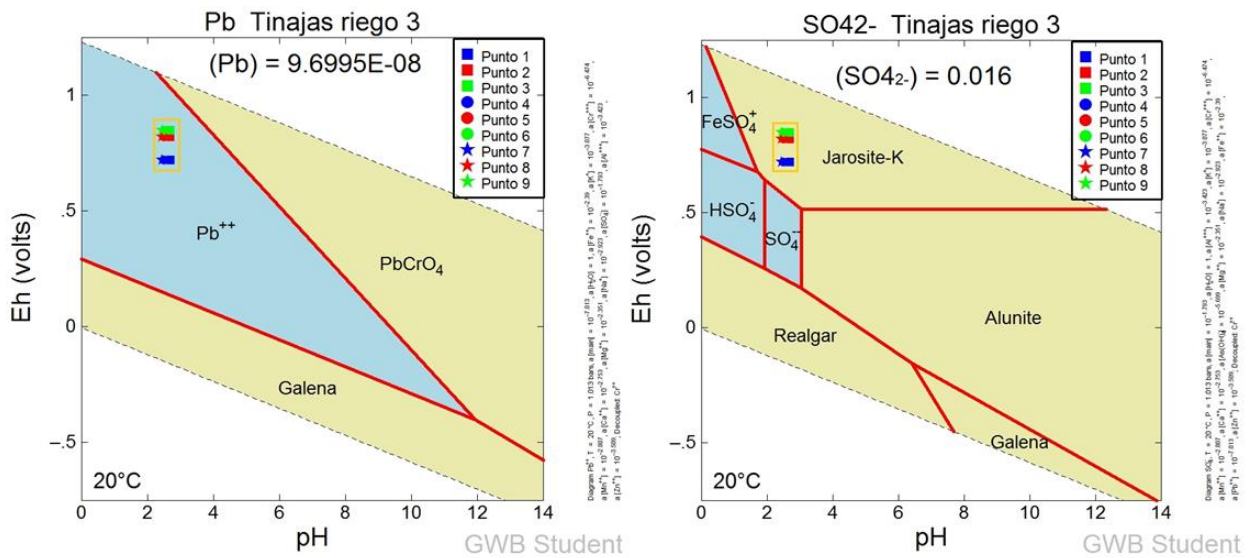


Figura 61. Diagramas Eh vs pH para plomo y sulfato en el tercer riego en la base de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

Tomando en cuenta los diagramas Eh vs pH mostrados en la figura 61, es posible mencionar lo siguiente:

- En las condiciones de acidez (pH entre 2.44 y 2.69 unidades) y sin importar las variaciones del potencial redox, el plomo puede encontrarse en forma soluble como  $Pb^{2+}$ . Cabe recordar que las curvas de elución y los balances de masa sugieren que el Pb es el EPT más móvil después de los riegos en esta columna (lo cual concuerda con la figura 61), sin embargo, es importante recordar que es el elemento con la concentración más baja en la solución ácida colectada en campo. Los resultados podrían cambiar si se usara la concentración de Pb vista en la tabla 21 (en donde el Pb es mucho menos móvil, tabla 26), lo cual probablemente reflejaría la estabilidad de fases de Pb no mostradas en la figura 61.
- En lo que respecta al diagrama del sulfato, en los 9 puntos graficados se observa que las condiciones de Eh-pH en el tercer riego favorecerían la formación del mineral jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ).
- A diferentes profundidades: Los puntos graficados en el diagrama Eh vs pH (Figura 62) se muestran en la tabla 33.

Tabla 33. Puntos graficados en el diagrama Eh vs pH para el tercer riego a 16 cm en la columna Tinajas. Los puntos corresponden a un Vo de 0.71.

Riego 3. Columna de suelo Tinajas a diferentes profundidades			
Profundidad: 16 cm			
Puntos	1	2	3
pH	2.52	2.52	2.52
Eh a 16 cm (V)	0.72	0.82	0.85

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

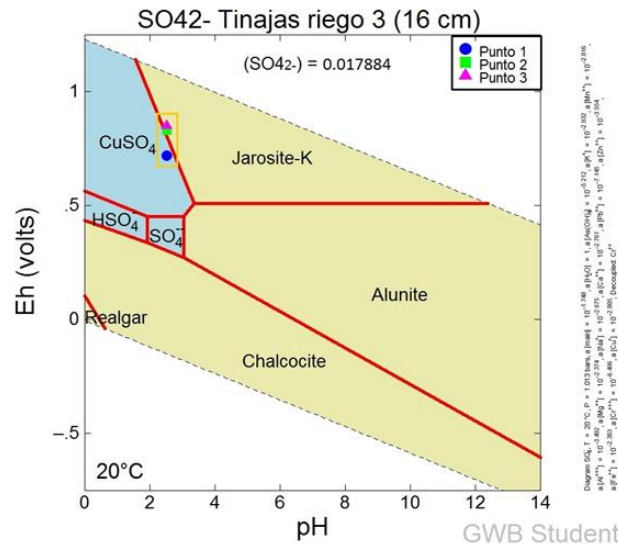


Figura 62. Diagrama Eh vs pH para sulfato en el tercer riego a 16 cm de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L). El cuadro amarillo señala el área donde se ubican los puntos.

Dadas las condiciones de pH y potencial redox (Eh) durante el tercer riego en la columna de suelo Tinajas a 16 cm, el diagrama Eh vs pH (Figura 62) permite inferir la formación del mineral sulfatado jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ).

D) Cuarto riego (solución ácida ferrocuprífera).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 34, por su parte, en la figura 63 se muestran los diagramas Eh vs pH.

Tabla 34. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el cuarto riego en la base de la columna Tinajas. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 0.71, los puntos 4-6 a un Vo de 0.35, los puntos 7-9 a un Vo de 0.51.

Riego 4. Columna de suelo Tinajas									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	2.62	2.62	2.62	2.51	2.51	2.51	2.47	2.47	2.47
Eh a 16 cm (V)	0.81	0.84	0.85	0.81	0.84	0.85	0.81	0.84	0.85

Considerando los diagramas Eh vs pH para el arsénico y sulfato en la figura 63, es posible mencionar los siguientes puntos:

- En lo que respecta al arsénico, las condiciones en el sistema parecen encontrarse en el límite entre su solubilidad ( $H_2AsO_4^-$ ) y su precipitación como escorodita ( $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$ ).
- Al igual que en todos los riegos anteriores, la posibilidad de formación del mineral jarosita en el cuarto riego es factible, debido a que su estabilidad está relacionada a condiciones oxidantes.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

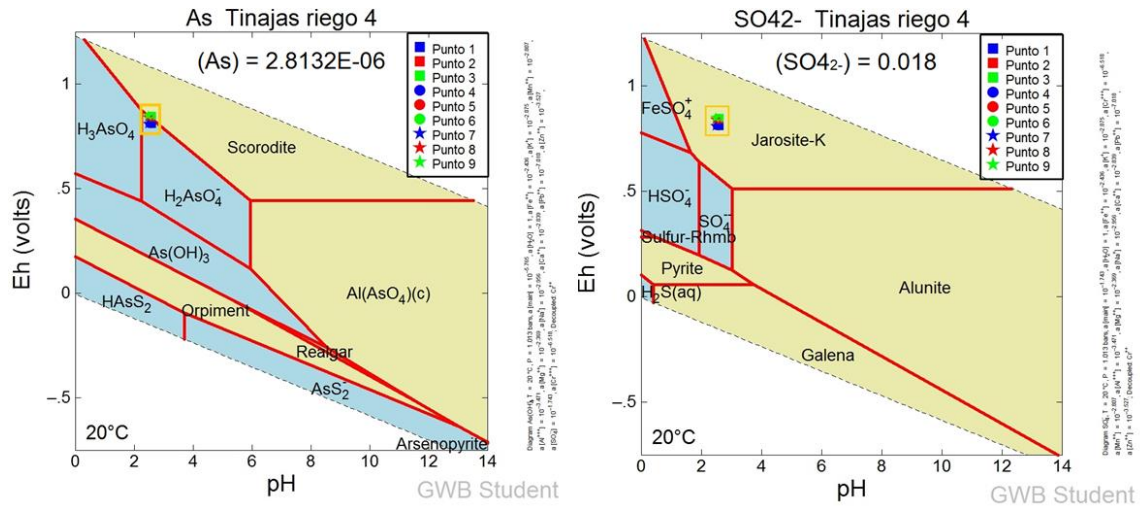


Figura 63. Diagramas Eh vs pH para arsénico y sulfato en el cuarto riego en la base de la columna de suelo Tinajas (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

Considerando todos los diagramas Eh vs pH elaborados en la columna Tinajas se observa que en todos los riegos existen las condiciones para la formación del mineral jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), tanto en la base como a diferentes profundidades. Esto se facilitaría debido a las altas concentraciones de sulfato en la solución ácida ferrocuprífera añadida y a la retención del mismo en la columna después de todos los riegos (ver Figura 36) lo que probablemente se debe a la formación de precipitados sulfatados. De igual forma, en el primer riego se observan condiciones para la formación de otro sulfato, en este caso yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Tanto en el segundo como en el cuarto riego se observan condiciones favorables para la formación del mineral escorodita ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Como se observa en las figuras 34 y 35, este suelo presenta características para la retención en diferentes proporciones de los diferentes EPT estudiados. Es posible decir que tanto en la base como a diferentes profundidades existen las condiciones de estabilidad de varias fases minerales después de la interacción entre la solución ácida y el suelo (tal como se observa en los diagramas Eh-pH).

2. Columna de sedimento El Álamo.

A) primer riego (solución ácida ferrocuprífera).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 35, por su parte, los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 64.

Tabla 35. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego en la base de la columna El Álamo. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 0.02, los puntos 4-6 a un Vo de 0.24, los puntos 7-9 a un Vo de 0.73.

Riego 1. Columna de sedimento El Álamo									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	3.03	3.03	3.03	2.49	2.49	2.49	2.4	2.4	2.4
Eh a 16 cm (V)	0.33	0.52	0.67	0.33	0.52	0.67	0.33	0.52	0.67

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

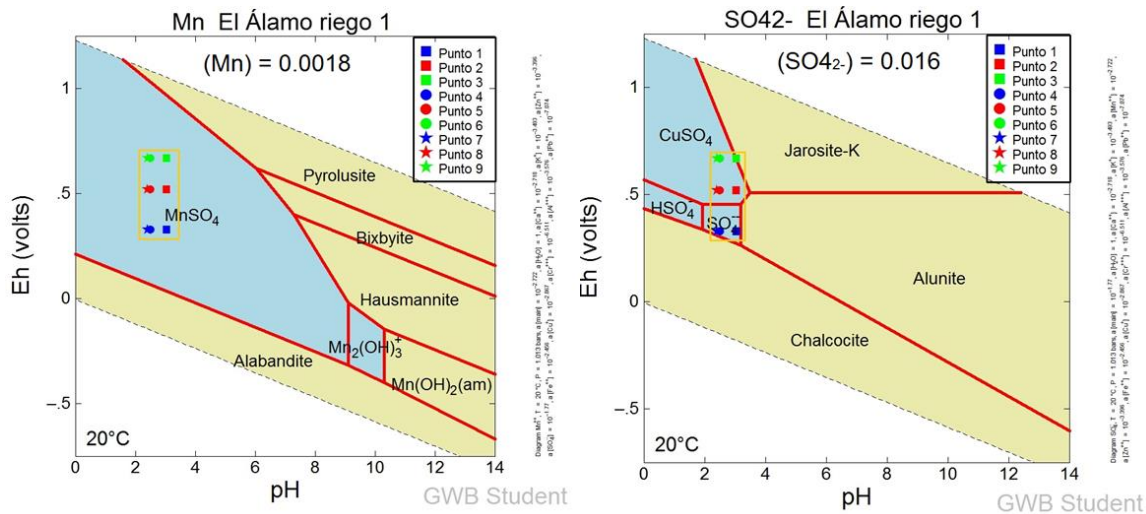


Figura 64. Diagramas Eh vs pH para manganeso y sulfato en el primer riego en la base de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

Tomando en cuenta los diagramas Eh vs pH para el primer riego de la columna El Álamo (Figura 64), es posible mencionar los siguientes puntos:

- Considerando los valores de pH y Eh presentes en el primer riego, el manganeso puede encontrarse como una especie soluble ( $MnSO_4$ ), lo cual concuerda debido a que es el EPT menos retenido en esta columna (sin considerar el caso del Pb).
  - Se puede observar que en el punto 3 para el diagrama del sulfato (que corresponde a valores de pH igual a 3.03 y Eh igual a 0.67 V) es posible la precipitación del sulfato en el mineral jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ). Por su parte, los restantes puntos evidencian que el sulfato puede encontrarse como una especie soluble, en la forma de ion libre ( $SO_4^{2-}$ ) y como sulfato de cobre ( $CuSO_4$ ).
- A diferentes profundidades: Los puntos graficados en los diagramas Eh vs pH se muestran en la tabla 36 y los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 65.

Tabla 36. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego a 3 y 15 cm en la columna El Álamo. Los puntos a 3 cm corresponden a un Vo de 0.07, los puntos a 15 cm a un Vo de 0.71.

Riego 1. Columna de sedimento El Álamo a diferentes profundidades			
<b>Profundidad: 3 cm</b>			
<b>Puntos</b>	1	2	3
<b>pH</b>	2.65	2.65	2.65
<b>Eh a 3.5 cm (V)</b>	0.25	0.35	0.57
<b>Profundidad: 15 cm</b>			
<b>Puntos</b>	1	2	3
<b>pH</b>	2.59	2.59	2.59
<b>Eh a 14 cm (V)</b>	0.8	0.81	0.82

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

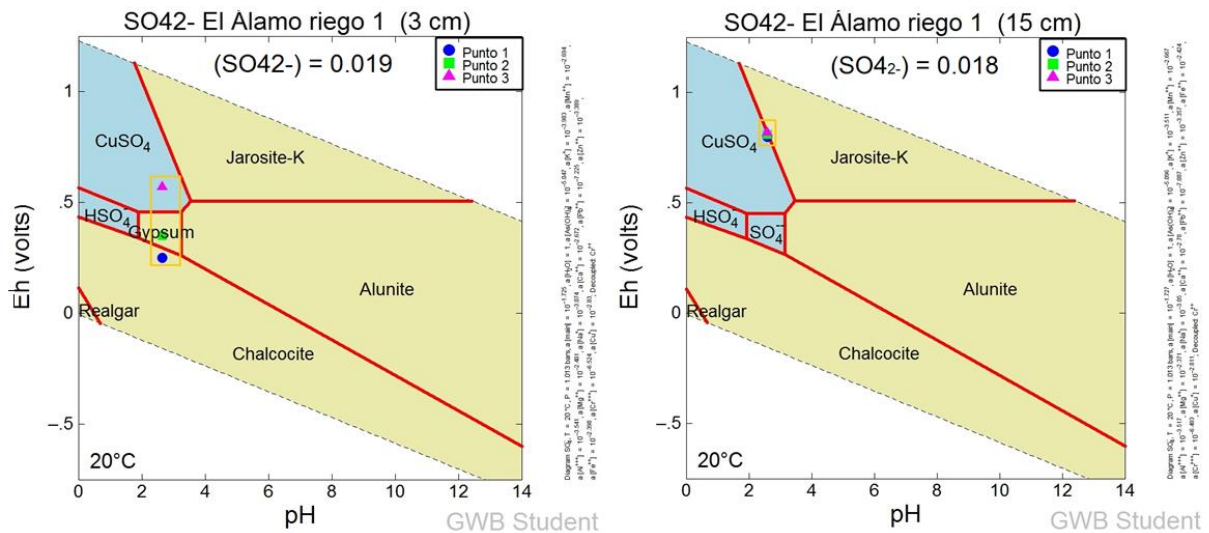


Figura 65. Diagramas Eh vs pH para sulfato en el primer riego a 3 y 15 cm de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

Considerando el diagrama Eh vs pH a 3 cm de profundidad (Figura 65), es posible observar que a un valor de Eh de 0.25 V el sulfato puede encontrarse en la forma mineral calcosina ( $Cu_2S$ ). Por su parte, a un valor de 0.35 V es posible la formación de yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). Finalmente, en las condiciones más oxidantes (0.57 V) el sulfato puede hallarse en forma soluble como sulfato de cobre ( $CuSO_4$ ).

En lo que respecta a una profundidad de 15 cm, dadas las condiciones de potencial redox que oscilan entre 0.8 y 0.82 V, el diagrama Eh vs pH muestra que el sulfato puede encontrarse soluble ( $CuSO_4$ ) o bien en la fase mineral jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ).

B) Segundo riego ( $CaCl_2$ ).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 37, por otra parte, los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 66.

Tabla 37. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el segundo riego en la base de la columna El Álamo. Los puntos 1-3 corresponden a un  $V_o$  de 1.01, los puntos 4-6 a un  $V_o$  de 0.57, los puntos 7-9 a un  $V_o$  de 0.14.

Riego 2. Columna de sedimento El Álamo									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	3.4	3.4	3.4	3.29	3.29	3.29	3.04	3.04	3.04
Eh a 16 cm (V)	0.33	0.52	0.67	0.33	0.52	0.67	0.33	0.52	0.67

Como se observa en la figura 66, tanto el aluminio como el sulfato se pueden encontrar en forma soluble en las condiciones de pH y Eh presentes, en forma de  $AlSO_4^+$  y  $SO_4^{2-}$ , respectivamente.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

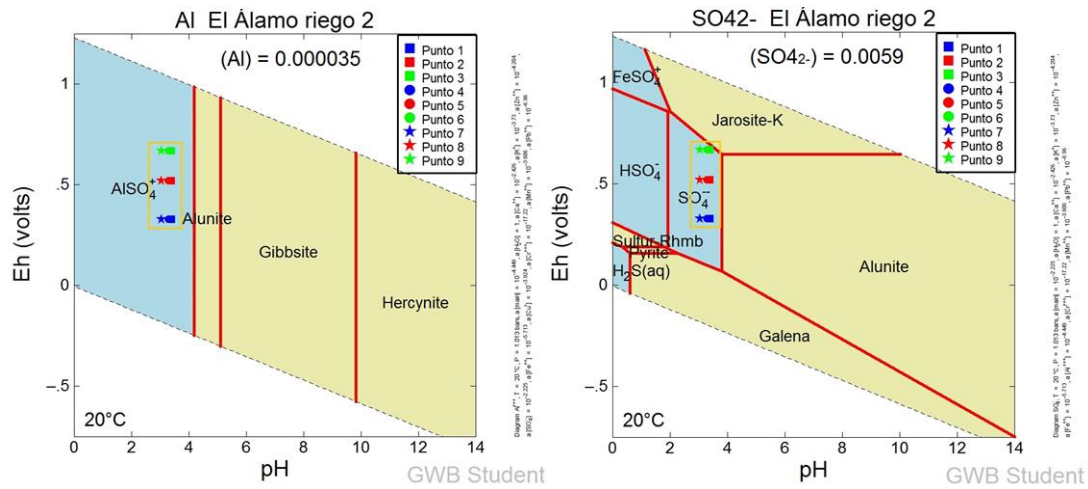


Figura 66. Diagramas Eh vs pH para Al y sulfato en el segundo riego en la base de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

C) Tercer riego (solución ácida ferrocuprífera).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 38, por su parte, los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 67.

Tabla 38. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el tercer riego en la base de la columna El Álamo. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 0.02, los puntos 4-6 a un Vo de 0.27, los puntos 7-9 a un Vo de 0.71.

Riego 3. Columna de sedimento El Álamo									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	2.88	2.88	2.88	2.53	2.53	2.53	2.43	2.43	2.43
Eh a 13.5 cm (V)	0.32	0.43	0.69	0.32	0.43	0.69	0.32	0.43	0.69

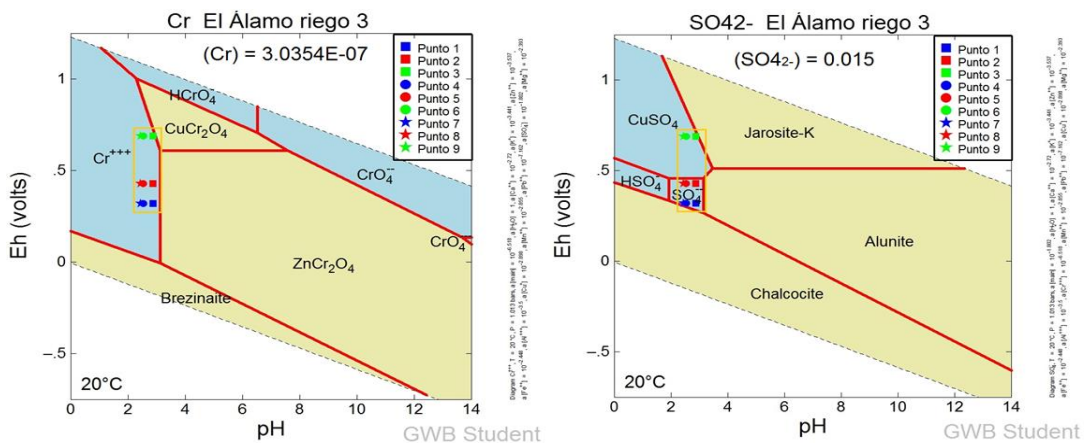


Figura 67. Diagramas Eh vs pH para cromo y sulfato en el tercer riego en la base de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

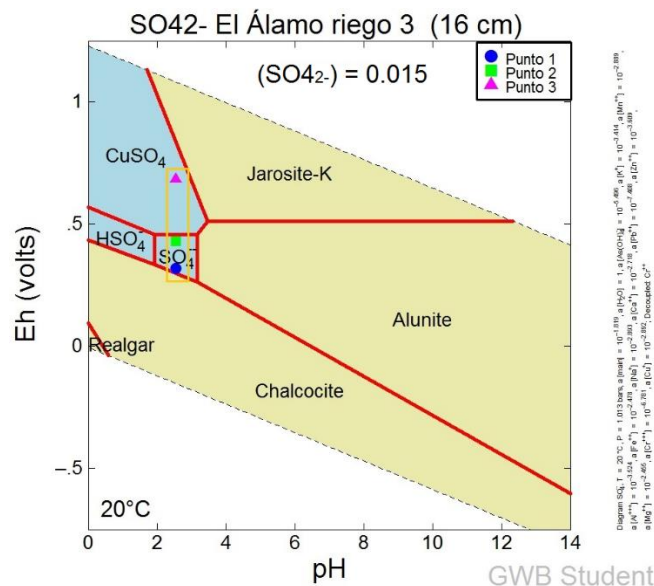
**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

Tomando en cuenta los diagramas Eh vs pH mostrados en la figura 67, es posible mencionar:

- Considerando que el pH varía entre 2.43 y 2.88 unidades, y que el potencial redox oscila entre 0.32 y 0.69 V, el Cr se encuentra en esas condiciones como cromo soluble ( $\text{Cr}^{3+}$ ), pudiendo estar asociado con el cobre en el punto 3 (pH = 2.88, Eh = 0.69 V) en la especie  $\text{CuCr}_2\text{O}_4$ .
  - En lo que respecta al sulfato, dadas las condiciones de acidez y potencial redox en el tercer riego de la columna de sedimento El Álamo, este se puede encontrar soluble como  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{CuSO}_4$ , pudiéndose formar el mineral jarosita en el escenario de mayor potencial redox (0.69 V) y mayor pH (2.88 unidades) (punto 3 de la figura 67).
- A diferentes profundidades: Los puntos graficados en el diagrama Eh vs pH (Figura 68) se muestran en la tabla 39.

**Tabla 39. Puntos graficados en el diagrama Eh vs pH para el tercer riego a 16 cm en la columna El Álamo. Los puntos corresponden a un  $V_o$  de 0.45.**

Riego 3. Columna de sedimento El Álamo a diferentes profundidades			
Profundidad: 16 cm			
Puntos	1	2	3
pH	2.55	2.55	2.55
Eh a 13.5 cm (V)	0.32	0.43	0.69



**Figura 68. Diagrama Eh vs pH para sulfato en el tercer riego a 16 cm de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L). El cuadro amarillo señala el área donde se ubican los puntos.**

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

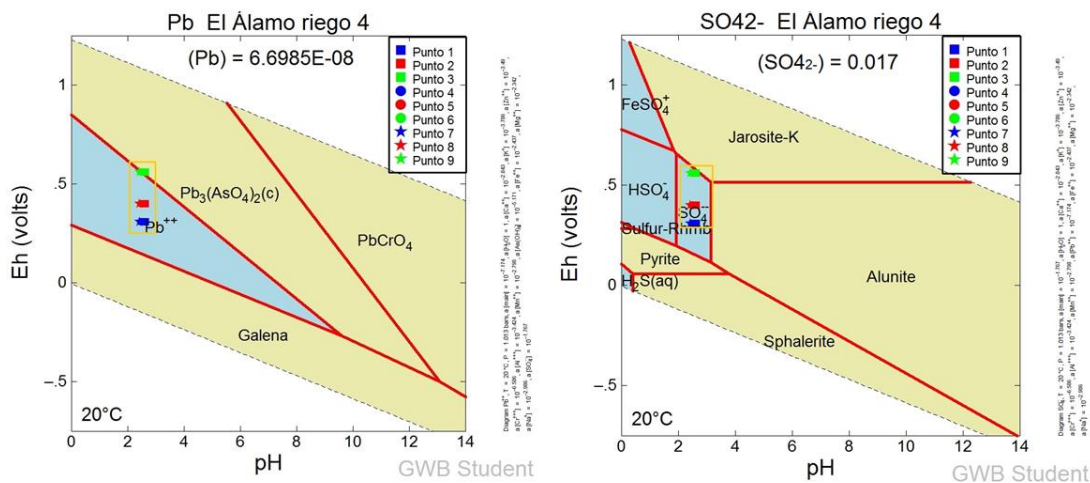
Dadas las condiciones de pH y potencial redox (Eh) durante el tercer riego en la columna de sedimento El Álamo a 16cm de profundidad, el diagrama Eh vs pH (Figura 68) permite inferir que el sulfato se encuentra soluble en la forma  $\text{SO}_4^{2-}$  en los valores de Eh igual a 0.32 y 0.43 V y como  $\text{CuSO}_4$  a un Eh de 0.69 V.

D) Cuarto riego (solución ácida ferrocuprífera).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 40, por su parte, en la figura 69 se muestran los diagramas Eh vs pH para el cuarto riego en la columna de sedimento El Álamo.

**Tabla 40. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el cuarto riego en la base de la columna El Álamo. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 0.05, los puntos 4-6 a un Vo de 0.29, los puntos 7-9 a un Vo de 0.69.**

Riego 4. Columna de sedimento El Álamo									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	2.63	2.63	2.63	2.47	2.47	2.47	2.41	2.41	2.41
Eh a 13.5 cm (V)	0.31	0.4	0.56	0.31	0.4	0.56	0.31	0.4	0.56



**Figura 69. Diagramas Eh vs pH para plomo y sulfato en el cuarto riego en la base de la columna de sedimento El Álamo (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.**

Considerando los diagramas Eh vs pH para el plomo y sulfato en la figura 69, es posible mencionar los siguientes puntos:

- Tomando en cuenta las condiciones de Eh mínimas y Eh promedio (0.31 y 0.40 V, respectivamente), el plomo podría encontrarse de forma soluble como  $\text{Pb}^{2+}$ , sin embargo, puede relacionarse con el arsénico en un potencial más oxidante (Eh = 0.56 V), formando el complejo  $\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$ .
- Para el sulfato, dadas las condiciones en el sistema, es factible que se encuentre como  $\text{SO}_4^{2-}$  libre, o bien precipitar como jarosita en las condiciones más oxidantes de este riego (0.56 V).



## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

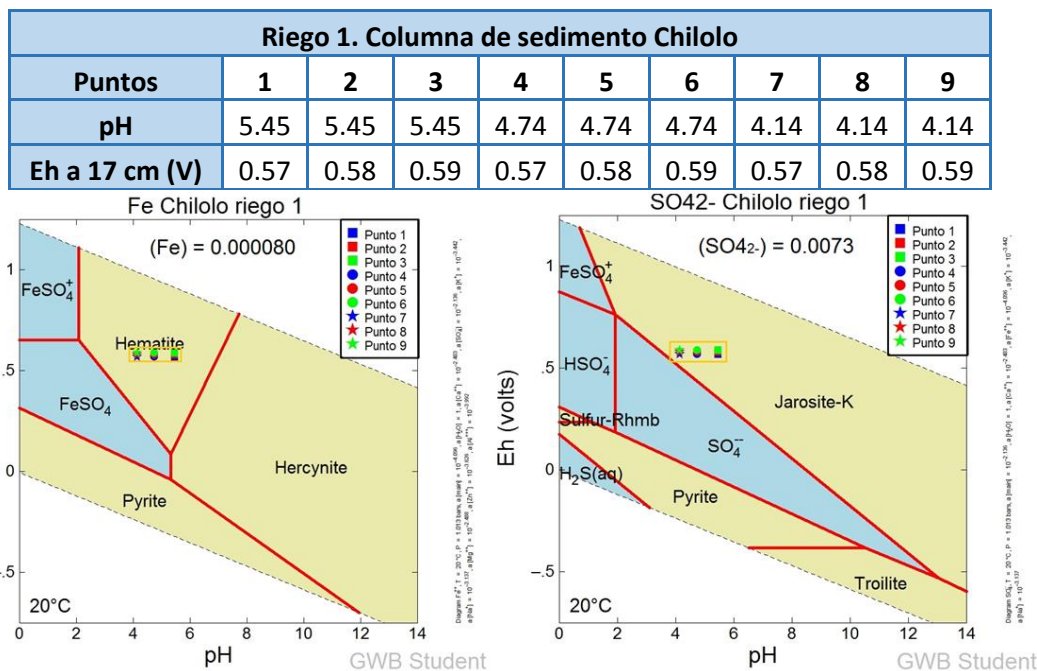
Al igual que en la columna de suelo Tinajas, la columna de sedimento El Álamo presenta la capacidad de retener a los EPT en diferentes proporciones tanto en la base como a diferentes profundidades. Esta retención puede deberse a fenómenos de sorción o bien, a la precipitación de fases minerales capaces de retener a los EPT presentes en la solución ácida. Los diagramas de Eh-pH realizados en esta columna permiten inferir condiciones para la estabilidad de algunas fases en donde se presentan algunos de los EPT. En lo que respecta al sulfato, se observó la capacidad de este sedimento para retenerlo en diferentes proporciones (ver Figura 41) dicha retención se puede asociar a la formación de minerales como yeso o jarosita, ya que se observó que la columna presenta las condiciones de Eh-pH para su formación en el primer riego para el yeso y en el primer, tercer y cuarto riego tanto en la base como en diferentes profundidades para la jarosita.

### 3. Columna de sedimento Chilolo.

#### A) primer riego (solución ácida ferrocuprífera).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 41, por su parte, en la figura 70 se muestran los diagramas Eh vs pH para el primer riego en la columna de sedimento Chilolo.

**Tabla 41. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego en la base de la columna Chilolo. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 0.008, los puntos 4-6 a un Vo de 0.11, los puntos 7-9 a un Vo de 0.30.**



**Figura 70. Diagramas Eh vs pH para hierro y sulfato en el primer riego en la base de la columna de sedimento Chilolo (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.**

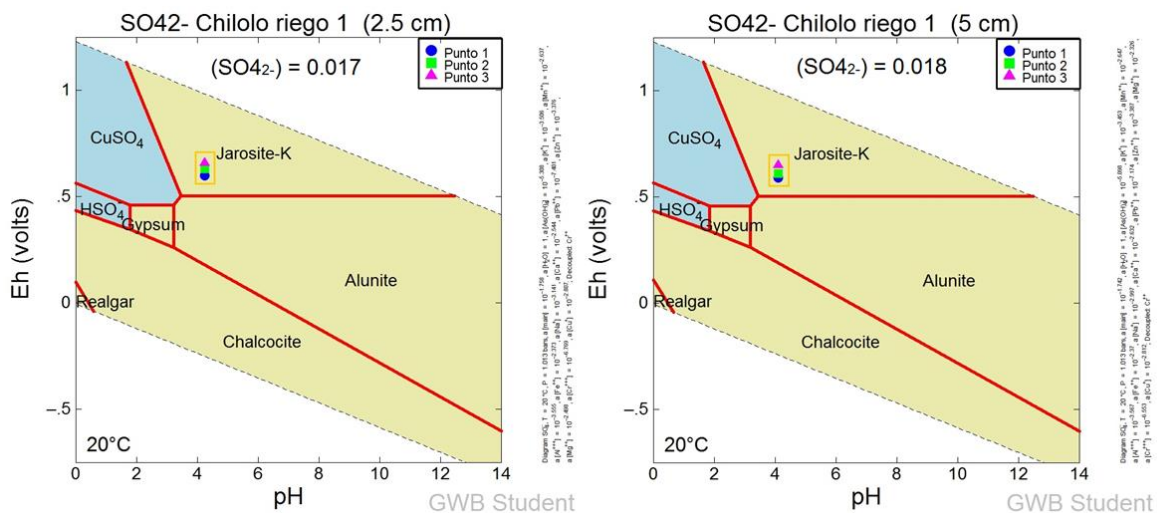
**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

Dadas las condiciones de pH y potencial redox (Eh) durante el primer riego en la columna de sedimento Chilolo, el diagrama Eh vs pH (Figura 70) permite inferir que el hierro puede precipitar como hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), mineral estable en condiciones oxidantes. Por su parte, en lo que corresponde al sulfato, se observa en el diagrama la posible precipitación del mineral jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ).

- A diferentes profundidades: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 42 y los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 71.

**Tabla 42. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego a 2.5 y 5 cm en la columna Chilolo. Los puntos a 2.5 cm corresponden a un Vo de 0.04, los puntos a 5 cm a un Vo de 0.07.**

Riego 1. Columna de sedimento Chilolo a diferentes profundidades			
<b>Profundidad: 2.5 cm</b>			
<b>Puntos</b>	1	2	3
<b>pH</b>	4.25	4.25	4.25
<b>Eh a 2 cm (V)</b>	0.6	0.63	0.66
<b>Profundidad: 5 cm</b>			
<b>Puntos</b>	1	2	3
<b>pH</b>	4.1	4.1	4.1
<b>Eh a 4.5 cm (V)</b>	0.59	0.61	0.65



**Figura 71. Diagramas Eh vs pH para sulfato en el primer riego a 2.5 y 5 cm de la columna de sedimento Chilolo (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.**

Al igual que como se observó en la base de la columna, también es probable la formación del mineral jarosita en las profundidades de 2.5 y 5cm, tal y como se observa en la figura 71.

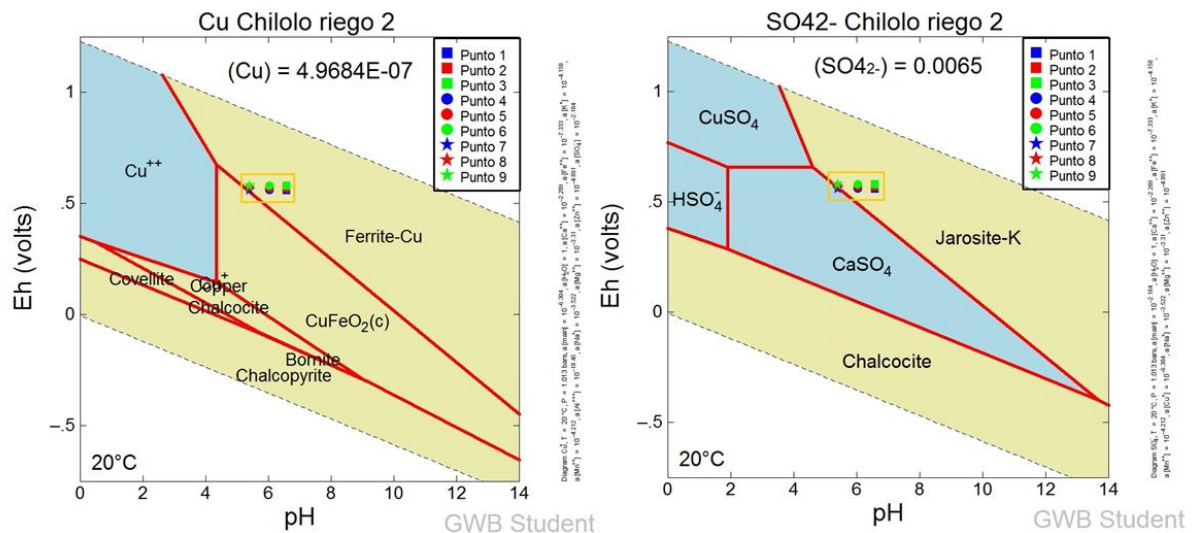
**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**B) Segundo riego (CaCl<sub>2</sub>).**

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 43, por su parte, los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 72.

**Tabla 43. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el segundo riego en la base de la columna Chilolo. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 0.10, los puntos 4-6 a un Vo de 0.057, los puntos 7-9 a un Vo de 0.016.**

Riego 2. Columna de sedimento Chilolo									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	6.57	6.57	6.57	6.03	6.03	6.03	5.4	5.4	5.4
Eh a 17 cm (V)	0.56	0.57	0.58	0.56	0.57	0.58	0.56	0.57	0.58



**Figura 72. Diagramas Eh vs pH para cobre y sulfato en el segundo riego en la base de la columna de sedimento Chilolo (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.**

Considerando la figura 72, se puede mencionar lo siguiente:

- Bajo todos los escenarios que se tienen en el segundo riego de la columna de sedimento Chilolo (pH entre 5.4 y 6.57 unidades, Eh entre 0.56 y 0.58 V), el cobre puede precipitar como una ferrita de cobre, las ferritas son compuestos con propiedades electromagnéticas formados por la combinación del óxido férrico con otros óxidos metálicos (en este caso cobre).
- Tomando en cuenta al sulfato, en todos los puntos graficados en las condiciones de pH y Eh del segundo riego, es posible la precipitación del mineral jarosita.
- A diferentes profundidades: Los puntos graficados en el diagrama Eh vs pH (Figura 73) se muestran en la tabla 44.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tabla 44. Puntos graficados en el diagrama Eh vs pH para el segundo riego a 2.5 cm en la columna Chilolo. Los puntos a 2.5 cm corresponden a un Vo de 0.05.

Riego 2. Columna de sedimento Chilolo a diferentes profundidades			
Profundidad: 2.5 cm			
Puntos	1	2	3
pH	4.5	4.5	4.5
Eh a 2 cm (V)	0.64	0.66	0.69

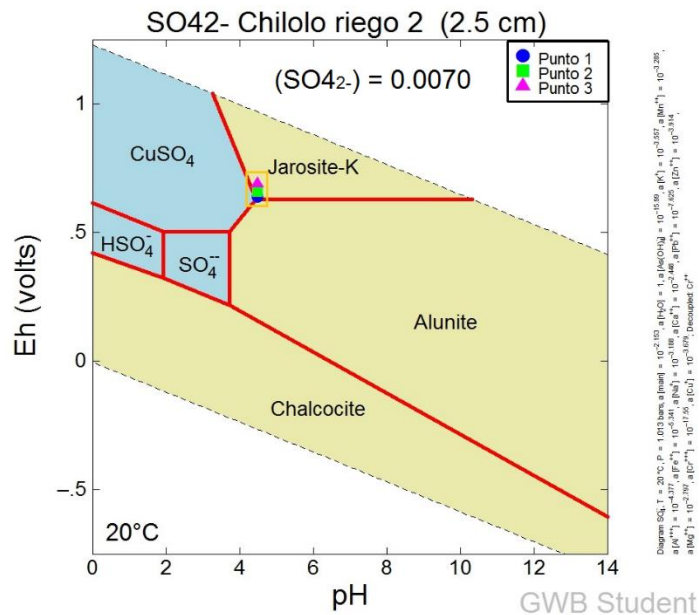


Figura 73. Diagrama Eh vs pH para sulfato en el segundo riego a 2.5 cm de la columna de sedimento Chilolo (actividades en mol/L). El cuadro amarillo señala el área donde se ubican los puntos.

Se observa en el diagrama Eh vs pH de la figura 73 que al igual que en la base de la columna de sedimento Chilolo, durante el segundo riego a una profundidad de 2.5 cm, existen las condiciones para la formación del mineral jarosita.

Ambos riegos presentan las condiciones de Eh y pH para la formación del mineral jarosita tanto en la base como en diferentes profundidades de la columna de sedimento. También se observa la posible formación del mineral hematita y ferritas de cobre en la base para el primer y segundo riego, respectivamente. Como se ha mencionado con anterioridad, esta columna presenta el inconveniente de las fugas durante la realización de ambos riegos, por lo que los lixiviados colectados en la base y a diferentes profundidades no superan los 0.30 volúmenes de poro para el primer riego ni los 0.10 Vo para el segundo, tomando en cuenta esto, existió poco tiempo de interacción entre la solución ácida y el sedimento, no obstante, no se descartan cambios físicos y químicos en la columna durante este tiempo, entre los que podría presentarse la precipitación de fases minerales como la jarosita, tanto en la base como a las profundidades analizadas.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4. Columna de suelo Bacanuchi.

A) primer riego (solución ácida ferrocuprífera).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 45. Por su parte, los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 74.

Tabla 45. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el primer riego en la base de la columna Bacanuchi. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 0.34, los puntos 4-6 a un Vo de 0.55, los puntos 7-9 a un Vo de 0.86.

Riego 1. Columna de suelo Bacanuchi									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	7.53	7.53	7.53	7.11	7.11	7.11	6.47	6.47	6.47
Eh a 15 cm (V)	0.21	0.6	0.65	0.21	0.6	0.65	0.21	0.6	0.65

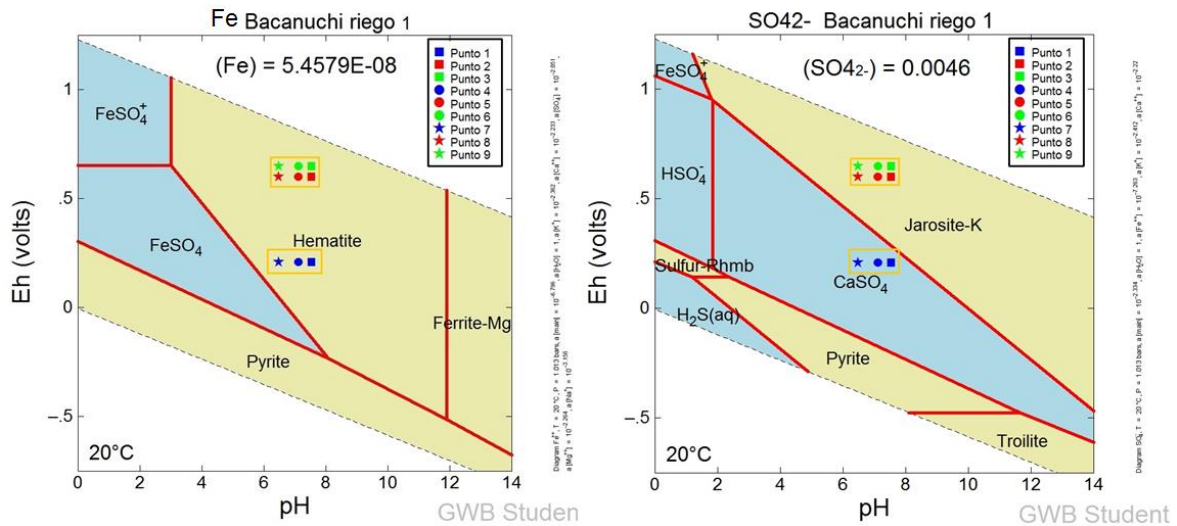


Figura 74. Diagramas Eh vs pH para hierro y sulfato en el primer riego en la base de la columna de suelo Bacanuchi (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

Tomando en cuenta los diagramas Eh vs pH mostrados en la figura 74, es posible mencionar:

- En todos los puntos graficados para el hierro en el primer riego de la columna Bacanuchi, se observan las condiciones de estabilidad para el mineral hematita ( $Fe_2O_3$ ).
- En todos los valores de pH y tomando en cuenta el valor menos oxidante del suelo (0.21 V), el sulfato puede encontrarse en forma soluble como  $CaSO_4$ , sin embargo, es factible la formación del mineral jarosita en las condiciones de Eh igual a 0.6 y 0.65 V.
- A diferentes profundidades: Los puntos graficados en el diagrama Eh vs pH (Figura 75) se muestran en la tabla 46.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tabla 46. Puntos graficados en el diagrama Eh vs pH para el primer riego a 3 cm en la columna Bacanuchi. Los puntos a 3 cm corresponden a un Vo de 0.11.

Riego 1. Columna de suelo Bacanuchi a diferentes profundidades			
Profundidad: 3 cm			
Puntos	1	2	3
pH	4.6	4.6	4.6
Eh a 3 cm (V)	0.59	0.78	0.86

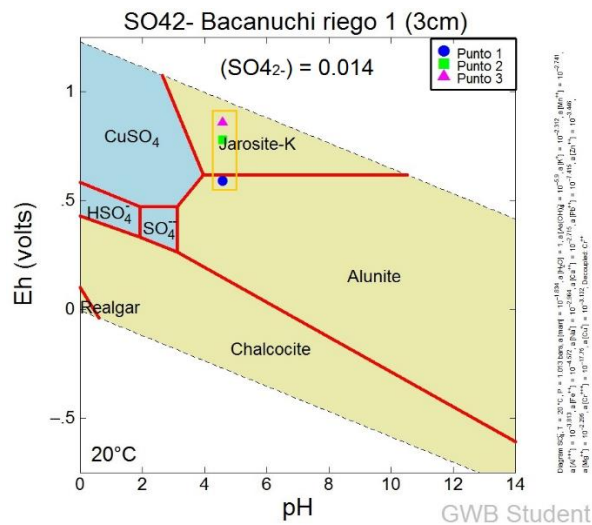


Figura 75. Diagrama Eh vs pH para sulfato en el primer riego a 3 cm de la columna de suelo Bacanuchi (actividades en mol/L). El cuadro amarillo señala el área donde se ubican los puntos.

Al igual que en las columnas anteriores es factible la formación del mineral jarosita, debido a su estabilidad en las condiciones encontradas en este suelo, no obstante, se observa la posible formación del mineral alunita (KAl<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>), cuyo origen es secundario como resultado de reacciones de ácido sulfúrico y rocas con altas concentraciones de Al.

B) segundo riego (solución ácida ferrocuprífera).

- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 47, por su parte, los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 76.

Tabla 47. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el segundo riego en la base de la columna Bacanuchi. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 0.02, los puntos 4-6 a un Vo de 0.43, los puntos 7-9 a un Vo de 0.75.

Riego 2. Columna de suelo Bacanuchi									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	7.36	7.36	7.36	7.16	7.16	7.16	6.9	6.9	6.9
Eh a 15 cm (V)	0.21	0.6	0.65	0.21	0.6	0.65	0.21	0.6	0.65

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

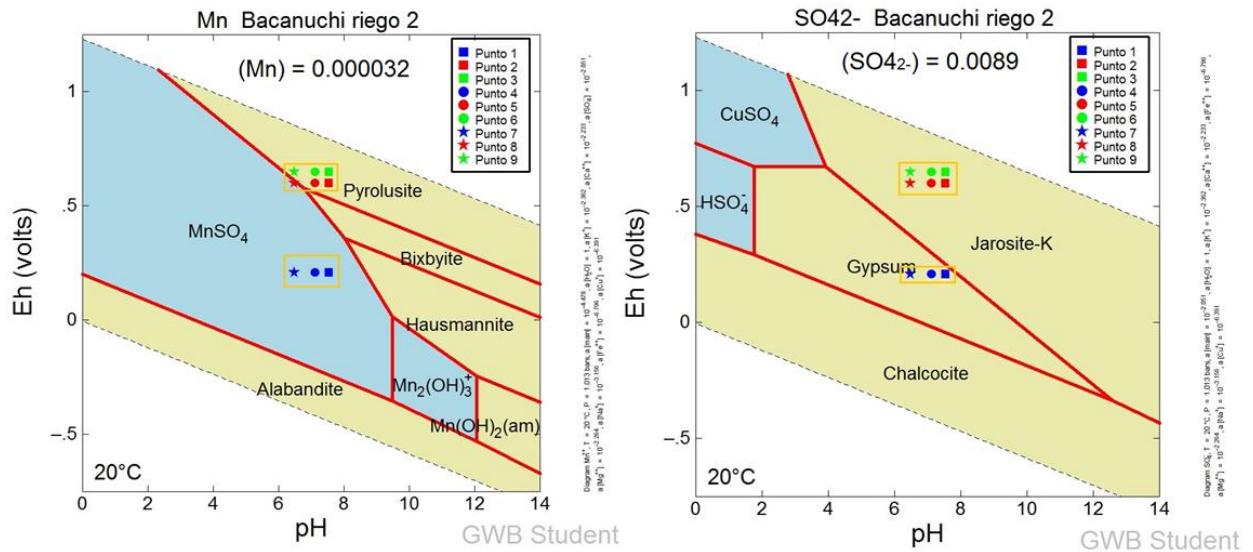


Figura 76. Diagramas Eh vs pH para manganeso y sulfato en el segundo riego en la base de la columna de suelo Bacanuchi (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.

Dadas las condiciones de pH y potencial redox en la base de la columna Bacanuchi durante el segundo riego, es posible mencionar los siguientes puntos:

- En lo que respecta al manganeso, este puede encontrarse asociado al sulfato en forma soluble como  $MnSO_4$  en los valores de Eh igual a 0.21 V. Por su parte, a valores de Eh igual a 0.6 y 0.65 V, es posible la precipitación del mineral pirolusita ( $MnO_2$ ), el cual se presenta como mineral secundario originado por la alteración superficial de minerales de manganeso.
  - Para el sulfato, se puede observar en la figura 76 la posibilidad de formación de dos minerales, el yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) en condiciones más reductoras y jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ) en condiciones más oxidantes.
- A diferentes profundidades: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 48 y los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 77.

Tabla 48. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el segundo riego a 12.5 cm en la columna Bacanuchi. Los puntos a 12.5 cm corresponden a un  $V_o$  de 0.51.

Riego 2. Columna de suelo Bacanuchi a diferentes profundidades			
Profundidad: 12.5 cm			
Puntos	1	2	3
pH	4.78	4.78	4.78
Eh a 12 cm (V)	0.25	0.27	0.29

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

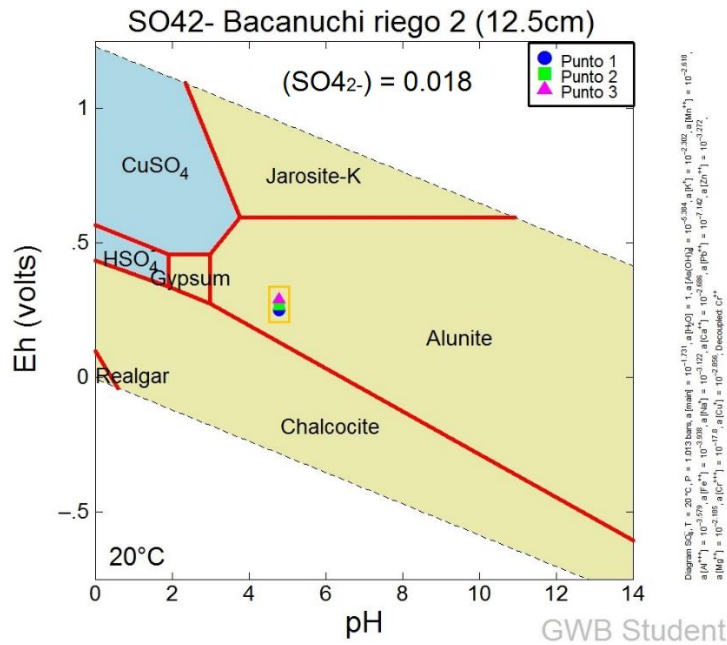


Figura 77. Diagramas Eh vs pH para sulfato en el segundo riego a 12.5 cm de la columna de suelo Bacanuchi (actividades en mol/L). El cuadro amarillo señala el área donde se ubican los puntos.

Como se observa en la figura 77, las condiciones de estabilidad para el sulfato a 12.5 cm de profundidad durante el segundo riego en la columna Bacanuchi pueden estar relacionadas con la formación del mineral alunita ( $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ ).

C) Tercer riego (solución ácida ferrocuprífera).

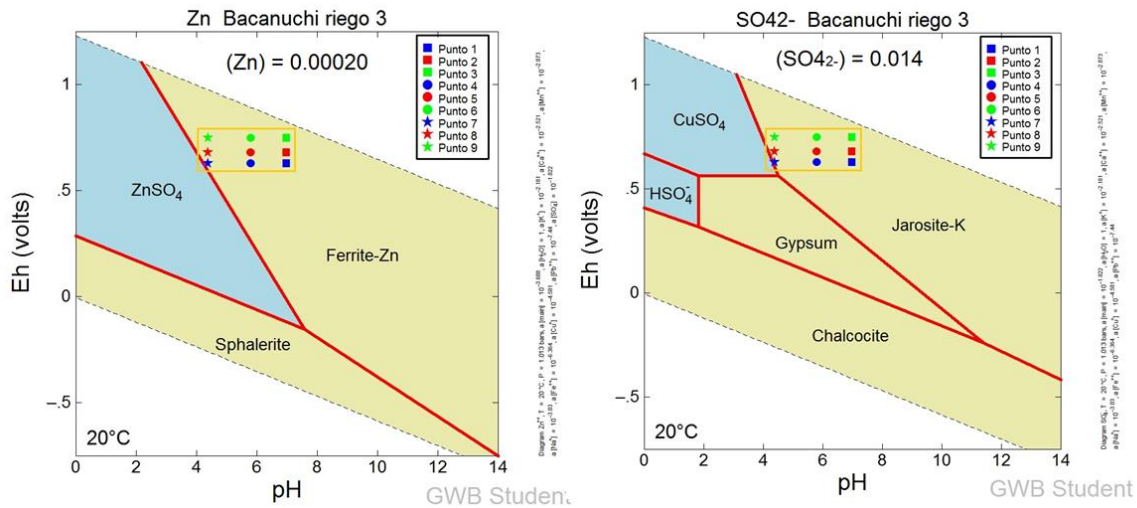
- Base de la columna: Los puntos graficados en los diagramas se muestran en la tabla 49, por su parte, los diagramas Eh vs pH se muestran en la figura 78.

Tabla 49. Puntos graficados en los diagramas Eh vs pH para el tercer riego en la base de la columna Bacanuchi. Los puntos 1-3 corresponden a un Vo de 0.02, los puntos 4-6 a un Vo de 0.45, los puntos 7-9 a un Vo de 0.71.

Riego 3. Columna de suelo Bacanuchi									
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	6.97	6.97	6.97	5.79	5.79	5.79	4.38	4.38	4.38
Eh a 15 cm (V)	0.63	0.68	0.75	0.63	0.68	0.75	0.63	0.68	0.75



## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES



**Figura 78. Diagramas Eh vs pH para zinc y sulfato en el tercer riego en la base de la columna de suelo Bacanuchi (actividades en mol/L). Los cuadros amarillos señalan el área donde se ubican los puntos.**

Tomando en cuenta la figura 78, es posible mencionar:

- Bajo todos los escenarios que se tienen en el tercer riego de la columna de suelo Bacanuchi (pH entre 4.38 y 6.97 unidades, Eh entre 0.63 y 0.75 V), el zinc puede precipitar como una ferrita de zinc, las ferritas como se mencionó anteriormente, son compuestos con propiedades electromagnéticas formados por la combinación del óxido férrico con otros óxidos metálicos (zinc en este caso).
- Para el sulfato, se observa que en todos los escenarios de pH y Eh en este riego, puede darse la formación del mineral jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ).

En el suelo Bacanuchi se observa que dado los diferentes valores de Eh y pH en el sistema, es factible la formación de más fases minerales en comparación al resto de las columnas, esto puede asociarse a la capacidad neutralizadora de este suelo (donde se favorecen condiciones neutras de pH y bajos valores de CE), que favorece que los iones disueltos de la solución ácida ferrocuprífera puedan precipitar en diferentes fases dadas las condiciones favorables de pH. En general, se observa que es factible la formación de minerales como hematita (primer riego), jarosita (primer y segundo riego), alunita (primer y segundo riego), yeso (segundo riego), pirolusita (segundo riego) y ferrita de zinc (tercer riego).

Es importante mencionar que no se tomó en cuenta la cinética de formación de minerales durante los diferentes riegos, sino únicamente la existencia de las condiciones que hacen posible su formación a través de los diagramas Eh vs pH (considerando la estabilidad química de las diferentes especies a determinados valores de Eh y pH para cada columna). Tomando en cuenta esto, se observa que en todos los riegos para todas las columnas existen las condiciones para la formación de minerales durante la interacción de la solución ácida ferrocuprífera con los suelos y sedimentos estudiados, la cual puede relacionarse a fenómenos de precipitación que favorecen la retención de los EPT en las columnas del río Sonora. Los resultados de los diagramas de Eh vs pH permiten decir que el mineral más estable bajo los diferentes escenarios en cada columna es la jarosita, dicho mineral está

relacionado a la presencia de altas concentraciones de sulfatos (el cual es el ion principal en la solución ácida ferrocuprífera).

### **Resumen de resultados obtenidos hasta este punto.**

Los resultados mostrados hasta este punto, demuestran que el suelo Bacanuchi contrasta con el suelo Tinajas y los sedimentos El Álamo y Chilolo, principalmente debido a sus características que le brindan una mayor capacidad de neutralizar la acidez de la solución ácida ferrocuprífera y de retener en mayor proporción a los EPT disueltos en ella, probablemente por fenómenos de precipitación química. Dicha capacidad está relacionada con su mayor contenido de carbonatos en relación a las otras columnas (ver Tabla 17 y 18), lo que le confiere la posibilidad de neutralizar la acidez. Por otro lado, se trata del suelo con la mayor proporción de arcillas (texturalmente hablando) hasta en un 12.9% (ver Tabla 14) lo cual se relaciona a una superficie específica de hasta 38.04 m<sup>2</sup>/g (mayor al del resto de las muestras, ver Tabla 15). Dadas estas condiciones es factible que la retención de los EPT esté relacionada a la neutralidad del pH en la base de la columna (la cual puede presentarse en diferentes profundidades) lo que facilitaría la precipitación de nuevas fases minerales capaces de retener a los EPT presentes en la solución ácida infiltrada en los experimentos. De igual forma, su mayor superficie específica le brinda a este suelo la capacidad de retener vía sorción a los EPT.

El suelo Tinajas presenta varias características físicas parecidas al suelo Bacanuchi, principalmente el contenido de arcillas (hasta en un 11%), y su superficie específica (17.95 m<sup>2</sup>/g, ver Tabla 15) lo que le confiere la capacidad de retener vía sorción a los EPT contenidos en la solución ácida ferrocuprífera cuando ésta entra en contacto con el suelo. A pesar de ello, la ausencia de carbonatos en este suelo no le brinda la capacidad de neutralizar la acidez de la solución ferrocuprífera, debido a ello es de esperarse que los EPT se encuentren en formas más solubles en comparación con el suelo Bacanuchi (el cual no presenta ningún elemento disuelto en la base de la columna durante los primeros dos riegos con la solución ácida ferrocuprífera).

En lo que respecta al sedimento Chilolo, en la sección 5.2 se mencionó que sus características físicas y químicas no son las ideales para la retención de EPT, por lo que se trata presumiblemente de la columna menos amortiguadora, esto está relacionado a su bajo porcentaje textural de arcillas (lo que implica una mayor velocidad de flujo y menor tiempo de contacto entre la solución ácida y el sedimento), su menor superficie específica en comparación a las otras muestras (5.85 m<sup>2</sup>/g), su elevada porosidad (53.75%) y su alta conductividad hidráulica (15.22 cm/hora) las cuales en conjunto promueven su baja capacidad para retener contaminantes. Aunado a estos factores, la existencia de fugas durante los dos riegos realizados en esta columna (lo cual evitó la interacción completa entre las soluciones y el sedimento) provocaron la salida de poco lixiviado en la base de la columna, por lo que los resultados no son comparables con el suelo Tinajas, el suelo Bacanuchi y el sedimento El Álamo.

Finalmente, la columna de sedimento El Álamo presenta condiciones contrastantes para la retención de EPT, ya que si bien presenta una textura con hasta 10% de arcillas (similar a los suelos Bacanuchi y Tinajas) su porcentaje de arenas es mayor al de ambos suelos, por lo que su superficie específica decrece (7.28 m<sup>2</sup>/g). Al igual que el suelo Tinajas, no se

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

determinaron ni en campo ni en laboratorio concentraciones de carbonato en este sedimento, por lo cual su capacidad para neutralizar una solución ácida es nula.

Las muestras superficiales de los sitios evaluados presentan la similitud en sus puntos de carga cero, las 4 presentan valores de PCZ a un pH que oscila entre 2.55 y 3.24, lo que puede estar relacionado a la presencia de minerales arcillosos que se cargan negativamente por arriba de esos valores de pH, lo que le puede conferir a todas las muestras la capacidad de retener principalmente cationes metálicos.

La presencia de carbonatos en la muestra superficial evaluada para el sitio de Bacanuchi le confiere la capacidad de neutralizar la acidez de la solución ácida ferrocuprífera, lo que ocasiona una mayor retención de EPT en este sitio debido probablemente a la precipitación de nuevas fases minerales que presentan en su estructura estos elementos, o bien, fases que pueden retener vía sorción a los EPT evaluados.

Tomando en cuenta el potencial redox, se observa un comportamiento similar en las 4 columnas, ya que el Eh en todas varía de forma similar, con una tendencia a disminuir ligeramente conforme la duración del experimento o bien a permanecer constante en el tiempo. Este comportamiento similar en todas las columnas puede deberse a que los fenómenos que controlan el potencial redox son los mismos, es decir, la interacción de la solución ácida con las matrices probablemente ocasiona las mismas reacciones de óxido-reducción. El potencial redox medido en todas las columnas durante los diferentes riegos varía de un valor máximo de 0.9 V (tercer y cuarto riego de la columna El Álamo) a un valor mínimo de 0.2 V (tercer riego de la columna de suelo Tinajas y primer riego de la columna de suelo Bacanuchi), por lo que también es posible decir que en ninguna columna se alcanzaron condiciones de sobresaturación.

En lo que respecta a los diagramas Eh vs pH, se observa que en todas las columnas existen condiciones para la formación de minerales secundarios, principalmente jarosita y yeso. El control del pH en la probable formación de estos minerales parece ser importante, ya que los diagramas Eh vs pH elaborados en el suelo Bacanuchi demuestran que existe la posibilidad de formación de más fases minerales secundarias en comparación a las otras columnas (lo que podría relacionarse a la máxima capacidad de retención de EPT que posee este suelo), lo cual se relaciona probablemente a los valores neutros de pH que se determinaron en esta columna en los lixiviados colectados en la base de la misma.

### 5.3.4 Modelación Geoquímica.

El modelo geoquímico realizado en este trabajo tiene la finalidad de inferir la posible precipitación de minerales secundarios tomando en cuenta el índice de saturación, dichos minerales pueden retener a los EPT vía sorción o bien, estos pueden presentarse en la composición química de los precipitados, lo cual permite que se encuentren en formas insolubles y que por ende no sean móviles.

Para correr el modelo se añadieron al programa de especiación y saturación mineral Visual Minteq los siguientes parámetros: concentración retenida (en mg/L) de cada uno de los elementos presentes en los lixiviados colectados en la base y en algunas profundidades para cada columna. Se añadió de igual forma el pH y el potencial redox de los lixiviados, la temperatura (la cual se fijó a 20°C ya que no se observaron cambios importantes en la misma durante la realización de los experimentos) y los posibles minerales secundarios formados (los cuales se infirieron previamente en los diagramas Eh vs pH).

En función del cálculo del índice de saturación (IS) con el uso del programa, se pueden presentar dos situaciones para un sólido. Si el IS es mayor o igual a 0, el sólido correspondiente puede precipitar (se debe considerar también la cinética de la reacción). Por el contrario, si el índice de saturación es menor a 0, las concentraciones disueltas presentes en el agua para los iones que constituyen al sólido no son lo suficientemente altas para poder precipitar, por lo tanto, no es factible su precipitación en las condiciones dadas.

En las tablas 50-55 se muestran los resultados de la modelación geoquímica para cada columna. Los minerales que se indican en dichas tablas se presentan en diferentes colores, siendo naranja para aquellos con índices de saturación mayores a 0 (están sobresaturados, por lo que pueden precipitar), verde para los que presentan un índice de saturación igual a 0 (se encuentran en equilibrio pero pueden precipitar) y amarillo para los que presentan un índice de saturación menor a 0 (están insaturados, por lo que no es factible su precipitación).

Por su parte, en el **ANEXO 8** se muestran las concentraciones de cada uno de los EPT añadidos en el programa y del ion sulfato (el cual fue el único anión detectado en todos los riegos) junto con el balance catiónico-aniónico de cada lixiviado modelado.

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 50. Modelación geoquímica Columna de suelo Tinajas.**

Columna de suelo Tinajas				
	Vo	Mineral	Índice de saturación	Evaluación
Riego 1	0.03	AlOH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (s)	0.53	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-5.46	Insaturado
	0.73	AlOH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (s)	0.91	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	1.67	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
	0.93	Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-5.41	Insaturado
		AlOH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (s)	0.36	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
Riego 2	0.1	Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-5.47	Insaturado
		AlOH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.01	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	2.81	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	-0.07	Insaturado
	0.56	Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-7.42	Insaturado
		AlOH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.12	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	3.32	Sobresaturado
	0.74	Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	-0.11	Insaturado
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-7.82	Insaturado
		AlOH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.26	Sobresaturado
Riego 3	0.20 (11 cm de profundidad)	Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	4.58	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	-0.01	Insaturado
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-7.91	Insaturado
	0.71 (16 cm de profundidad)	AlOH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (s)	0.49	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-4.65	Insaturado
		AlOH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (s)	0.41	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-5.34	Insaturado

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 51. Modelación geoquímica Columna de sedimento El Álamo.**

Columna de sedimento El Álamo				
# de riego	Vo	Mineral	Índice de saturación	Evaluación
Riego 1	0.02	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	1.23	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	1.63	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	-0.02	Insaturado
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-7.63	Insaturado
	0.49	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	0.27	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-5.34	Insaturado
	0.87	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	0.29	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )		-5.56	Insaturado	
Riego 2	0.07	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	0.95	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	1.71	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-8.06	Insaturado
	0.38	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	1.10	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	2.44	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-8.37	Insaturado
	0.94	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	1.26	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	3.26	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-8.98	Insaturado
Riego 3	0.45 (16 cm de profundidad)	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	0.53	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-5.72	Insaturado

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 52. Modelación geoquímica Columna de sedimento Chilolo, riego 1.**

<b>Columna de sedimento Chilolo</b>				
<b># de riego</b>	<b>Vo</b>	<b>Mineral</b>	<b>Índice de saturación</b>	<b>Evaluación</b>
Riego 1	0.03	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	1.66	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	5.02	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	0.03	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-8.23	Insaturado
	0.08	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.55	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	10.42	Sobresaturado
		Boehmita (AlO(OH))	1.01	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	2.76	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	1.89	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-11.04	Insaturado
	0.3	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.36	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	8.63	Sobresaturado
		Boehmita (AlO(OH))	0.33	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	2.08	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	1.20	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-10.77	Insaturado
	0.17 (2.5 cm de profundidad)	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	1.95	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	7.38	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	1.48	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	0.60	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )		-10.23	Insaturado	
0.25 (5 cm de profundidad)	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.02	Sobresaturado	
	Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	7.89	Sobresaturado	
	Diásporo (AlO(OH))	1.70	Sobresaturado	
	Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	0.83	Sobresaturado	
	Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio	
	Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio	
	Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-10.38	Insaturado	

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 53. Modelación geoquímica Columna de sedimento Chilolo, riego 2.**

Columna de sedimento Chilolo				
# de riego	Vo	Mineral	Índice de saturación	Evaluación
Riego 2	0.02	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	0.18	Sobresaturado
		AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.69	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	10.73	Sobresaturado
		Boehmita (AlO(OH))	1.37	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	3.12	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	2.25	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-11.81	Insaturado
	0.06	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	0.18	Sobresaturado
		AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.69	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	10.81	Sobresaturado
		Boehmita (AlO(OH))	1.37	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	3.12	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	2.24	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-11.72	Insaturado
	0.1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	0.16	Sobresaturado
		AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.69	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	10.69	Sobresaturado
		Boehmita (AlO(OH))	1.36	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	3.11	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	2.23	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-11.81	Insaturado
	0.07 (2.5 cm de profundidad)	Al <sub>4</sub> (OH) <sub>10</sub> SO <sub>4</sub> (s)	6.73	Sobresaturado
		AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.60	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	10.32	Sobresaturado
		Boehmita (AlO(OH))	1.09	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	2.84	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	1.97	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-11.38	Insaturado



**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 54. Modelación geoquímica Columna de suelo Bacanuchi, riego 1.**

Columna de suelo Bacanuchi				
# de riego	Vo	Mineral	Índice de saturación	Evaluación
Riego 1	0.11	Al <sub>4</sub> (OH) <sub>10</sub> SO <sub>4</sub> (s)	6.67	Sobresaturado
		AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.61	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	10.80	Sobresaturado
		Boehmita (Al(OH))	1.07	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	2.82	Sobresaturado
		Ferrihidrita (Fe <sub>10</sub> <sup>3+</sup> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub> )	4.02	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	1.95	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-10.84	Insaturado
	0.52	Al <sub>4</sub> (OH) <sub>10</sub> SO <sub>4</sub> (s)	6.50	Sobresaturado
		AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.60	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	10.72	Sobresaturado
		Boehmita (Al(OH))	1.02	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	2.77	Sobresaturado
		Ferrihidrita (Fe <sub>10</sub> <sup>3+</sup> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub> )	4.02	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	1.89	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-10.76	Insaturado
	0.89	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.61	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	11.09	Sobresaturado
		Boehmita (Al(OH))	1.09	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	2.83	Sobresaturado
		Ferrihidrita (Fe <sub>10</sub> <sup>3+</sup> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub> )	4.01	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	1.96	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-10.58	Insaturado
		0.44 (10 cm de profundidad)	Al <sub>4</sub> (OH) <sub>10</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.64
	AlOHSO <sub>4</sub> (s)		2.21	Sobresaturado
	Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )		8.44	Sobresaturado
	Diásporo (AlO(OH))		1.61	Sobresaturado
	Ferrihidrita (Fe <sub>10</sub> <sup>3+</sup> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub> )		4.10	Sobresaturado
	Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )		0.73	Sobresaturado
	Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)		0.00	En equilibrio
Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00		En equilibrio	
Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-9.57		Insaturado	

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 55. Modelación geoquímica Columna de suelo Bacanuchi, riego 2.**

Columna de suelo Bacanuchi				
# de riego	Vo	Mineral	Índice de saturación	Evaluación
Riego 2	0.25	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	0.17	Sobresaturado
		Al <sub>4</sub> (OH) <sub>10</sub> SO <sub>4</sub> (s)	7.63	Sobresaturado
		AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.69	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	11.73	Sobresaturado
		Boehmita (AlO(OH))	1.36	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	3.11	Sobresaturado
		Ferrihidrita (Fe <sub>10</sub> <sup>3+</sup> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub> )	4.04	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	2.24	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
	Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-10.78	Insaturado	
	0.59	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	0.07	Sobresaturado
		AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.68	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	12.04	Sobresaturado
		Boehmita (AlO(OH))	1.31	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	3.06	Sobresaturado
		Ferrihidrita (Fe <sub>10</sub> <sup>3+</sup> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub> )	4.01	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	2.19	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
		Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-10.32	Insaturado
	0.77	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	0.01	Sobresaturado
		Al <sub>4</sub> (OH) <sub>10</sub> SO <sub>4</sub> (s)	7.38	Sobresaturado
		AlOHSO <sub>4</sub> (s)	2.68	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	12.12	Sobresaturado
		Boehmita (AlO(OH))	1.29	Sobresaturado
		Diásporo (AlO(OH))	3.03	Sobresaturado
		Ferrihidrita (Fe <sub>10</sub> <sup>3+</sup> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub> )	4.02	Sobresaturado
		Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	2.16	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
		Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	En equilibrio
	Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-10.16	Insaturado	
	0.49 (12.5 cm de profundidad)	AlOHSO <sub>4</sub> (s)	1.41	Sobresaturado
		Alunita (KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	5.39	Sobresaturado
		Ferrihidrita (Fe <sub>10</sub> <sup>3+</sup> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub> )	4.00	Sobresaturado
		Yeso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	0.00	En equilibrio
Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		0.00	En equilibrio	
Jarosita-K (KFe <sub>3</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )		-7.41	Insaturado	

### ➤ Columna de suelo Tinajas

En lo que respecta a la columna de suelo Tinajas (Tabla 50) se modelaron las características de 6 lixiviados colectados en la base de la columna para el primer y segundo riego y 2 para soluciones de suelo colectadas a las profundidades de 11 y 16 cm en el tercer riego. En todas las muestras modeladas se observa la sobresaturación ( $IS > 0$ ) para el sólido  $Al(OH)SO_4(s)$ , la precipitación de dicho sólido explicaría la retención del Al en la columna de suelo.

Para el primer riego se observa que el mineral yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) se encuentra en equilibrio ( $IS = 0$ ) en los 3 tiempos analizados ( $V_o$  de 0.03, 0.73 y 0.93) esto implica la posible precipitación de este mineral, el yeso es un mineral secundario propio de ambientes mineros donde se genera drenaje ácido y existen altas concentraciones de sulfatos (Romero et al., 2007). En el caso del segundo riego (en donde se agregó la solución de  $CaCl_2$ ) no parece existir suficiente sulfato en el medio para facilitar la formación de yeso, ya que los 3 lixiviados modelados presentan un índice de saturación menor a 0 (solución insaturada con respecto a este mineral). Finalmente, durante el tercer riego (en el cual se agregó la solución ácida ferrocuprífera) nuevamente se observa la probable precipitación de yeso ya que el índice de saturación calculado por el modelo es de 0 (solución en equilibrio).

La hematita ( $Fe_2O_3$ ) es otro mineral que presenta condiciones para saturar según los resultados del modelo, ya que presenta un índice de saturación de 0 en los 6 lixiviados y en las 2 soluciones de suelo modeladas. La posible precipitación de hematita sería una de las razones por las que el suelo puede retener al Fe (el cual presenta una retención de 52.30% en el primer riego con el uso de balances de masa).

Otro mineral que presenta valores mayores o iguales a 0 en su índice de saturación en el primer (a 0.73  $V_o$ ) y segundo riego (a 0.1, 0.56 y 0.74 volúmenes de poro) es la alunita ( $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ ), la cual al igual que el sólido  $Al(OH)SO_4(s)$  facilitaría la retención de Al en la columna.

Por último, contrario a lo observado en los diagramas Eh vs pH, el mineral jarosita (mineral secundario asociado a sitios mineros donde se generan drenajes ácidos) se encuentra insaturado en todas las muestras modeladas, teniendo un índice de saturación máximo de -4.65. A pesar de que las condiciones de Eh-pH en el sistema son las requeridas para la estabilidad de este mineral, el modelo sugiere que no existen las condiciones de saturación para su precipitación.

Para el resto de los EPT presentes en los lixiviados (As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb y Zn), el modelo no determinó la probable precipitación de ningún mineral en donde se presente alguno de ellos, por lo que la tabla 50 no hace mención de ninguno de estos EPT.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

### ➤ Columna de sedimento El Álamo

Para el sedimento El Álamo se modelaron las características de 6 lixiviados en la base de la columna en los primeros dos riegos y una solución colectada a 16 cm en el tercer riego. Los resultados se presentan en la tabla 51.

Al igual que en el suelo Tinajas, el modelo determinó la posible formación del sólido  $\text{AlOHSO}_4(\text{s})$  en todas las muestras modeladas y el mineral alunita ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) en el primer riego a 0.02 Vo y en el tercer riego en los 3 tiempos analizados. La probable precipitación de ambos sólidos permitiría explicar la retención de Al en la columna.

Según los resultados del modelo, es probable la precipitación de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en todos los puntos modelados con excepción de la muestra a 0.02 Vo durante el primer riego (en donde incluso la precipitación puede darse ya que el valor de IS es de -0.02). La formación de este mineral explicaría el descenso en la concentración soluble de sulfatos.

Otro mineral determinado en los resultados del modelo es la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la cual presenta un índice de saturación igual a 0 en las 7 muestras donde se realizó la modelación. La precipitación de este mineral podría explicar la retención de Fe en esta columna.

En lo que corresponde a la jarosita ( $\text{KFe}_3^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), todos los índices de saturación calculados por el modelo en las 7 muestras son negativos, lo que imposibilitaría su precipitación.

En lo que respecta a los EPT As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb y Zn no se determinó en el modelo ningún mineral con índice de saturación mayor a 0 en el cual se encontrará alguno de ellos, por lo que no se muestran en la tabla 51.

### ➤ Columna de sedimento Chilolo

Los resultados de la modelación geoquímica en la columna Chilolo (tablas 52 y 53) presentan diversas interrogantes, asociadas principalmente a los problemas de fugas laterales durante la realización de los dos riegos en esta columna. Es importante mencionar nuevamente que la modelación geoquímica se realizó con las concentraciones (en mg/L) retenidas de los diversos elementos, es decir, tomando en cuenta la concentración de cada elemento en la solución agregada que no salió en la base de la columna o en los lisímetros de succión en diferentes profundidades. Debido a las fugas, las concentraciones usadas en la columna Chilolo para realizar la modelación no son totalmente correctas, ya que gran parte de la solución no rescatada en los lixiviados y en los lisímetros no quedó necesariamente retenida sino que por el contrario se perdió en las fugas ocurridas durante los experimentos. Además, las pérdidas de solución en ambos riegos hacen menos probable la ocurrencia de cambios físicos o químicos (entre ellos la precipitación de minerales secundarios) por la poca interacción con el sedimento.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Considerando estos factores, los resultados en el modelo para la columna de sedimento Chilolo permiten predecir la precipitación de varios compuestos y minerales de aluminio, entre ellos:  $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{s})$ ,  $\text{AlOHSO}_4(\text{s})$ , alunita ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), boehmita ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ), diásporo ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ) y gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ).

De igual forma, se observa que en todas las muestras usadas para la modelación el índice de saturación es igual a 0 para el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), lo que implicaría que se encuentran en equilibrio, es decir, no están sobresaturadas pero si en forma saturada para precipitar.

En todas las muestras se observa que el mineral jarosita ( $\text{KFe}_3^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) presenta índices de saturación menores a 0, lo que imposibilitaría su precipitación.

Finalmente y al igual que en las dos columnas anteriores, no se determinó ningún mineral o compuesto en donde se pudiera dar la precipitación de As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb o Zn ya que sus índices de saturación son menores a cero por lo que no se presentan en las tablas de resultados.

### ➤ Columna de suelo Bacanuchi

En las tablas 54 y 55 se muestran los resultados para la columna de suelo Bacanuchi, en la cual se utilizaron un total de 8 muestras para la modelación geoquímica (4 en el primer riego y 4 en el segundo riego).

Se observa que en este suelo existen las condiciones teóricas para la precipitación de hasta 7 compuestos y minerales de aluminio, cuyos índices de saturación calculados por el programa Visual Minteq son mayores a 0, dichos precipitados son:  $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{s})$ ,  $\text{Al}_4(\text{OH})_{10}\text{SO}_4(\text{s})$ ,  $\text{AlOHSO}_4(\text{s})$ , alunita ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), boehmita ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ), diásporo ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ) y gibssita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ).

Al igual que el resto de las columnas, en la columna Bacanuchi se tienen las condiciones para la formación de los minerales yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), no obstante, a diferencia de los resultados anteriores se determinó la posible precipitación del mineral ferrihidrita ( $\text{Fe}_{10}^{3+}\text{O}_{14}(\text{OH})_2$ ), mineral de origen secundario asociado a drenajes ácidos de mina, el cual podría favorecer la retención de los diferentes EPT.

El mineral jarosita presenta un índice de saturación menor a 0 en las 8 muestras modeladas, por lo que su precipitación en el suelo Bacanuchi según las condiciones modeladas es poco probable.

### **Resumen de resultados de la modelación geoquímica:**

Los resultados vistos en los diagramas Eh vs pH demuestran que las condiciones geoquímicas en las 4 columnas estudiadas permiten la probable formación de minerales como jarosita, yeso, hematita, escorodita, calcosita, alunita y pirolusita. No obstante, los resultados teóricos de la modelación geoquímica permiten inferir la precipitación solo de yeso, hematita y alunita. A pesar de ello, no se descarta la formación de otros minerales, ya que debido a que no es factible modelar todas y cada una de las muestras de lixiviados obtenidos en la base de la columna y a diferentes profundidades, el hecho de no haber obtenido como resultado de la modelación geoquímica la formación de minerales como jarosita en las muestras evaluadas, no es posible concluir que no se encuentran precipitados (ya que podrían existir las condiciones para la saturación o sobresaturación en otros lixiviados no modelados en este trabajo).

La precipitación de minerales secundarios principalmente por procesos de oxidación y neutralización tales como óxidos, hidróxidos y sulfatos es uno de los principales controles de la movilidad de EPT ya que muchos de ellos pueden retenerlos vía sorción (Blowes y Jambor, 1990; Goldberg, 1986) debido a ello es de suma importancia su identificación y estudio.

El modelado geoquímico realizado en las muestras colectadas en todas las columnas, permite predecir la precipitación de diversos minerales secundarios, que podrían relacionarse a la retención de los EPT contenidos en la solución ácida. De estos minerales, se rescata el hecho de que en todas las columnas se identificó la posible precipitación de compuestos y minerales de Al (como la alunita) y la formación de yeso y hematita. Los únicos resultados que contrastan son la posible formación de un mayor número de minerales y compuestos de Al en la columna Bacanuchi (hasta 7 precipitados diferentes) y la probable formación del mineral ferrihidrita en esta columna, el cual no se determinó en las otras muestras.

Cabe hacer notar que la modelación geoquímica permite inferir la posibilidad de que ciertos compuestos precipiten y con ello pueda darse la posible retención de los diferentes EPT en las diferentes columnas de suelo/sedimento evaluadas, sin embargo, la precipitación no es el único mecanismo capaz de retener a los diferentes EPT, por lo mismo, los resultados de la modelación geoquímica explicarían la retención de elementos como Fe y Al en la columna por la precipitación de minerales secundarios, sin embargo, la retención observada de los otros EPT en las curvas de elución y en los balances de masa de la sección 5.3.1 no fue explicada por el modelo geoquímico, ya que no se determinó la posible precipitación de ningún mineral en donde se encontrara alguno de estos elementos en su estructura. No obstante, es posible que la retención sugerida en apartados anteriores pueda ser explicada por procesos de sorción en minerales de arcilla (reportados en la zona) o bien, en minerales secundarios de Fe-Al que si fueron interpretados por el modelo geoquímico.

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**5.3.5 Fluorescencia de rayos X (FRX).**

El análisis de FRX permitió determinar la concentración total de EPT antes y después de todos los riegos en cada columna. A continuación se presentan los resultados.

**Tabla 56. Concentración total de EPT (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn), Ca y S en muestras superficiales antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocupriferá. <LD: Debajo del límite de detección instrumental.**

Columna	Profundidad (cm)	As	Cd	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	S
		mg/kg									
Tinajas sin riego	0 - 2	21	<LD	6604	52	168	35422	1297	88	152	<LD
	2 - 4	29	<LD	5790	43	191	31223	1178	75	154	<LD
	4 - 6	26	<LD	6331	48	186	35188	1106	80	148	<LD
Tinajas después de 4to riego	0 - 2	26	<LD	7863	43	629	37589	1523	70	362	9545
	2 - 4	28	<LD	7381	43	586	35327	1460	64	315	8233
	4 - 6	29	<LD	6597	45	581	34164	1488	65	350	7324
El Álamo sin riego	0 - 2	29	<LD	16675	41	181	31724	1194	89	163	<LD
	2 - 4	27	<LD	17020	36	200	32062	1161	84	181	<LD
	4 - 6	25	<LD	16810	<LD	187	31074	1257	78	198	<LD
El Álamo después del 4to riego	0 - 2	28	<LD	10245	39	315	28364	1073	77	208	4393
	2 - 4	22	<LD	9865	46	306	25492	681	55	212	3986
	4 - 6	23	<LD	11544	30	308	27264	949	56	210	4580
Chilolo sin riego	0 - 2	17	<LD	13521	43	70	30667	799	47	145	<LD
	2 - 4	23	<LD	12961	33	61	30497	902	39	155	<LD
	4 - 6	23	<LD	13742	53	57	30003	864	45	143	<LD
Chilolo después del 2do riego	0 - 2	17	<LD	17212	48	218	31429	608	61	132	5124
	2 - 4	24	<LD	16187	50	237	29836	659	51	143	4811
	4 - 6	17	<LD	16040	36	228	30168	658	95	133	4650
Bacanuchi sin riego	0 - 2	23	<LD	25689	41	104	37435	836	45	100	<LD
	2 - 4	26	<LD	25377	49	103	34061	665	35	103	<LD
	4 - 6	23	<LD	26013	69	120	33783	748	44	98	<LD
Bacanuchi después del 3er riego	0 - 2	26	<LD	25533	41	812	44685	1099	38	218	19690
	2 - 4	25	<LD	24088	83	820	44382	959	40	231	18896
	4 - 6	22	<LD	24881	80	887	45982	885	49	218	18221

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La tabla 56 presenta la concentración total de 10 elementos (As, Cd, Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn y S). Las concentraciones máximas de cada elemento son: As=29 (mg/kg), Ca=26013 (mg/kg), Cr=83 (mg/kg), Cu=887 (mg/kg), Fe=45982 (mg/kg), Mn=1523 (mg/kg), Pb=95 (mg/kg), Zn=362 (mg/kg) y S=19690 (mg/kg). En el caso del Cd, todas las muestras analizadas presentan concentraciones por debajo del límite de detección instrumental. Cabe destacar que en todas las muestras originales analizadas (sin ningún riego con la solución ácida ferrocuprífera) no se detectaron concentraciones de azufre, por el contrario, en todas las muestras analizadas después de los riegos realizados se detectaron concentraciones totales de azufre en un rango de concentración de 3986-19690 (mg/kg). Estos resultados pueden asociarse a la retención de los sulfatos presentes en la solución ácida ferrocuprífera producto de su probable precipitación al momento de interaccionar con las diferentes matrices de suelo y sedimento. Es importante mencionar que a diferencia del resto de los elementos analizados, el azufre presenta el inconveniente de no haber sido detectado en el material de referencia Till-4 y de no presentar un valor certificado disponible en el material de referencia Montana 2710 a (Ver **ANEXO 5**), por lo que los resultados presentes en la tabla 56 para el caso del azufre no son del todo exactos.

### 1. Comparación con los valores naturales de fondo.

Esta sección tiene la intención de comparar los resultados de la concentración total de cada uno de los EPT analizados por el método de Fluorescencia de Rayos X (As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn) en cada una de las columnas antes y después de los riegos, con los valores naturales de fondo de la región (Tabla 57).

**Tabla 57. Valores naturales de fondo en suelos y sedimentos de la región de estudio. Fuente: SGM, 1995–2000 (para los sedimentos) e Instituto de Geología, 2015 (para los suelos).**

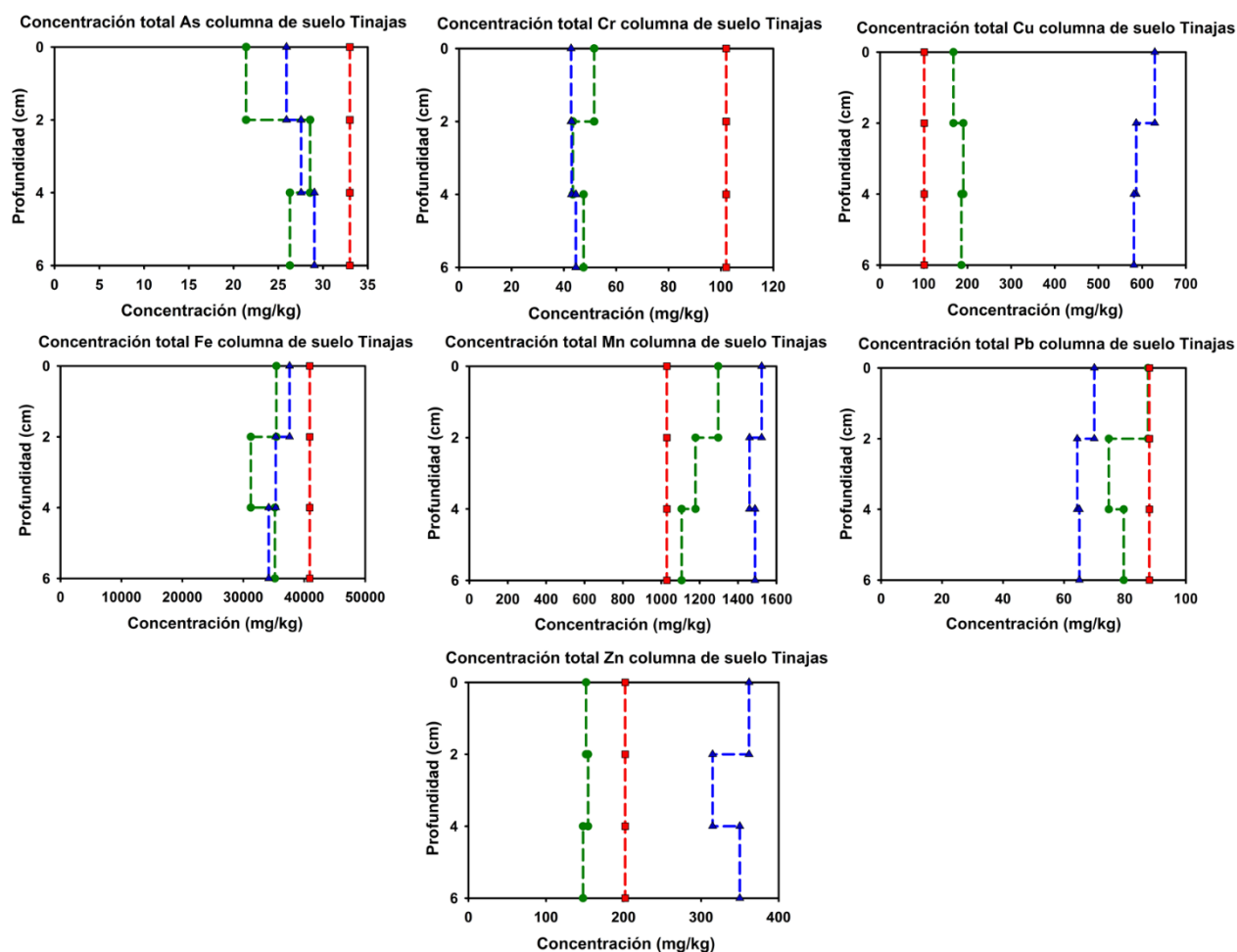
Ubicación	Matriz	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
		mg/Kg							
Arroyo Tinajas	Suelos	33.0	0.77	102.0	101.0	40900	1029	88.0	202.0
	Sedimentos	34.7	0.81	75.0	113.0	37900	1164	95.0	184.0
Parte alta del río Bacanuchi	Suelos	22.5	0.58	82.7	33.0	36900	578.7	17.0	57.3
	Sedimentos	26.5	0.60	51.0	80.0	36100	1092	63.0	148.0

#### a) Columna de suelo Tinajas:

En la figura 79 se observa la comparación de las concentraciones totales antes y después de los riegos, contra los valores naturales de fondo. Las discusiones para cada elemento se presentan en las siguientes páginas.



## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES



**Figura 79. Concentraciones totales (antes y después de los riegos) vs valores naturales de fondo en la columna de suelo Tinajas. Líneas y círculos verdes representan las concentraciones totales sin ningún riego. Líneas y triángulos azules representan las concentraciones totales después del cuarto riego. Líneas y cuadrados rojos representan los valores naturales de fondo en un perfil de suelo del arroyo Tinajas.**

**Arsénico (As):** La concentración máxima de As sin ningún riego con la solución ácida ferrocuprífera es de 29 (mg/kg) en la profundidad de 2-4 cm. Por su parte, se tiene la misma concentración máxima después del cuarto riego a la profundidad de 4-6 cm. En los resultados de la sección 5.3.1 se determinó una retención de As igual a 71.65% (tomando en cuenta balances de masa) después del cuarto riego en la base de la columna, no obstante, se observa poco cambio en la concentración total en los primeros 6 centímetros en relación a las muestras originales (sin ningún riego) y después de cuatro riegos. Todas las muestras analizadas presentan concentraciones por debajo de los valores de fondo para As en un suelo del arroyo Tinajas (cuyo valor es igual a 33 mg/Kg).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

**Cromo (Cr):** No se observan cambios significativos entre las muestras sin riego y las muestras obtenidas después del cuarto riego, siendo las concentraciones máximas de 52 mg/kg (0 a 2cm) y 45 mg/kg (4 a 6 cm), respectivamente. Tomando en cuenta que el valor de fondo para el cromo en un suelo del arroyo Tinajas es de 102 mg/kg, en ninguna muestra se supera este valor.

**Cobre (Cu):** Se observa que tanto en las muestras sin riego como en las muestras obtenidas después de los riegos, se superan los valores de fondo naturales para cobre en un suelo del arroyo Tinajas (101 mg/kg). La concentración máxima total de cobre en las muestras tomadas en campo es de 191 mg/kg entre 2 y 4 cm. Por su parte, después de los riegos se obtuvo una concentración máxima de cobre de 629 mg/kg en los primeros dos centímetros. La mayor concentración total de cobre después del cuarto riego en relación a las muestras obtenidas en campo puede deberse a su retención en la columna producto de la interacción de este suelo con la solución ácida ferrocuprífera infiltrada en el mismo (la retención calculada fue de 44.59% después del cuarto riego, tomando en cuenta balances de masa).

**Hierro (Fe):** Todas las muestras analizadas en los primeros seis centímetros tanto antes como después de los riegos presentan valores inferiores al valor de fondo de Fe (el valor de fondo de Fe en un suelo del arroyo Tinajas es de 40900 mg/kg). No se observan cambios importantes en la concentración de las muestras después de los riegos en relación a su concentración determinada en campo, teniendo un valor máximo de 35422 mg/kg antes de los riegos y un valor máximo de 37589 mg/kg después de los riegos. Es probable que en la base de la columna las diferencias sean más notorias debido a que se calculó una retención de 70.97% de Fe después del cuarto riego con la solución ácida (ver sección 5.3.1).

**Manganeso (Mn):** Todas las muestras analizadas antes y después de los riegos presentan un valor por encima de 1029 mg/kg (valor de fondo para Mn en un perfil de suelo del arroyo Tinajas), teniendo una concentración máxima antes de los riegos de 1297 mg/kg (en los primeros dos centímetros) y de 1523 mg/kg después del cuarto riego.

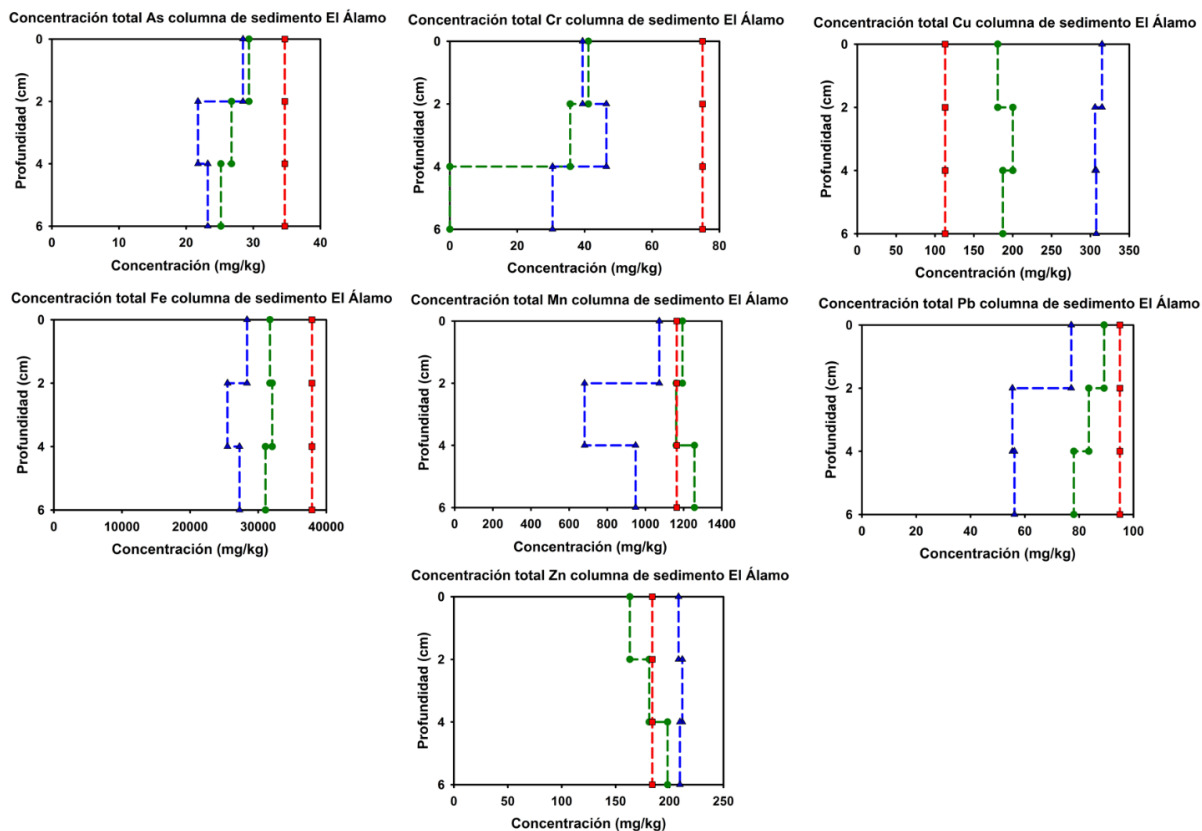
**Plomo (Pb):** En la muestra analizada sin riego en los primeros dos centímetros se determinó una concentración de 88 mg/kg, concentración idéntica al valor de fondo para este elemento. En las restantes muestras, tanto antes como después de los riegos, se tienen concentraciones por debajo del valor de fondo. Se observa una disminución en la concentración total de Pb después de los riegos en relación a las muestras originales.

**Zinc (Zn):** Para el caso del Zn se observan cambios en la concentración de las muestras después de los riegos en relación a las muestras originales y al valor natural de fondo de este elemento (202 mg/kg), ya que todas las muestras sin riego presentan concentraciones por debajo del valor de 202 mg/kg, alcanzando una concentración de hasta 362 mg/kg después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera. Se observa una clara retención (aumento en la concentración total de Zn) en los primeros seis centímetros de la columna de suelo Tinajas después de los riegos con la solución ácida (se determinó una retención de Zn igual a 65.99% después del cuarto riego en la base de esta columna).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### b) Columna de sedimento El Álamo:

En la figura 80 se observa la comparación de las concentraciones totales antes y después de los riegos, con los valores naturales de fondo.



**Figura 80. Concentraciones totales (antes y después de los riegos) vs valores naturales de fondo en la columna de sedimento El Álamo. Líneas y círculos verdes representan las concentraciones totales sin ningún riego. Líneas y triángulos azules representan las concentraciones totales después del cuarto riego. Líneas y cuadrados rojos representan los valores naturales de fondo en sedimentos del arroyo Tinajas.**

**Arsénico (As):** No se observan cambios significativos entre las muestras sin riego (líneas verdes) y las muestras obtenidas después del cuarto riego (líneas azules), siendo las concentraciones máximas de 29 mg/kg (0 a 2cm) antes de los riegos y 28 mg/kg (0 a 2 cm) después del cuarto riego. Tomando en cuenta que el valor de fondo para el arsénico en los sedimentos del arroyo Tinajas es de 34.7 mg/kg, en ninguna muestra se supera este valor.

**Cromo (Cr):** Todas las muestras analizadas tanto antes como después de los riegos presentan valores inferiores al valor de fondo de Cr (el valor de fondo de Cr en los sedimentos del arroyo Tinajas es de 75 mg/kg). La concentración de Cr en los primeros dos centímetros es idéntica antes y después de los riegos, sin embargo, entre 4 y 6 cm el cromo se encuentra por debajo del límite de detección instrumental en la muestra sin riego, siendo la concentración mayor a esa profundidad en la muestra obtenida después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera (30 mg/kg).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

**Cobre (Cu):** Al igual que en el suelo Tinajas, se observa que en todas las muestras analizadas sin riego y después de los riegos, se superan los valores de fondo naturales para cobre en los sedimentos del arroyo Tinajas (113 mg/kg). La concentración total máxima de cobre en las muestras sin riego es de 200 mg/kg (2-4 cm). Por su parte, después de los riegos se obtuvo una concentración máxima de cobre de 315 mg/kg en los primeros dos centímetros. La mayor concentración total de cobre después del cuarto riego en relación a las muestras obtenidas en campo puede deberse a su retención en la columna producto de la interacción de la solución ácida ferrocuprífera con este sedimento (se determinó una retención de Cu igual a 34.02% después del cuarto riego).

**Hierro (Fe):** La concentración total de Fe en todas las muestras analizadas es menor a los valores naturales de fondo para este elemento (37900 mg/kg para los sedimentos del arroyo Tinajas). La concentración promedio en las muestras sin riego es de 31000 mg/kg, bajando este promedio a 27000 mg/kg en las muestras analizadas después del cuarto riego. Estos resultados sugieren una probable liberación de Fe en forma soluble desde el sedimento en los primeros centímetros después de los riegos con la solución ácida, provocando una disminución en su concentración total (este comportamiento es contrario al observado en la base de la columna, donde existe una retención de Fe igual a 69.39% después del cuarto riego, tomando en cuenta balances de masa).

**Manganeso (Mn):** Las muestras sin riego analizadas en los primeros cuatro centímetros presentan concentraciones de Mn cercanas al valor de fondo del mismo (1164 mg/kg) superando dicho valor en la profundidad de 4-6 cm con un valor máximo de 1257 mg/kg. Por su parte, las muestras analizadas después del cuarto riego con la solución ácida ferrocuprífera hacen suponer la liberación de Mn desde el sedimento, ya que la concentración total disminuye hasta en un mínimo de 681 mg/kg. Como se vio en la sección 5.3.1 el sedimento El Álamo liberó Mn después del primer riego en la base de la columna en algunos lixiviados analizados, por lo que el análisis de FRX reflejaría dichos resultados a nivel superficial.

**Plomo (Pb):** Al igual que el As, Cr y Fe, todas las muestras (antes y después de los riegos) presentan concentración totales de plomo por debajo del valor de fondo de este elemento (95 mg/kg). Se observa que las concentraciones totales de Pb son mayores en las muestras sin riego que en las muestras analizadas después de los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera.

**Zinc (Zn):** Para las muestras tomadas en campo (sin riego) se observa un aumento en la concentración total conforme al aumento de la profundidad, superando el valor de fondo de Zinc (184 mg/kg) a una profundidad de 4-6 cm con una concentración de 198 mg/kg. Por su parte, todas las muestras analizadas después del cuarto riego, superan el valor de fondo de Zn con concentraciones totales de 208 mg/kg (0-2 cm), 212 mg/kg (2-4 cm) y 210 mg/kg (4-6 cm).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### c) Columna de sedimento Chilolo:

En la figura 81 se observa la comparación de las concentraciones totales antes y después de los riegos, con los valores naturales de fondo.

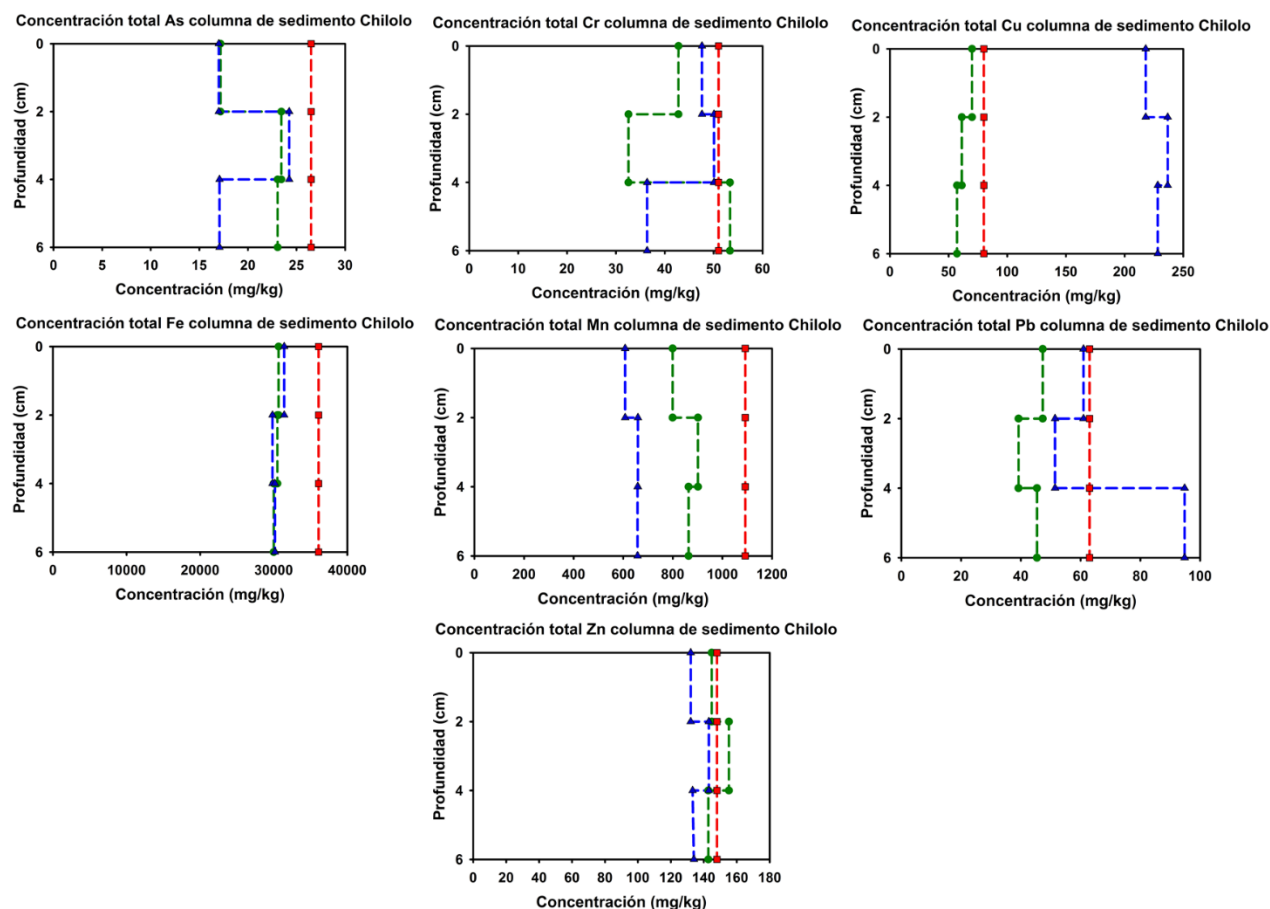


Figura 81. Concentraciones totales (antes y después de los riegos) vs valores naturales de fondo en la columna de sedimento Chilolo. Líneas y círculos verdes representan las concentraciones totales sin ningún riego. Líneas y triángulos azules representan las concentraciones totales después del segundo riego. Líneas y cuadrados rojos representan los valores naturales de fondo en sedimentos de la parte alta del río Bacanuchi.

Arsénico (As): Todas las muestras analizadas (con y sin riego con la solución ácida ferrocuprífera) se encuentran por debajo de los valores de fondo naturales para arsénico (26.5 mg/kg). La concentración total de As es idéntica en los primeros 4 cm en las muestras tomadas en campo y en las muestras tomadas después de los experimentos, sin embargo, a la profundidad de 4-6 cm se observa una disminución en la concentración de As después de los riegos, hasta en una concentración mínima de 17 mg/kg (en comparación a la muestra original cuya concentración es de 23 mg/kg).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

**Cromo (Cr):** El valor de fondo para Cr en los sedimentos de la parte alta del río Bacanuchi es de 51 mg/kg, dicho valor es superado únicamente en la muestra sin riego analizada a la profundidad de 4-6 cm, cuyo valor es igual a 53 mg/kg. En los primeros cuatro centímetros se observa que las muestras con riego presentan una mayor concentración de Cr en relación a las muestras sin los experimentos de riego (con una concentración máxima de 50 mg/kg a 2-4 cm), no obstante, esta tendencia es contraria a la profundidad de 4-6 cm, en donde incluso como se mencionó con anterioridad, se supera ligeramente el valor de fondo para Cr.

**Cobre (Cu):** Para el caso del Cu se observa un claro cambio en la concentración de las muestras después de los riegos en relación a las muestras tomadas en campo y al valor natural de fondo de este elemento (80 mg/kg), ya que todas las muestras sin riego presentan concentraciones por debajo del valor de 80 mg/kg, alcanzando una concentración de hasta 237 mg/kg después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera. Se observa una clara retención (aumento en la concentración total de Cu) en los primeros seis centímetros de la columna de sedimento Chilolo después de los riegos.

**Hierro (Fe):** Las concentraciones totales de hierro para las muestras analizadas antes y después de los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera son prácticamente iguales en todas las profundidades (tal como se observa en la Figura 81), presentando en todos los casos concentraciones menores al valor de fondo de Fe (igual a 36100 mg/kg para los sedimentos de la parte alta del río Bacanuchi).

**Manganeso (Mn):** La concentración total de Mn en todas las muestras analizadas es menor a los valores naturales de fondo para este elemento (1092 mg/kg para los sedimentos de la parte alta del río Bacanuchi). La concentración promedio en las muestras sin riego es de 850 mg/kg, disminuyendo a 640 mg/kg en las muestras analizadas después del segundo riego. Estos resultados sugieren una probable liberación de manganeso en forma soluble desde el sedimento en los primeros centímetros después de los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera.

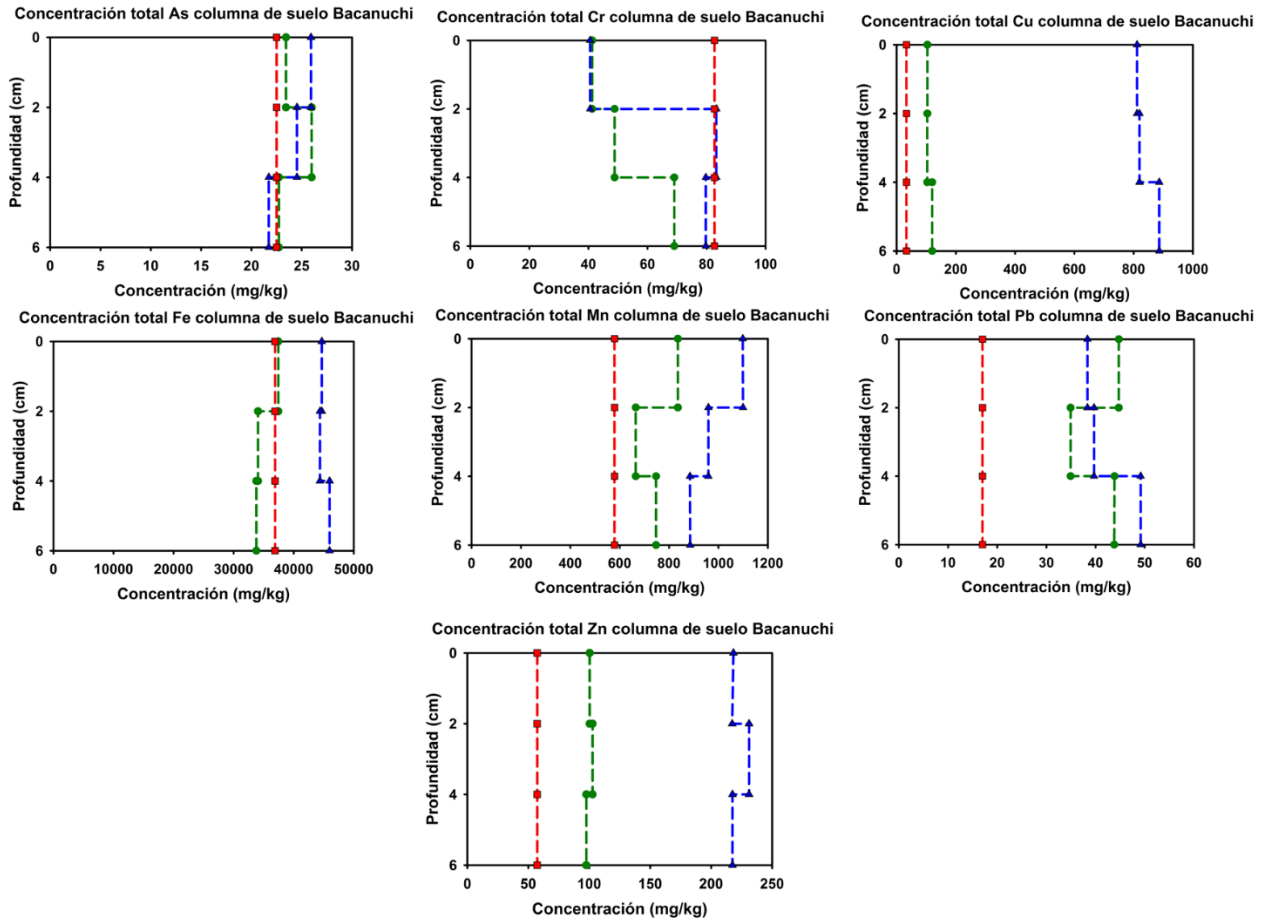
**Plomo (Pb):** El valor de fondo de Pb es de 63 mg/kg para los sedimentos de la parte alta del río Bacanuchi. Tomando en cuenta esto, todas las muestras sin riego analizadas presentan concentraciones menores al valor de fondo, siendo de 47 mg/kg (0-2 cm), 39 mg/kg (2-4 cm) y 45 mg/kg (4-6 cm) las concentraciones determinadas. Por su parte, la muestra más superficial (0-2 cm) tomada después de los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera presenta una concentración muy cercana al valor de fondo (61 mg/kg), llegando a superar dicho valor la muestra tomada a 4-6 cm, hasta en una concentración de 95 mg/kg.

**Zinc (Zn):** En el caso del Zinc, se tienen concentraciones máximas del mismo en las muestras tomadas a 2-4 cm (tanto en la muestra original tomada en campo, como en la muestra después de los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera) alcanzando valores de 155 mg/kg (en el caso de la muestra original) y de 143 mg/kg (en la muestra después de los riegos), superando el valor de fondo de Zn (148 mg/kg) únicamente la muestra sin riego tomada a esa profundidad. La concentración total de este elemento no varía considerablemente después de los riegos en relación a las muestras originales y es incluso muy parecida al valor natural de fondo en todas las muestras analizadas.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### d) Columna de suelo Bacanuchi:

En la figura 82 se observa la comparación de las concentraciones totales antes y después de los riegos, con los valores naturales de fondo.



**Figura 82. Concentraciones totales (antes y después de los riegos) vs valores naturales de fondo en la columna de suelo Bacanuchi. Líneas y círculos verdes representan las concentraciones totales sin ningún riego. Líneas y triángulos azules representan las concentraciones totales después del tercer riego. Líneas y cuadrados rojos representan los valores naturales de fondo en suelos de la parte alta del río Bacanuchi.**

**Arsénico (As):** Para las profundidades de 0-4 cm, tanto las muestras sin ningún riego, como las muestras después de los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera, superan el valor de fondo de As (22.5 mg/kg), en concentraciones máximas de 23 mg/kg (en la muestra sin riego) y 26 mg/kg (en la muestra con riegos) a la profundidad de 0-2 cm y de 26 mg/kg (en la muestra sin riego) y 25 mg/kg (en la muestra con riegos) a la profundidad de 2-4 cm. Por su parte, en la profundidad de 4-6 cm las concentraciones de las muestras presentan una concentración cercana al valor de fondo (23 mg/kg en la muestra sin riego y 22 mg/kg en la muestra con los riegos).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

**Cromo (Cr):** En las dos muestras colectadas (sin ningún riego y después del tercer riego) en los primeros dos centímetros la concentración de cromo es igual a 41 mg/kg, encontrándose ambas por debajo del valor de fondo de Cr (82.7 mg/kg). En el intervalo de profundidad de 2-6 cm la concentración de Cr es mayor en las muestras con riego en relación a las muestras sin los experimentos de la solución ácida ferrocuprífera, llegando a un valor máximo de 83 mg/kg (ligeramente mayor al valor de fondo de Cr) en la profundidad de 2-4 cm.

**Cobre (Cu):** Se observa que tanto en las muestras sin riego (líneas verdes) como en las muestras obtenidas después de los riegos (líneas azules), se superan los valores de fondo naturales para cobre en un perfil de suelo de la parte alta del río Bacanuchi (33 mg/kg). La concentración máxima total de cobre en las muestras tomadas en campo es de 120 mg/kg entre 4 y 6 cm. Por su parte, después de los riegos se obtuvo una concentración máxima de cobre de 887 mg/kg a una profundidad de entre 4 y 6 cm, superando el valor de fondo de Cu hasta 26.87 veces. La mayor concentración total de cobre después del tercer riego en relación a las muestras obtenidas en campo puede deberse a su retención en la columna producto de la interacción de este suelo con la solución ácida ferrocuprífera infiltrada en el mismo.

**Hierro (Fe):** Las muestras tomadas en campo (sin ningún experimento con la solución ácida ferrocuprífera) presentan valores iguales (en los primeros dos centímetros) o menores al valor de fondo de Fe (36900 mg/kg), por su parte, todas las muestras tomadas después de la infiltración de los tres riegos con la solución ácida presentan valores mayores a 36900 mg/kg, con concentraciones máximas de 44685 mg/kg para los primeros dos centímetros, 44382 mg/kg para la profundidad de 2-4 cm y 45982 mg/kg para la profundidad de 4-6 cm. La mayor concentración total de hierro después de los riegos en relación a las muestras obtenidas en campo puede deberse a su retención en la columna producto de la interacción de la solución ácida ferrocuprífera con este suelo.

**Manganeso (Mn):** Se observa que en todas las muestras analizadas sin riego y después de los riegos, se superan los valores de fondo naturales para manganeso (578.5 mg/kg). La concentración total máxima de manganeso en las muestras sin riego es de 836 mg/kg (0-2 cm). Por su parte, después de los riegos se obtuvo una concentración máxima de 1099 mg/kg en los primeros dos centímetros.

**Plomo (Pb):** Tomando en cuenta que el valor de fondo para Pb en un perfil de suelo de la parte alta del río Bacanuchi es de 17 mg/kg, todas las muestras analizadas superan dicho valor, en un máximo de 45 mg/kg para la muestra sin riego en los primeros dos centímetros y de 49 mg/kg para la muestra después de los riegos en la profundidad de 4-6 cm.

**Zinc (Zn):** Se observa un claro aumento en la concentración total de Zn en las muestras con riego en relación a su valor de fondo (57.3 mg/kg) y a las muestras sin riego (las cuales también superan el valor de fondo de Zn), con una concentración máxima de 231 mg/kg (entre 2 y 4 cm de profundidad).

En la tabla 58 se muestra el número total de muestras que superan o presentan la misma concentración en relación a los valores naturales de fondo en la región de estudio para los diferentes EPT evaluados.



**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 58. Resumen de las muestras que superan los valores de fondo naturales de los diferentes EPT en la región de estudio.**

Columna	Profundidad (cm)	¿Es igual o mayor a los valores de fondo?							
		As	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	
Tinajas sin riego	0 a 2	No	No	Si	No	Si	Si	No	<b>Total</b>
	2 a 4	No	No	Si	No	Si	No	No	
	4 a 6	No	No	Si	No	Si	No	No	
Tinajas después de 4to riego	0 a 2	No	No	Si	No	Si	No	Si	
	2 a 4	No	No	Si	No	Si	No	Si	
	4 a 6	No	No	Si	No	Si	No	Si	
<b>Número total de concentraciones con Si</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>16</b>
<b>Número total de concentraciones con No</b>		<b>6</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>26</b>
El Álamo sin riego	0 a 2	No	No	Si	No	Si	No	No	<b>Total</b>
	2 a 4	No	No	Si	No	Si	No	Si	
	4 a 6	No	No	Si	No	Si	No	Si	
El Álamo después del 4to riego	0 a 2	No	No	Si	No	No	No	Si	
	2 a 4	No	No	Si	No	No	No	Si	
	4 a 6	No	No	Si	No	No	No	Si	
<b>Número total de concentraciones con Sí</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>14</b>
<b>Número total de concentraciones con No</b>		<b>6</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>28</b>
Chilolo sin riego	0 a 2	No	No	No	No	No	No	No	<b>Total</b>
	2 a 4	No	No	No	No	No	No	Si	
	4 a 6	No	Si	No	No	No	No	No	
Chilolo después del 2do riego	0 a 2	No	No	Si	No	No	No	No	
	2 a 4	No	No	Si	No	No	No	No	
	4 a 6	No	No	Si	No	No	Si	No	
<b>Número total de concentraciones con Sí</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>6</b>
<b>Número total de concentraciones con No</b>		<b>6</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>36</b>
Bacanuchi sin riego	0 a 2	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	<b>Total</b>
	2 a 4	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	
	4 a 6	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	
Bacanuchi después del 3er riego	0 a 2	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	
	2 a 4	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	
	4 a 6	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	
<b>Número total de concentraciones con Sí</b>		<b>5</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>34</b>
<b>Número total de concentraciones con No</b>		<b>1</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>8</b>

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

Se observa que en las muestras correspondientes al suelo Bacanuchi un total de 34 concentraciones (de un máximo de 42) se encuentran por encima o son iguales a los valores de fondo para los suelos de la parte alta del río Bacanuchi. Del total, 18 corresponden a las muestras con los experimentos usando la solución ácida ferrocuprífera.

En lo que respecta a las muestras del suelo Tinajas, un total de 16 concentraciones (de 42 posibles) superan o son iguales a los valores de fondo para los suelos del arroyo Tinajas, de los cuales 9 corresponden a las muestras con los diferentes riegos.

En las muestras del sedimento El Álamo, 14 concentraciones superan o igualan los valores de fondo para los sedimentos del arroyo Tinajas, de esas 14 concentraciones 6 corresponden a las muestras con los experimentos de la solución ácida.

Finalmente, para las muestras de sedimento Chilolo, un total de 6 concentraciones superan o son iguales a los valores de fondo para los sedimentos de la parte alta del río Bacanuchi, de los cuales 4 corresponden a los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera.

Tomando en cuenta estos resultados, es evidente que el suelo Bacanuchi presenta la mayor cantidad de concentraciones que superan los valores de fondo debido a su capacidad para retener los EPT, los cuales se pueden encontrar precipitados o retenidos vía sorción en el suelo. Por otra parte, el sedimento Chilolo presenta el menor número de concentraciones que superan los valores de fondo, lo cual puede deberse a su escasa interacción con la solución ácida ferrocuprífera por los motivos ya señalados con anterioridad.

El sitio Bacanuchi es el único en donde todos los EPT superan los valores de fondo después de los riegos en alguna profundidad, observándose un claro aumento en la concentración total de todos ellos en relación a su concentración antes de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera. Como se mencionó anteriormente, en esta columna la retención de todos los EPT en los primeros dos riegos es del 100%, esto implica que se encuentran en las fases sólidas del suelo retenidos vía sorción o precipitados en diferentes fases minerales, lo que implica que su concentración total incrementó después de los riegos.

En las figuras 83-85 se muestra mediante mapas el resumen de los resultados obtenidos por medio de Fluorescencia de Rayos X en las muestras colectadas en los primeros seis centímetros después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera (considerando los sitios que se encuentran por debajo, son iguales o están por encima de los valores de fondo de la zona de estudio).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

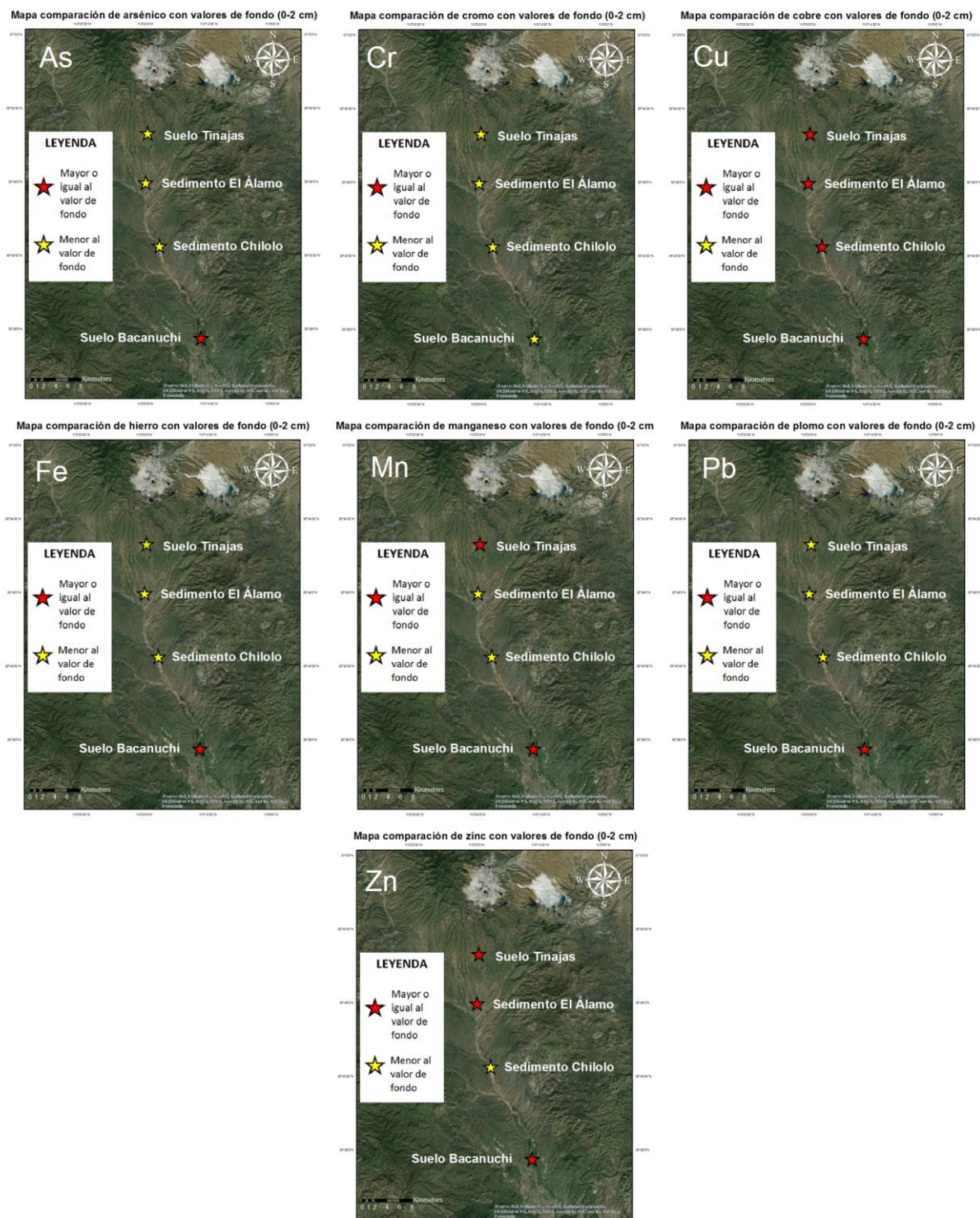


Figura 83. Mapas de comparación de las concentraciones totales determinadas después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera para As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en los primeros dos centímetros, versus los valores de fondo de la zona de estudio.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

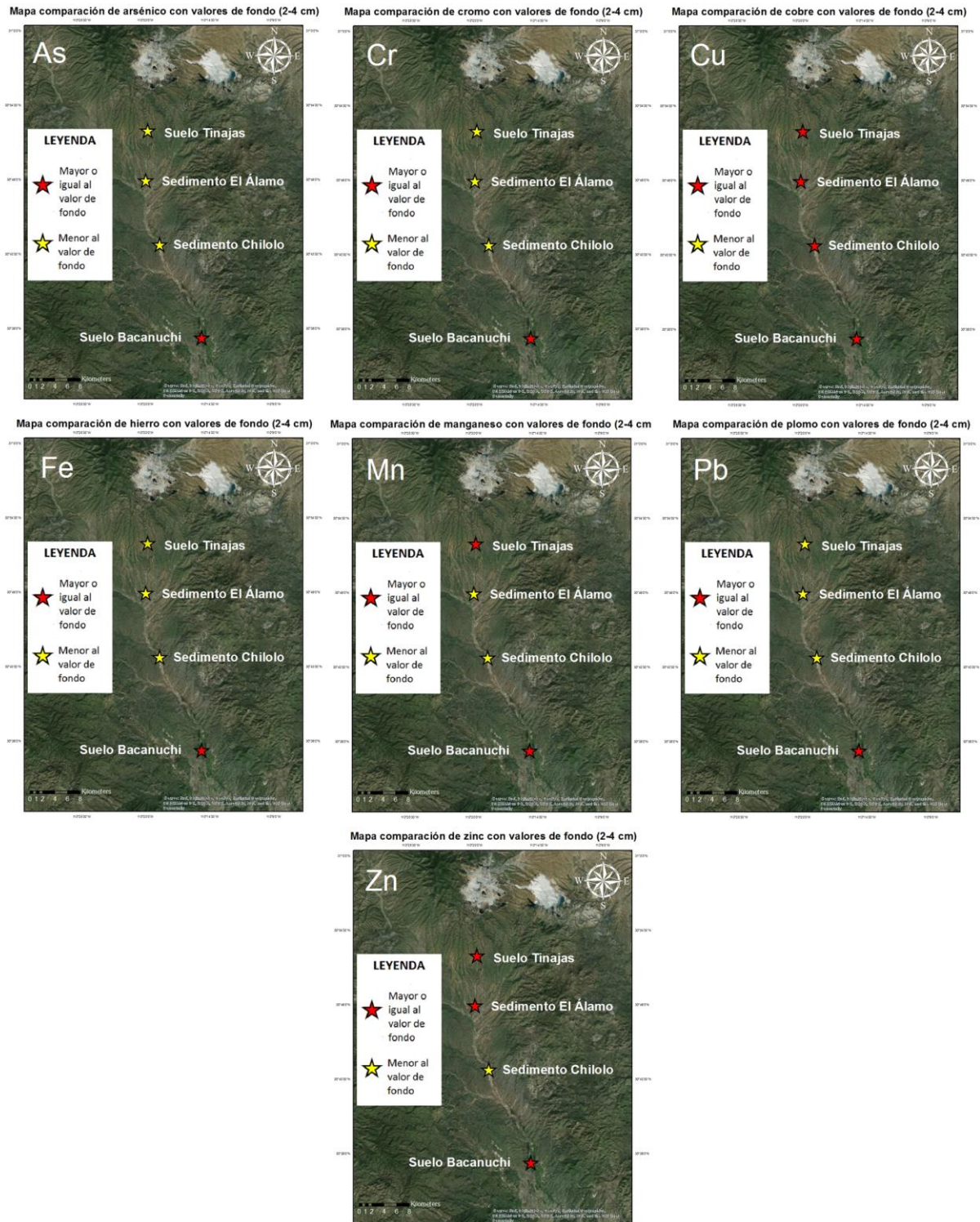


Figura 84. Mapas de comparación de las concentraciones totales determinadas después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífica para As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en la profundidad de 2-4 cm, versus los valores de fondo de la zona de estudio.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

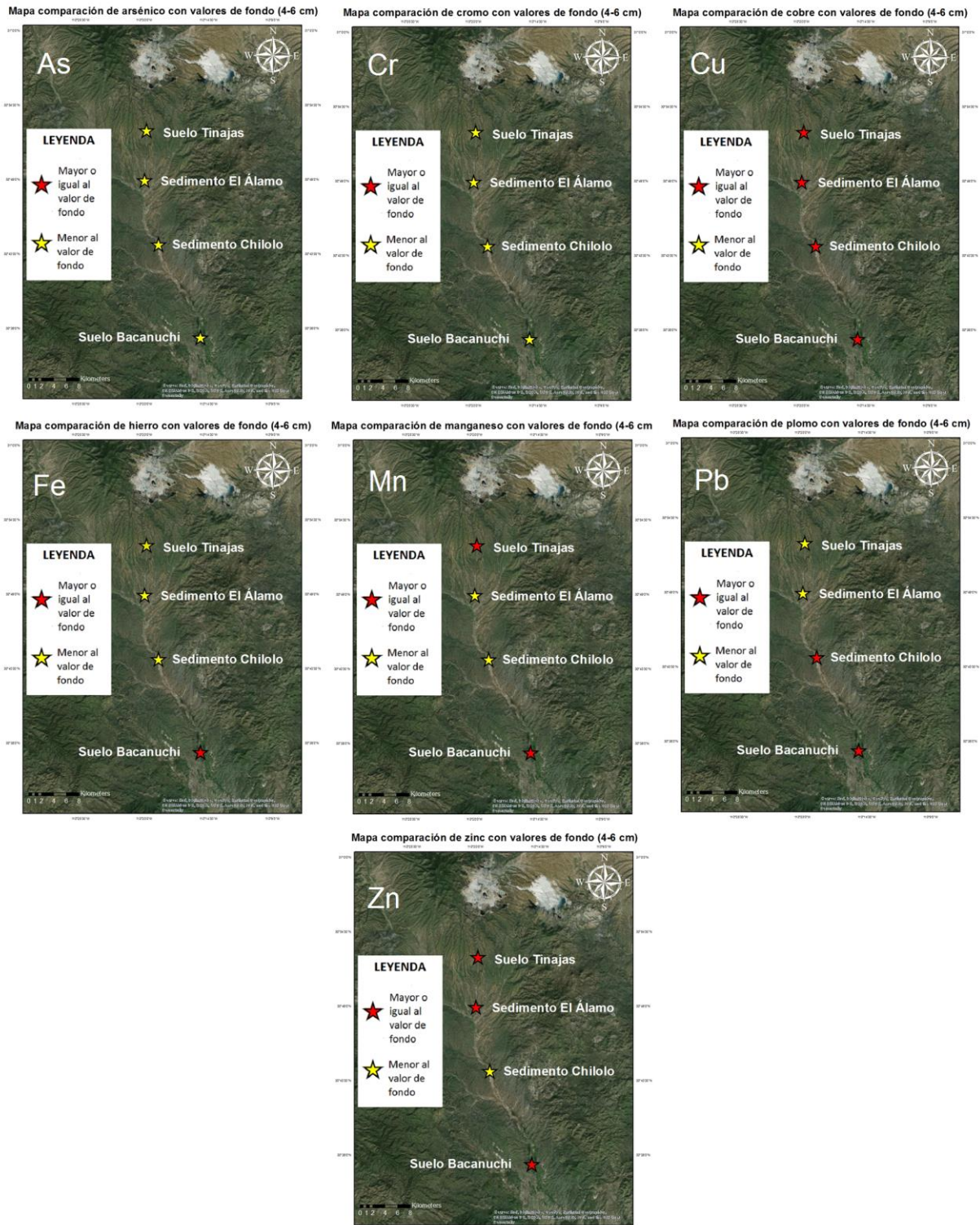


Figura 85. Mapas de comparación de las concentraciones totales determinadas después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera para As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en la profundidad de 4-6 cm, versus los valores de fondo de la zona de estudio.

## 2. Índice de geoacumulación (Igeo)

Como se mencionó en la metodología (ver sección 4.3.5) se utilizó el índice de geoacumulación (Igeo) para determinar el nivel de contaminación en las muestras analizadas por medio de FRX. Como se observó anteriormente, se identificó que en todas las muestras analizadas en las diferentes columnas (antes y después de los riegos) existen concentraciones de EPT que superan los valores naturales de fondo en la región tanto para sedimentos como para suelos, sin embargo, no es posible determinar el grado de contaminación sin el uso de índices como el Igeo.

Los resultados obtenidos al usar la ecuación 12 para el cálculo del Igeo se muestran en las figuras 86-89.

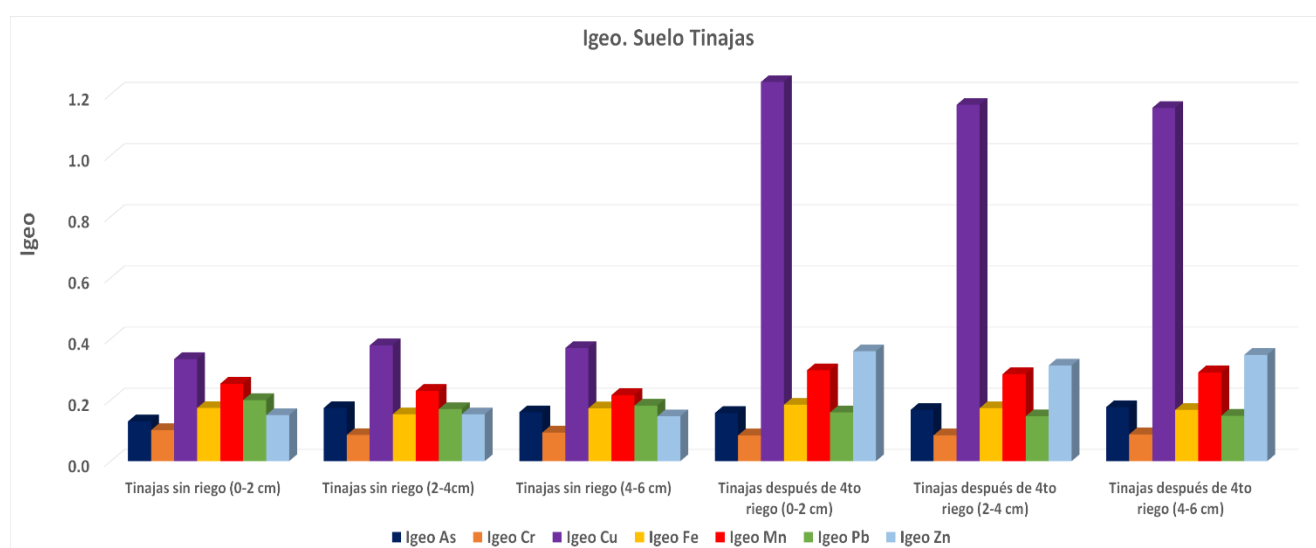
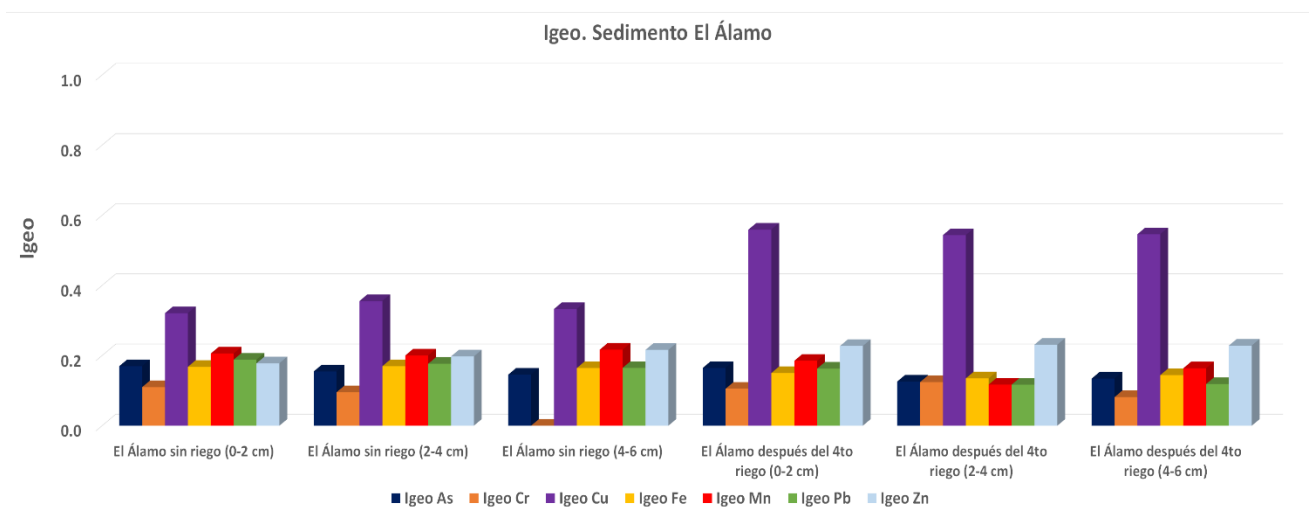


Figura 86. Cálculo del Igeo para las diferentes muestras del suelo Tinajas.

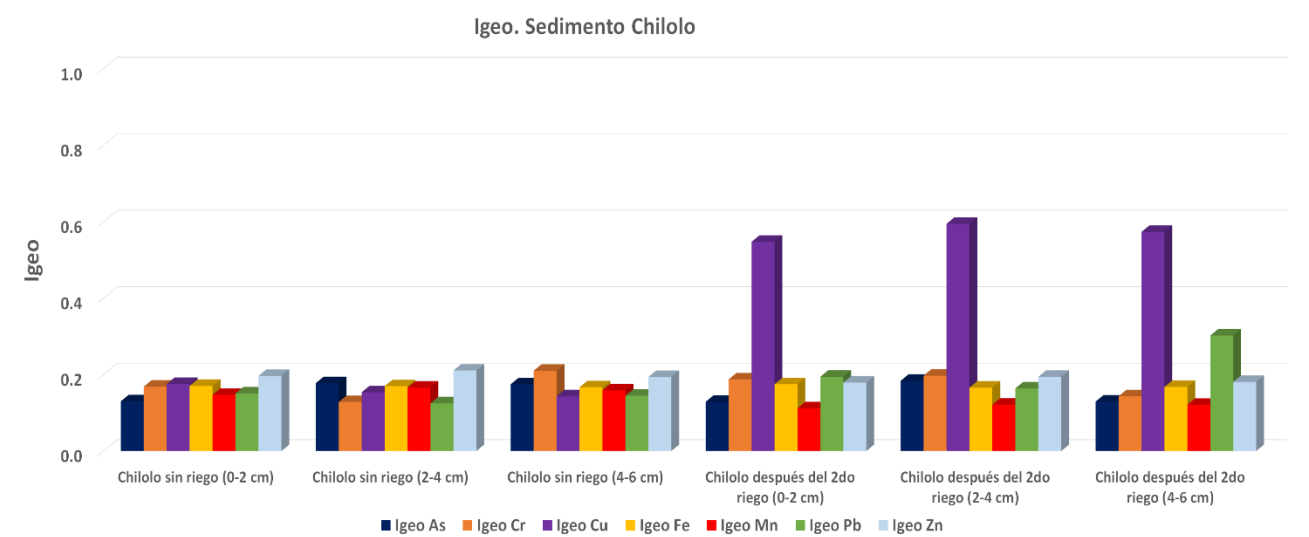
Los resultados de la figura 86 permiten visualizar que todos los EPT, con excepción del Cu, presentan valores de Igeo por debajo de 0.5 en todas las muestras analizadas a diferentes profundidades, por lo que tomando en cuenta la tabla 12, es posible decir que el nivel de contaminación en el suelo Tinajas para As, Cr, Cu (en las muestras sin riego), Fe, Mn, Pb y Zn es de “no contaminado a moderadamente contaminado”. Por su parte, en las 3 muestras analizadas con los experimentos de infiltración de la solución ácida ferrocuprífera se tienen valores de Igeo para Cu de 1.24 (0-2 cm), 1.16 (2-4 cm) y 1.15 (4-6 cm), por lo que en esas muestras el nivel de contaminación para cobre es de “moderadamente contaminado”.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES



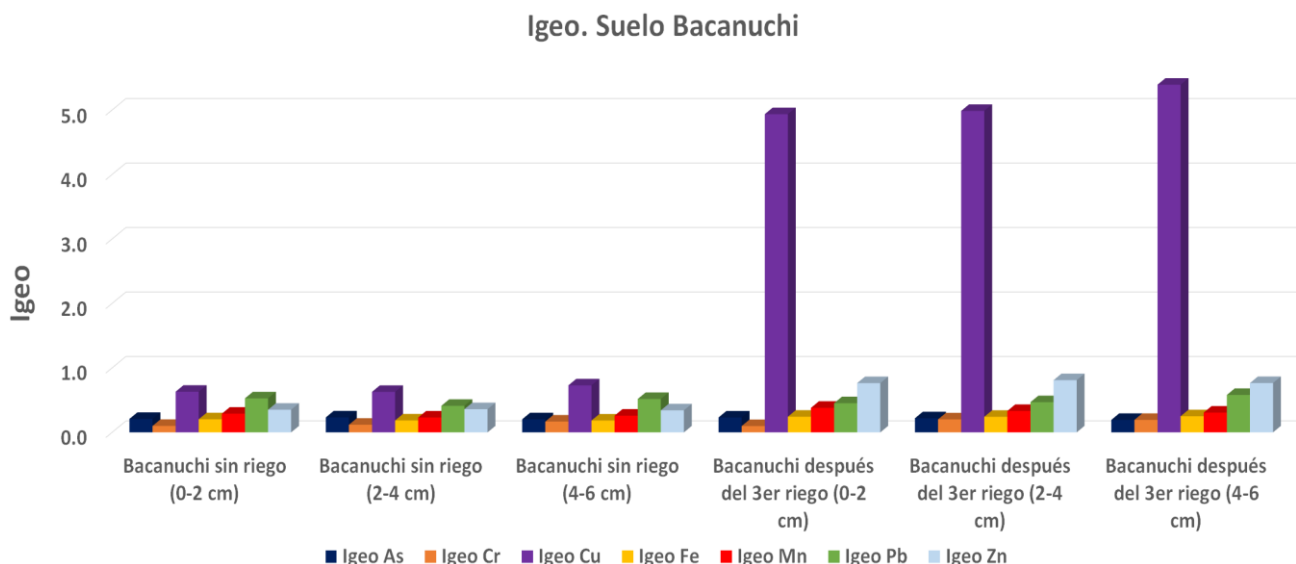
**Figura 87. Cálculo del Igeo para las diferentes muestras del sedimento El Álamo.**

Los resultados de la figura 87 permiten visualizar que todos los EPT presentan valores de Igeo menores a 0.6 en todas las muestras analizadas a diferentes profundidades, por lo que tomando en cuenta la tabla 12, es posible decir que el nivel de contaminación en el sedimento El Álamo para As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn es de “no contaminado a moderadamente contaminado”.



**Figura 88. Cálculo del Igeo para las diferentes muestras del sedimento Chilolo.**

Al igual que en el sedimento El Álamo, todos los EPT presentan valores de Igeo menores a 0.6 en todas las muestras analizadas a diferentes profundidades en el sedimento Chilolo (Figura 88), por lo que tomando en cuenta la tabla 12, es posible decir que el nivel de contaminación en el sedimento Chilolo para As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn es de “no contaminado a moderadamente contaminado”.



**Figura 89. Cálculo del Igeo para las diferentes muestras del suelo Bacanuchi.**

En el suelo Bacanuchi (Figura 89) se presenta una situación similar a la presente en el suelo Tinajas (Figura 86), ya que todas las muestras para los diferentes EPT presentan un Igeo menor a 1, con excepción del cobre en las 3 muestras analizadas después de los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera. Tomando en cuenta la tabla 12, es posible decir que el nivel de contaminación en el suelo Bacanuchi para As, Cr, Cu (en las muestras sin riego), Fe, Mn, Pb y Zn es de “no contaminado a moderadamente contaminado”. Por su parte, en las 3 muestras analizadas con los experimentos de infiltración de la solución ácida ferrocuprífera se tienen valores de Igeo para Cu de 4.93 (0-2 cm), 4.98 (2-4 cm) y 5.39 (4-6 cm), por lo que en esas muestras el nivel de contaminación para cobre es de “fuertemente contaminado a extremadamente contaminado”. Sin embargo, cabe notar que este escenario se presenta después de 3 riegos con la solución ácida ferrocuprífera, por lo que se trata de un escenario extremo y totalmente hipotético, y que a pesar de ello el suelo Bacanuchi no se encuentra “contaminado” con ningún EPT (a reserva del cobre). El haber obtenido un valor de Igeo mayor para Cu en el suelo Bacanuchi después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera, refleja el hecho de que se trata de la columna mejor amortiguadora, ya que como se ha visto anteriormente, retiene la mayor cantidad de todos los EPT analizados, por lo que resulta en un índice superior.

El uso del Igeo refleja que a pesar de los múltiples eventos de riego realizados en todas las columnas con la solución ácida ferrocuprífera, el nivel de contaminación de los suelos (tomando en cuenta los valores de fondo para cada elemento) para todos los EPT analizados es de “no contaminado a moderadamente contaminado”, con la única excepción del Cu, el cual supera el valor de 1 en los suelos Tinajas y Bacanuchi. Los resultados hasta aquí presentados demuestran que todas las columnas retienen en diferentes proporciones a los EPT analizados (siendo esta retención claramente mayor en el suelo Bacanuchi) y a pesar de ello, la contaminación no es evidente aún ni con varios episodios de infiltración de la solución ácida contaminante.



5.3.6 Difracción de Rayos X (DRX).

El análisis de DRX se realizó con el objetivo de determinar cambios mineralógicos en las muestras irrigadas con la solución ácida ferrocuprífera en comparación con aquellas que no lo fueron. Los resultados para cada suelo/sedimento se muestran en las siguientes páginas.

a) Columna de suelo Tinajas.

En la tabla 59 se observan las fases minerales identificadas antes y después de los riegos realizados en este suelo. En dicha tabla se presenta el índice de pérdida o enriquecimiento (I mineral) para cada fase identificada. De igual forma, en la figura 90 se presentan los difractogramas para los análisis realizados.

Tabla 59. Fases minerales identificadas en el suelo Tinajas antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.

Muestra	Minerales identificados sin riego	%	Minerales identificados después de los riegos	%	I mineral
Suelo Tinajas	1. Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	55	1. Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	53	0.04
	2. Plagioclasa de composición intermedia (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	13	2. Plagioclasa de composición intermedia (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	14	-0.08
	3. Feldespato potásico (KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	17	3. Feldespato potásico (KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	16	0.06
	4. Yeso: CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	2	4. Yeso: CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	2	0.00
	5. Filosilicatos a ≈ 10Å pbb (Illita)	10	5. Filosilicatos a ≈ 10Å pbb (Illita)	13	-0.30
	6. Filosilicatos a ≈ 7Å pbb (Caolinita)	3	6. Filosilicatos a ≈ 7Å pbb (Caolinita)	2	0.33

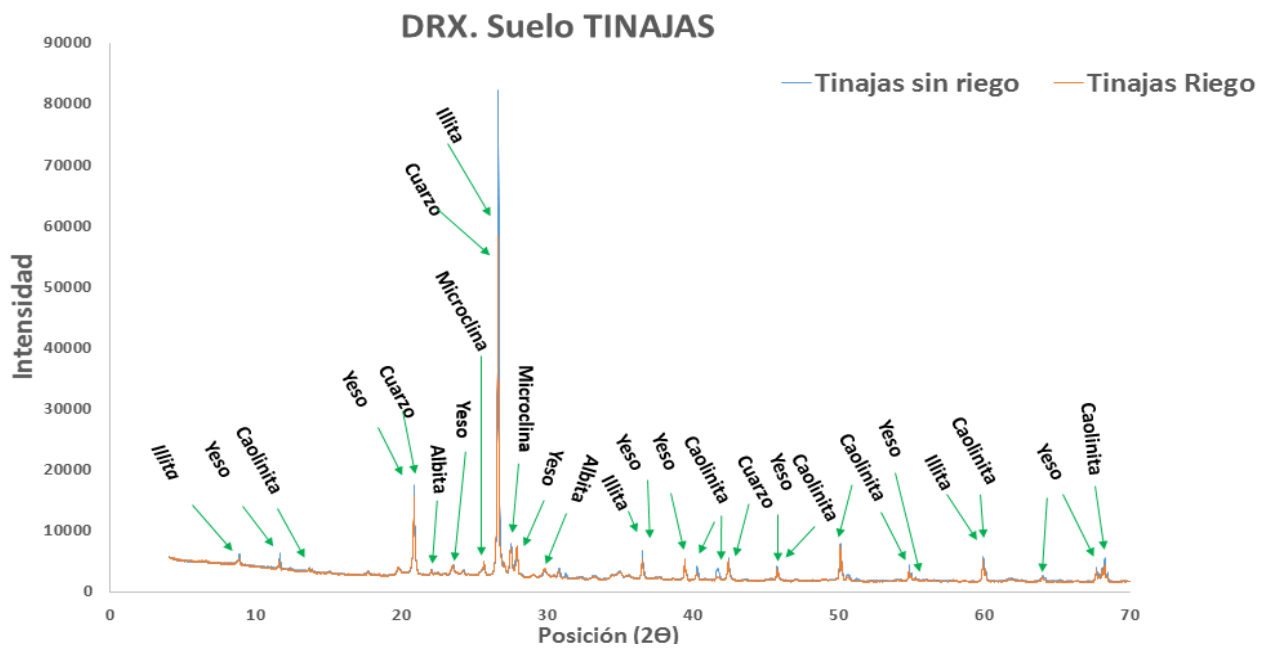


Figura 90. Difractogramas para el suelo Tinajas en donde se observan algunas fases minerales identificadas por el análisis de DRX.

Como se observa en la tabla 59, las fases identificadas por Difracción de Rayos X son las mismas tanto antes como después de los experimentos de infiltración de la solución ácida. Los resultados no demuestran cambios mineralógicos importantes en este suelo a nivel superficial después de 4 eventos de riego (3 de ellos con la solución ácida ferrocuprífera). Destaca la presencia de yeso en un porcentaje semicuantitativo de 2% en ambas muestras analizadas. Los diagramas Eh vs pH y la modelación geoquímica realizados con anterioridad para este suelo, habían sugerido la posible precipitación de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ), por lo que el análisis de DRX confirma la existencia de esta fase mineral, sin embargo, su identificación en la muestra analizada antes de los riegos no permite afirmar que su presencia se deba al paso de la solución ácida. La precipitación de yeso puede deberse a la disolución de las plagioclasas identificadas, liberando  $\text{Ca}^{2+}$ , el cual puede precipitar como yeso cuando se alcanzan las condiciones de sobresaturación de los sulfatos presentes en la solución ácida y el calcio liberado.

La modelación geoquímica realizada en este suelo (ver Tabla 50), sugirió la precipitación de fases minerales como  $\text{AlOHSO}_4(\text{s})$ , hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y alunita ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), sin embargo, ninguno de estos sólidos fue identificado por medio de DRX. A pesar de ello, no se descarta su formación a mayores profundidades a las analizadas o incluso es posible que no hayan sido detectados por encontrarse en concentraciones muy bajas o por ser fases poco cristalinas.

Se había mencionado anteriormente el nulo contenido de carbonatos en este suelo (ver tablas 17 y 18), los cuales no fueron identificados por medio de DRX. Considerando este punto, la capacidad neutralizadora de acidez en este suelo es inexistente, tal como se vio en la figura 32.

En la sección 5.3.1 se observó que a pesar de tratarse de un suelo con nula capacidad neutralizadora de acidez (a valores altos de acidez los metales tienden a estar en forma soluble) este suelo presenta condiciones para la retención de EPT. Esta retención puede ser explicada por procesos de precipitación o sorción. Si bien no se identificaron precipitados secundarios por medio de DRX (es posible su precipitación a niveles inferiores en la columna) si fueron identificados minerales arcillosos como illita o caolinita, los cuales son capaces de retener vía sorción diferentes elementos metálicos (Levy et al., 1997; Holmstrom y Ohlander, 2001).

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

b) Columna de sedimento El Álamo.

En la tabla 60 se observan las fases minerales identificadas antes y después de los riegos realizados en este sedimento. En dicha tabla se presenta el índice de pérdida o enriquecimiento (I mineral) para cada fase identificada. De igual forma, en la figura 91 se presentan los difractogramas para los análisis realizados.

Tabla 60. Fases minerales identificadas en el sedimento El Álamo antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera. NA: No Aplica.

Muestra	Minerales identificados sin riego	%	Minerales identificados después de los riegos	%	I mineral
Sedimento El Álamo	1. Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	41	1. Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	38	0.07
	2. Plagioclasa de composición intermedia (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	16	2. Plagioclasa de composición intermedia (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	15	0.06
	3. Feldespato potásico (KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	11	3. Feldespato potásico (KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	15	-0.36
	4. Anfíbol tipo magnesiohornblenda o similar	3	4. Anfíbol tipo magnesiohornblenda o similar	3	0.00
	5. Yeso: CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	0	5. Yeso: CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	4	NA
	6. Filosilicatos a ≈ 14Å pbb (Vermiculita)	15	6. Filosilicatos a ≈ 14Å pbb (Vermiculita)	8	0.47
	7. Filosilicatos a ≈ 10Å pbb (Illita)	10	7. Filosilicatos a ≈ 10Å pbb (Illita)	11	-0.10
	8. Filosilicatos a ≈ 7Å pbb (Caolinita)	3	8. Filosilicatos a ≈ 7Å pbb (Caolinita)	0	1.00
	9. Ferrihidrita: (Fe <sup>3+</sup> ) <sub>4-5</sub> (OH,O) <sub>12</sub>	0	9. Ferrihidrita: (Fe <sup>3+</sup> ) <sub>4-5</sub> (OH,O) <sub>12</sub>	4	NA
	10. Schwertmanita: Fe <sup>3+</sup> <sub>16</sub> O <sub>16</sub> (OH) <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0	10. Schwertmanita: Fe <sup>3+</sup> <sub>16</sub> O <sub>16</sub> (OH) <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	2	NA

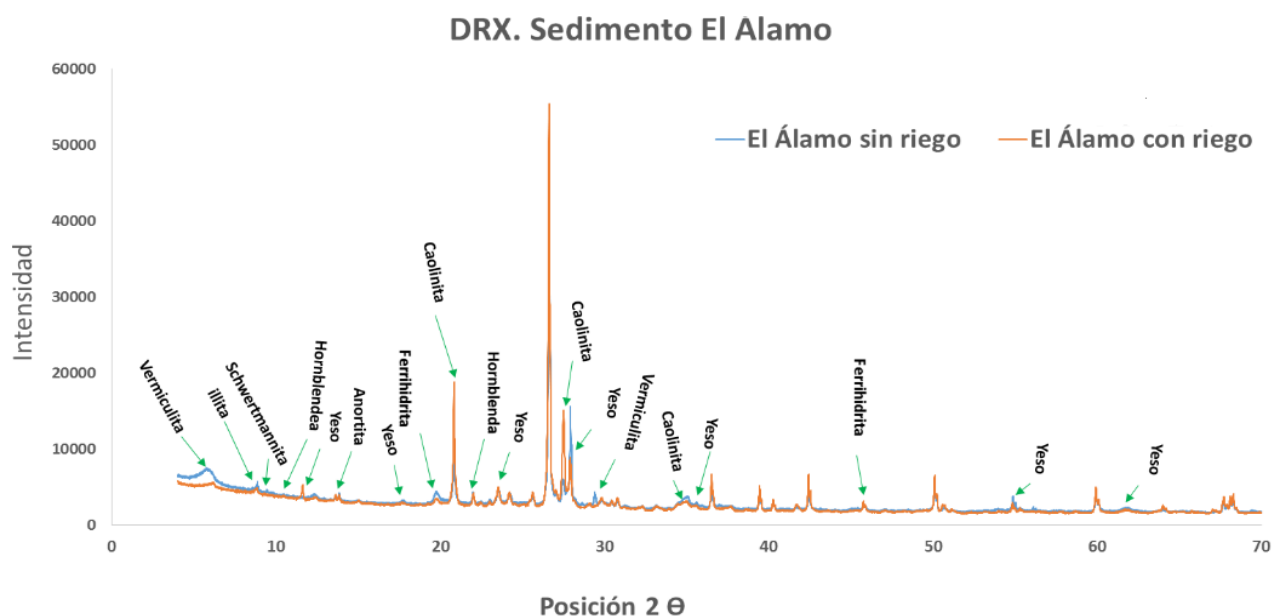


Figura 91. Difractogramas para el sedimento El Álamo en donde se observan algunas fases minerales identificadas por el análisis de DRX.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la tabla 60 se observan los cambios mineralógicos ocurridos en los primeros centímetros del sedimento El Álamo como producto de la interacción de la solución ácida ferrocuprífera y el sedimento. En general, se observa la disminución en el porcentaje de los filosilicatos vermiculita y caolinita (este último presenta un I mineral igual a 0 debido a su pérdida total después de los experimentos con la solución ácida) después del cuarto riego y la formación de los minerales yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ferrihidrita ( $\text{Fe}^{3+}_{4-5}(\text{OH},\text{O})_{12}$ ) y schwertmanita:  $\text{Fe}^{3+}_{16}\text{O}_{16}(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_2$ , los cuales no fueron identificados en la muestra sin riego.

En los diagramas Eh vs pH se determinó la estabilidad de los minerales yeso y jarosita, el primero de ellos fue determinado en los análisis de DRX, en un porcentaje de hasta 4%, por su parte, el segundo no fue identificado en los primeros centímetros, sin embargo es posible su precipitación en niveles más profundos de la columna.

En cuanto a la modelación geoquímica para el sedimento El Álamo (Tabla 51), se observa que los sólidos  $\text{AlOHSO}_4(\text{s})$ , alunita ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) presentan un índice de saturación igual o mayor a 0 en varios tiempos analizados durante los diferentes riegos realizados, no obstante, solamente se identificó la presencia de yeso en los análisis de DRX. A pesar de ello, es posible que la técnica utilizada no los haya detectado por sus bajas concentraciones o por su poca cristalinidad.

Como en el caso del suelo Tinajas, no se observa la presencia de minerales carbonatados en el sedimento El Álamo, por lo cual, la capacidad para neutralizar la acidez en este sedimento es nula (tal como se observó en la figura 37).

En la sección 5.3.1 se comentó que este sedimento presenta condiciones para retener a los EPT en diferentes proporciones, dicha retención puede deberse a fenómenos de sorción en la superficie de minerales arcillosos identificados por DRX (principalmente vermiculita e illita) o bien a fenómenos de precipitación y/o sorción en la superficie de minerales secundarios identificados por DRX como ferrihidrita y schwertmanita, formados como producto de la interacción de la solución ácida con el sedimento.

### c) Columna de sedimento Chilolo.

En la tabla 61 se observan las fases minerales identificadas antes y después de los riegos realizados en este sedimento. En dicha tabla se presenta el índice de pérdida o enriquecimiento (I mineral) para cada fase identificada. De igual forma, en la figura 92 se presentan los difractogramas para los análisis realizados.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tabla 61. Fases minerales identificadas en el sedimento Chilolo antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera. NA: No Aplica.

Muestra	Minerales identificados sin riego	%	Minerales identificados después de los riegos	%	I mineral
Sedimento Chilolo	1. Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	24	1. Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	33	-0.38
	2. Plagioclasa de composición intermedia (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	32	2. Plagioclasa de composición intermedia (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	14	0.56
	3. Feldespato potásico (KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	15	3. Feldespato potásico (KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	15	0.00
	4. Filosilicatos a ≈ 14Å pbb (Esmectita)	4	4. Filosilicatos a ≈ 14Å pbb (Esmectita)	0	1.00
	5. Filosilicatos a ≈ 10Å pbb (Illita)	15	5. Filosilicatos a ≈ 10Å pbb (Illita)	13	0.13
	6. Filosilicatos a ≈ 7Å pbb (Caolinita)	9	6. Filosilicatos a ≈ 7Å pbb (Caolinita)	3	0.67
	7. Yeso: CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	0	7. Yeso: CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	2	NA
	8. Ferrihidrita: (Fe <sup>3+</sup> ) <sub>4-5</sub> (OH,O) <sub>12</sub>	0	8. Ferrihidrita: (Fe <sup>3+</sup> ) <sub>4-5</sub> (OH,O) <sub>12</sub>	4	NA
	9. Schwertmanita: Fe <sup>3+</sup> <sub>16</sub> O <sub>16</sub> (OH) <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0	9. Schwertmanita: Fe <sup>3+</sup> <sub>16</sub> O <sub>16</sub> (OH) <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	2	NA

DRX. Sedimento Chilolo

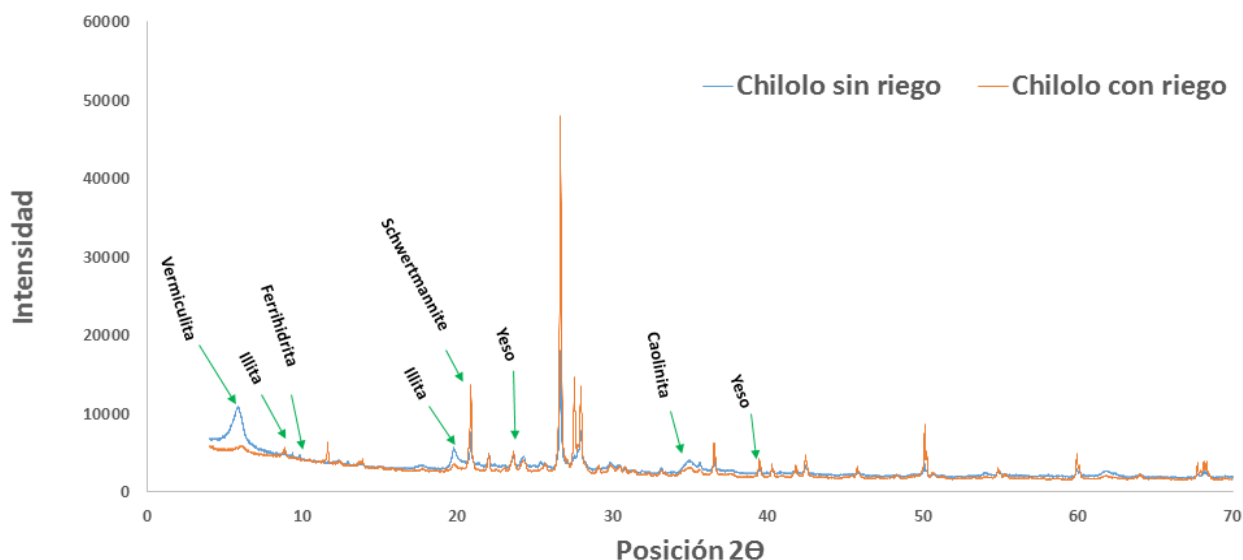


Figura 92. Difractogramas para el sedimento Chilolo en donde se observan algunas fases minerales identificadas por el análisis de DRX.

Contrario a lo esperado (tomando en cuenta las fugas en ambos riegos de esta columna y el poco tiempo de interacción entre la solución ácida ferrocuprífera y este sedimento), se identificaron cambios mineralógicos en el sedimento Chilolo después de los riegos realizados en la columna. A pesar de haber tenido un tiempo de interacción menor en comparación con el resto de las columnas, la solución ácida ferrocuprífera que logró pasar a través de la columna durante el primer riego facilitó dichos cambios.

Los principales cambios observados en la tabla 61 es la disminución en el contenido de plagioclasas (de 32% antes de los riegos a 14% después de los riegos) y filosilicatos (esmectita, illita y caolinita) y la precipitación de minerales secundarios: yeso, ferrihidrita y schwertmanita.

En los resultados presentados en los diagramas Eh vs pH y en la modelación geoquímica para el sedimento Chilolo (Tablas 52 y 53), se determinó la probable formación de minerales como alunita, boehmita, diásporo, gibbsita, yeso, hematita y jarosita. De todos ellos solo se identificó la presencia de yeso a través de los análisis por Difracción de Rayos X. El hecho de no haber sido detectados por esta técnica, no implica que no se encuentren precipitados (ya sea a niveles superficiales o más profundos) ya que lo pueden estar en bajas concentraciones.

Al igual que en el suelo Tinajas y el sedimento El Álamo, no se detectaron minerales carbonatados en las muestras analizadas del sedimento Chilolo, por lo que la ocurrencia de reacciones de neutralización de la acidez son poco probables (a pesar de ello, la acidez en los lixiviados colectados es menor en comparación a los lixiviados colectados en el suelo Tinajas y el sedimento El Álamo, tal como se ve en la figura 42, por lo que no se descarta la presencia de carbonatos u otros minerales neutralizadores en concentraciones no determinadas mediante DRX ).

En sección 5.3.1 se determinó que todos los EPT estudiados fueron retenidos en la base de la columna en diferentes proporciones. En primera instancia era evidente pensar que las bajas concentraciones solubles en la base de la columna se debían a las fugas presentes en la columna, sin embargo, los resultados presentes en la tabla 61 permiten suponer la probable retención de los EPT vía sorción y/o precipitación, ya sea en las superficies de los minerales arcillosos identificados o en la superficie de minerales secundarios como ferrihidrita y schwertmanita.

#### d) Columna de suelo Bacanuchi.

En la tabla 62 se observan las fases minerales identificadas antes y después de los riegos realizados en este suelo. En dicha tabla se presenta el índice de pérdida o enriquecimiento (I mineral) para cada fase identificada. De igual forma, en la figura 93 se presentan los difractogramas para los análisis realizados.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tabla 62. Fases minerales identificadas en el suelo Bacanuchi antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera. NA: No Aplica.

Muestra	Minerales identificados sin riego	%	Minerales identificados después de los riegos	%	I mineral
Suelo Bacanuchi	1. Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	47	1. Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	41	0.13
	2. Plagioclasa de composición intermedia (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	30	2. Plagioclasa de composición intermedia (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> - CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	27	0.10
	3. Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	4	3. Calcita: (CaCO <sub>3</sub> )	0	1.00
	4. Filosilicatos a ≈ 14Å pbb (Vermiculita)	5	4. Filosilicatos a ≈ 14Å pbb (Vermiculita)	3	0.40
	5. Filosilicatos a ≈ 10Å pbb (Illita)	14	5. Filosilicatos a ≈ 10Å pbb (Illita)	9	0.36
	6. Yeso: CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	0	6. Yeso: CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	14	NA
	7. Ferrihidrita: (Fe <sup>3+</sup> ) <sub>4-5</sub> (OH,O) <sub>12</sub>	0	7. Ferrihidrita: (Fe <sup>3+</sup> ) <sub>4-5</sub> (OH,O) <sub>12</sub>	3	NA
	8. Schwertmanita: Fe <sup>3+</sup> <sub>16</sub> O <sub>16</sub> (OH) <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0	8. Schwertmanita: Fe <sup>3+</sup> <sub>16</sub> O <sub>16</sub> (OH) <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	2	NA
	9. Jarosita: KFe <sub>3</sub> <sup>(3+)</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	0	9. Jarosita: KFe <sub>3</sub> <sup>(3+)</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	1	NA

DRX. Suelo Bacanuchi

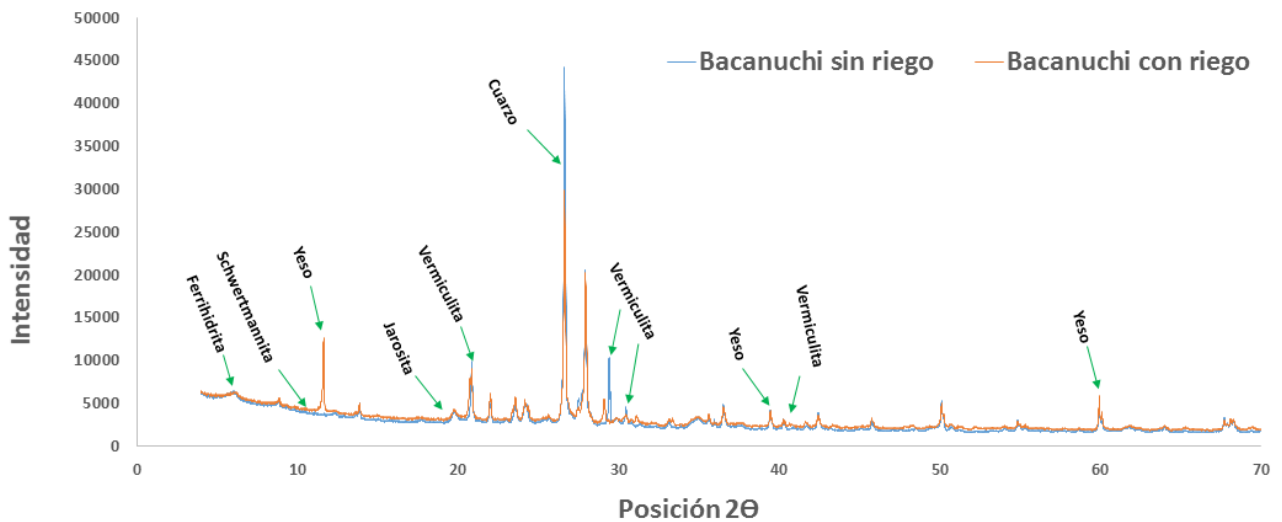


Figura 93. Difractogramas para el suelo Bacanuchi en donde se observan algunas fases minerales identificadas por el análisis de DRX.

A diferencia de las muestras Tinajas, El Álamo y Chilolo, en el suelo Bacanuchi se detectó la presencia de calcita (CaCO<sub>3</sub>), el cual se había inferido por la efervescencia de esta muestra con ácido clorhídrico (Tabla 17). La presencia de este mineral, permite al suelo tener la capacidad de neutralizar la acidez de la solución ácida infiltrada en el suelo, ya que los valores de pH presentes en los lixiviados colectados en la base de la columna presentan valores cercanos a la neutralidad tanto en el primer y segundo riego, empezando a perder

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

dicha capacidad después del tercer riego (ver Figura 47), lo cual se asocia a la desaparición total de calcita después del último riego con la solución ácida ferrocuprífera (ver Tabla 62).

Las reacciones que involucran la disolución de carbonatos, pueden mantener las condiciones de pH cercanas a las neutras, así como prevenir la liberación y movilidad de metales solubles que generalmente ocurren en condiciones ácidas (Jambor y Blower, 1994; Dold, 2002). La disolución de la calcita bajo condiciones ácidas, consume la acidez y produce la liberación de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) que en presencia de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) deriva en la precipitación de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ), el cual fue debidamente identificado por la técnica de DRX. El yeso es un mineral indicador de procesos de oxidación y neutralización. Las reacciones 8 y 9 ilustran los procesos de disolución de calcita y formación de yeso, respectivamente.



La presencia de bicarbonatos disueltos en los lixiviados colectados en la base de la columna de suelo Bacanuchi (Figura 51) puede ser explicada por la reacción 8, en donde los carbonatos presentes en el suelo se disuelven al estar en contacto con la solución ácida ferrocuprífera.

En la sección 5.3.3 (diagramas Eh vs pH) y en la sección 5.3.4 (modelación geoquímica) se determinó la posibilidad de formación de minerales como hematita, jarosita, pirolusita, yeso, alunita, boehmita, diásporo, ferrihidrita y gibbsita en varias profundidades en el suelo Bacanuchi después del paso de 3 riegos con la solución ácida ferrocuprífera. Los análisis de Difracción de Rayos X en la muestra superficial (0-4 cm) evaluada, determinó la presencia de yeso (14%), ferrihidrita (3%) y jarosita (1%), además del mineral schwertmanita (el cual no había sido determinado como un probable mineral secundario ni en los diagramas Eh vs pH ni en la modelación geoquímica). A pesar de ello, no se descarta la presencia de los minerales no identificados por DRX (hematita, pirolusita, alunita, boehmita, diásporo y gibbsita) ya que pueden encontrarse en concentraciones no detectables por la técnica utilizada o presentar baja cristalinidad.

La columna Bacanuchi fue capaz de retener a los EPT analizados hasta en un 100% durante los dos primeros riegos con la solución ácida ferrocuprífera (ver sección 5.3.1), dicha retención puede estar asociada a los valores de pH neutros que presentan los lixiviados colectados como respuesta a la capacidad neutralizadora de este suelo por la presencia de calcita, dicha capacidad neutralizadora favorece la poca movilidad de dichos elementos. De igual forma, la retención de los EPT puede estar favorecida por fenómenos de retención vía sorción en minerales detectados por DRX como filosilicatos (vermiculita e illita) o por precipitación-sorción en minerales secundarios como ferrihidrita, jarosita y schwertmanita, formados después de la interacción de la solución ácida con este suelo.



**Resumen de los análisis de DRX:**

Existen diferentes mecanismos que permiten atenuar la contaminación de lixiviados ácidos, entre estos mecanismos se tiene la neutralización, la precipitación de minerales secundarios y los fenómenos de sorción de metales pesados.

Como se observó en el suelo Bacanuchi, la neutralización está relacionada con la disolución de minerales (principalmente carbonatos) que consumen acidez. Como se observó por medio de DRX, solamente el suelo Bacanuchi presenta calcita, principal mineral neutralizador de la acidez, sin embargo, todos los suelos y sedimentos analizados presentan en su mineralogía primaria silicatos, como plagioclasas y feldespato potásico (en el caso de las muestras Tinajas, El Álamo y Chilolo) los cuales al disolverse también pueden consumir protones  $H^+$ , aportando al agua cationes base ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ), elementos alcalinos ( $Na^+$ ,  $K^+$ ), Si y Al (Blowes y Ptacek, 1994), los cuales pueden precipitar en nuevas fases minerales. No obstante, la disolución de estos minerales es mucho más lenta que la de los carbonatos, por lo mismo la neutralización de la acidez es mucho menor en estas muestras en comparación al suelo Bacanuchi.

La precipitación de minerales secundarios a partir de soluciones ácidas, se ve favorecida por la elevada salinidad que poseen estas soluciones y se presenta cuando la actividad de sulfatos y metales disueltos supera el producto de solubilidad. Los minerales secundarios formados por soluciones ácidas más comúnmente citados en la literatura son ferrihidrita, jarosita y schwermanita (Bigham et al., 1996), los cuales fueron identificados en los análisis de DRX en las muestras analizadas después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera, encontrándose en la muestra de El Álamo ferrihidrita y schwermanita, en el sedimento Chilolo ferrihidrita y schwermanita y en el suelo Bacanuchi ferrihidrita, schwermanita y jarosita. En el caso del suelo Tinajas no fueron detectados, sin embargo, es posible que estén por debajo de los límites de detección de la técnica. La precipitación de uno u otro mineral depende de la disponibilidad de iones y de los valores de Eh-pH del medio (Bigham et al., 1996). En las siguientes reacciones se observan los procesos para la formación de dichos minerales:

**Ferrihidrita:**  $Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_{3(s)} + H^+ \rightarrow$  (Reacción 10).

**Jarosita:**  $K^+ + 3Fe^{3+} + 2SO_4^{2-} + 6H_2O \rightarrow KFe_3(SO_4)_2(OH)_6 + 6H^+ \rightarrow$  (Reacción 11).

**Schwermanita:**  $8Fe^{3+} + SO_4^{2-} + 14H_2O \rightarrow Fe_8O_8(OH)_6(SO_4) + 22H^+ \rightarrow$  (Reacción 12).

La precipitación de estos minerales es importante, ya que presentan condiciones para retener diferentes EPT debido a fenómenos de sorción (Goldberg, 1986; Fuller et al., 1993; Foster et al., 1998).

Los resultados de DRX también demuestran que en todas las muestras analizadas después de los diferentes riegos se presenta la formación de yeso ( $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ ). En el caso del suelo Bacanuchi está asociado a la disolución de la calcita que libera iones  $Ca^{2+}$  que posteriormente pueden precipitar con los sulfatos retenidos presentes en la solución ácida ferrocuprífera. En el caso de las muestras Tinajas, El Álamo y Chilolo, el calcio requerido para la formación de yeso proviene probablemente de la disolución de plagioclasas de calcio identificadas en las muestras.

Es importante notar que el análisis de DRX se realizó en muestras superficiales (no fue posible analizar a mayores profundidades por diferentes razones relacionadas a otros estudios hechos en las columnas) que abarcan los primeros 4 centímetros de cada columna, por lo mismo, solo es posible asegurar la ocurrencia de cambios mineralógicos a esa profundidad, no obstante, es probable la existencia de fenómenos de precipitación de minerales secundarios en diferentes profundidades, tal como lo sugieren los diagramas Eh vs pH y la modelación geoquímica realizadas en todas las columnas a diferentes profundidades.

### 5.3.7 Colorimetría

Los resultados mostrados en el análisis de Difracción de Rayos X demuestran la precipitación de minerales secundarios producto de la interacción de la solución ácida y las diferentes columnas de suelo/sedimento. Esta interacción se vio reflejada en cambios de color después de los experimentos realizados. Estos cambios de coloración se observaron en todas las columnas después de los diferentes riegos, siendo más notorio en la columna de suelo Bacanuchi (Figura 94).



**Figura 94. Cambios de coloración en la columna de suelo Bacanuchi después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera.**

Con el propósito de cuantificar esos cambios de color, se realizó un análisis colorimétrico en muestras superficiales tomadas en los dos primeros centímetros en cada columna una vez finalizados todos los riegos (los cambios de color se observaron en diferentes profundidades como se observa en la figura 94, sin embargo, por diferentes cuestiones solo se analizaron los primeros centímetros). Los resultados se muestran en las siguientes páginas.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

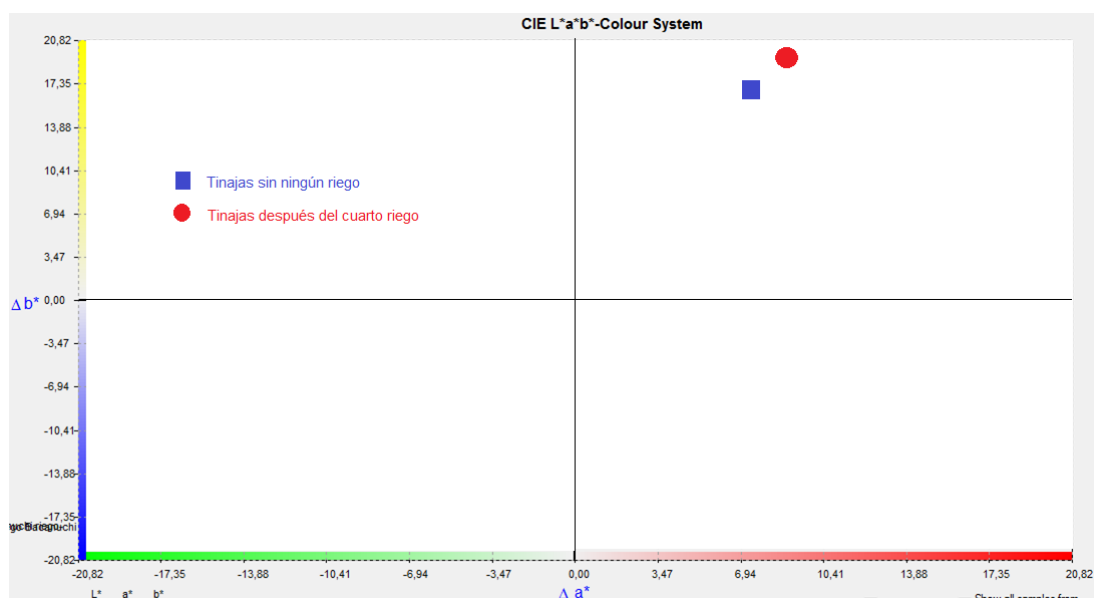
### A) Columna de suelo Tinajas.

Como se mencionó en la metodología, se utilizaron los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  para cuantificar los cambios de color en las muestras obtenidas después de los riegos, con el propósito de compararlas con aquellas muestras tomadas en los mismos sitios antes de los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera.

En la tabla 63 se observan los parámetros evaluados para determinar los cambios de color en el suelo Tinajas. En la figura 95 se observan gráficamente dichos cambios.

**Tabla 63. Análisis colorimétrico en el suelo Tinajas antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.**

<i>Muestra</i>	$L^*$	$a^*$	$b^*$
Tinajas sin riego	48.27	8.00	16.38
	48.18	7.50	17.02
	47.91	7.64	17.59
<b>Promedio</b>	<b>48.12</b>	<b>7.71</b>	<b>17.00</b>
Tinajas con riego	56.33	8.86	19.11
	57.28	8.79	18.12
	54.18	8.93	18.23
<b>Promedio</b>	<b>55.93</b>	<b>8.86</b>	<b>18.48</b>
$\Delta L^*$	<b>7.81</b>		
$\Delta a^*$	<b>1.15</b>		
$\Delta b^*$	<b>1.49</b>		
$\Delta E^*$	<b>8.03</b>		



**Figura 95. Cambios de coloración tomando en cuenta los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  en el suelo Tinajas.**

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados de la tabla 63 permiten observar que el parámetro  $L^*$  (luminosidad) cambia de un promedio de 48.12 en la muestra sin riego, a 55.93 en la muestra analizada después de los riegos. Por su parte, el parámetro  $a^*$  (a positivo indica color rojo) aumenta de un valor de 7.71 a 8.86 después de los riegos. Por su parte, el parámetro  $b^*$  (b positivo indica color amarillo) aumenta de 17 a 18.48. Estos resultados reflejan un aumento en la luminosidad ( $L^*$ ), en la coloración rojiza ( $a^*$ ) y en la coloración amarilla ( $b^*$ ) en la muestra obtenida posterior a los experimentos. Los parámetros  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ , y  $\Delta b^*$  reflejan la variación entre las dos muestras, siendo los 3 valores positivos, es decir, los 3 parámetros aumentan en relación a la muestra sin riego. Por su parte, el parámetro  $\Delta E^*$  es la diferencia total de color entre ambas muestras.

### B) Columna de sedimento El Álamo.

En la tabla 64 se observan los parámetros evaluados para determinar los cambios de color en el sedimento El Álamo. En la figura 96 se observan gráficamente dichos cambios.

**Tabla 64. Análisis colorimétrico en el sedimento El Álamo antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.**

<i>Muestra</i>	$L^*$	$a^*$	$b^*$
El Álamo sin riego	59.02	6.37	15.82
	56.80	6.18	15.87
	57.92	6.40	15.37
<b>Promedio</b>	<b>57.91</b>	<b>6.32</b>	<b>15.69</b>
El Álamo con riego	65.13	6.48	17.83
	64.11	6.29	16.74
	66.69	6.68	17.90
<b>Promedio</b>	<b>65.31</b>	<b>6.48</b>	<b>17.49</b>
<b><math>\Delta L^*</math></b>	<b>7.40</b>		
<b><math>\Delta a^*</math></b>	<b>0.17</b>		
<b><math>\Delta b^*</math></b>	<b>1.80</b>		
<b><math>\Delta E^*</math></b>	<b>7.62</b>		

En lo que respecta al sedimento El Álamo, se observa un incremento en los tres parámetros utilizados en el análisis colorimétrico en la muestra tomada después de los cuatro riegos realizados en esta columna, aumentando  $L^*$  de 57.91 a 65.31,  $a^*$  de 6.32 a 6.48 y  $b^*$  de 15.69 a 17.49. Estos resultados reflejan principalmente un aumento en la luminosidad y en la coloración amarilla.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

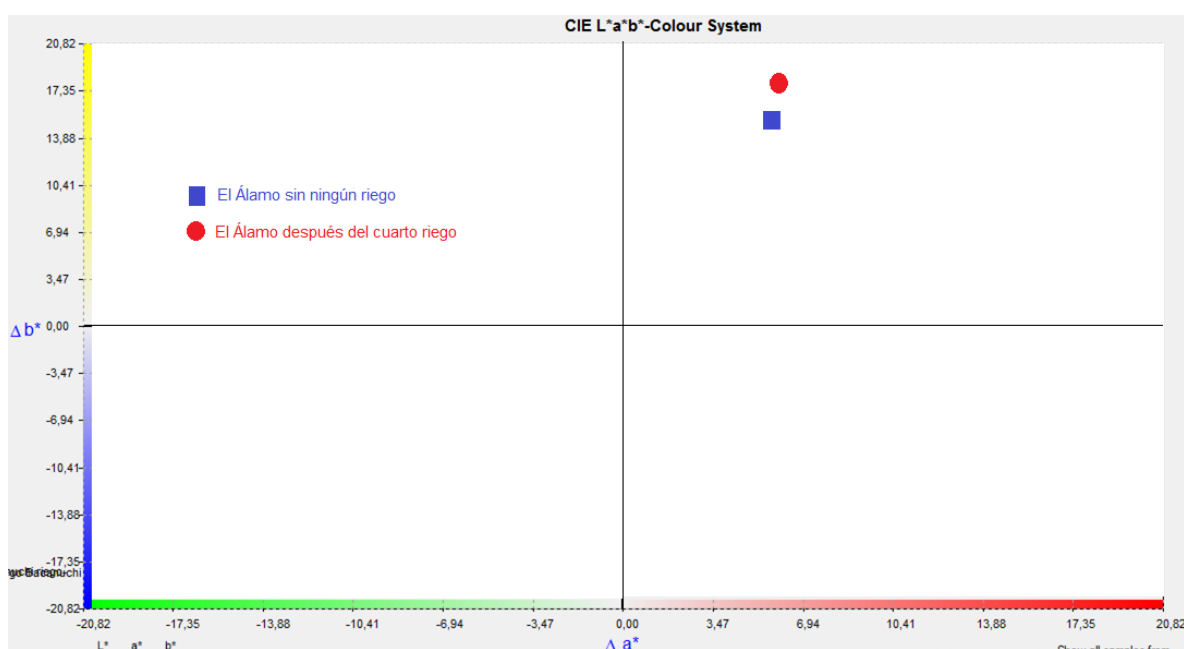


Figura 96. Cambios de coloración tomando en cuenta los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  en el sedimento El Álamo.

### C) Columna de sedimento Chilolo.

En la tabla 65 se observan los parámetros evaluados para determinar los cambios de color en el sedimento Chilolo. En la figura 97 se observan gráficamente dichos cambios.

Tabla 65. Análisis colorimétrico en el sedimento Chilolo antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.

<i>Muestra</i>	$L^*$	$a^*$	$b^*$
Chilolo sin riego	56.82	7.44	13.28
	56.79	5.24	11.30
	55.90	7.52	15.19
<b>Promedio</b>	<b>56.50</b>	<b>6.73</b>	<b>13.26</b>
Chilolo con riego	59.22	6.44	17.91
	60.12	6.25	17.21
	61.63	6.03	17.14
<b>Promedio</b>	<b>60.32</b>	<b>6.24</b>	<b>17.42</b>
<b><math>\Delta L^*</math></b>	<b>3.82</b>		
<b><math>\Delta a^*</math></b>	<b>-0.50</b>		
<b><math>\Delta b^*</math></b>	<b>4.16</b>		
<b><math>\Delta E^*</math></b>	<b>5.67</b>		

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

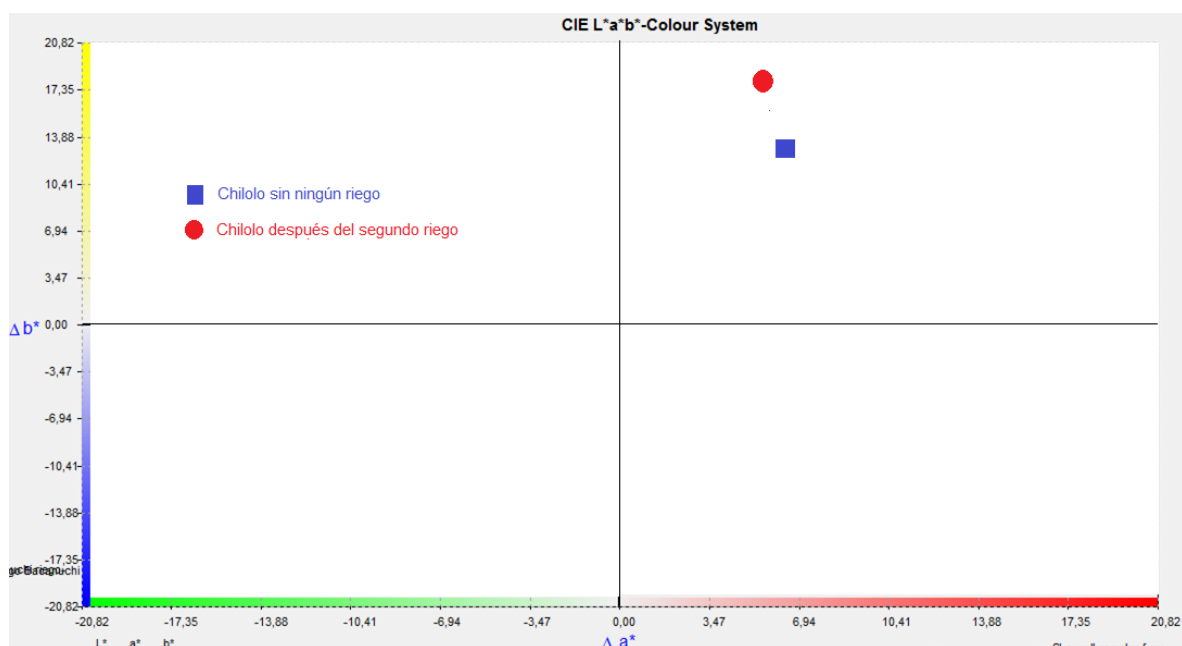


Figura 97. Cambios de coloración tomando en cuenta los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  en el sedimento Chilolo.

Al igual que en el suelo Tinajas y el sedimento El Álamo, se observa un incremento en el parámetro de luminosidad ( $L^*$ ) que aumenta desde un valor de 56.50 hasta 60.32 después de los riegos realizados en esta columna. De igual forma, se observa un incremento en la coloración amarilla, aumentando el parámetro  $b^*$  de 13.26 a 17.42. En lo que respecta al parámetro  $a^*$  (coloración roja) se observa un ligero decremento después de los riegos, disminuyendo de 6.73 a 6.24. El  $\Delta E^*$  (diferencia total de color = 5.67) es menor en comparación a las muestras del suelo Tinajas (8.03) y el sedimento El Álamo (7.62), lo que refleja menores cambios de coloración en el sedimento Chilolo después del paso de la solución ácida (lo que puede ser explicado por el menor tiempo de contacto de la solución con el sedimento).

### D) Columna de suelo Bacanuchi.

En la tabla 66 se observan los parámetros evaluados para determinar los cambios de color en el suelo Bacanuchi. En la figura 98 se observan gráficamente dichos cambios.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tabla 66. Análisis colorimétrico en el suelo Bacanuchi antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera.

Muestra	L*	a*	b*
Bacanuchi sin riego	56.76	5.57	14.16
	54.46	5.65	13.12
	56.71	5.48	13.91
<b>Promedio</b>	<b>55.97</b>	<b>5.57</b>	<b>13.73</b>
Bacanuchi con riego	55.34	6.13	18.50
	54.50	6.27	18.13
	56.09	6.30	18.45
<b>Promedio</b>	<b>55.31</b>	<b>6.23</b>	<b>18.36</b>
$\Delta L^*$	-0.66		
$\Delta a^*$	0.67		
$\Delta b^*$	4.63		
$\Delta E^*$	4.73		

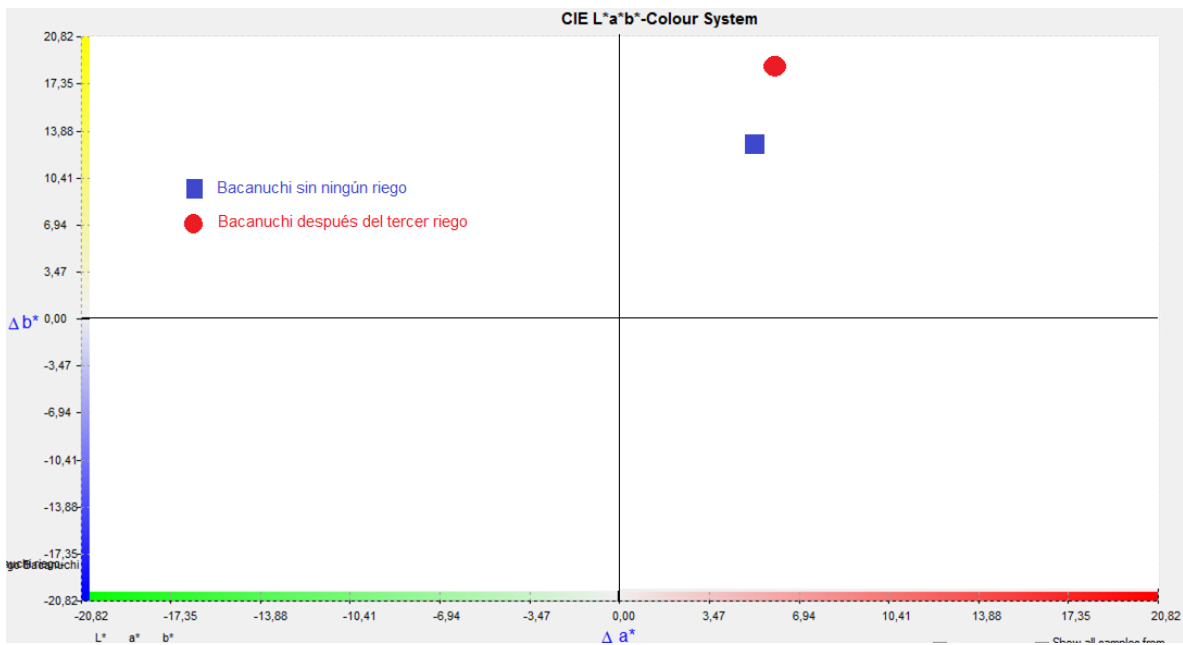


Figura 98. Cambios de coloración tomando en cuenta los parámetros a\* y b\* en el suelo Bacanuchi.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados mostrados en la tabla 66 reflejan un ligero decremento en la luminosidad de la muestra tomada después de los tres riegos con la solución ácida ferrocuprífera, sin embargo, los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  aumentan, siendo principalmente la coloración amarilla la que presenta un mayor incremento (de 13.73 a 18.36). A pesar de presentar el menor  $\Delta E^*$  de todas las muestras, este se ve reflejado por la inexistencia de cambios en la luminosidad (a diferencia de los presentes en las otras muestras) y por el contrario, presenta el mayor  $\Delta b^*$ , lo que refleja que el aumento en la coloración amarilla es mayor en relación a las otras columnas.

Según la USDA (USDA, 2017), la presencia de coloraciones amarillas en suelos o sedimentos puede deberse a minerales de hierro como la goethita o jarosita. Por su parte, las coloraciones rojizas pueden ser atribuidas a minerales como hematita o ferrihidrita.

Los resultados del análisis colorimétrico reflejan el incremento en coloraciones rojizas en todas las muestras obtenidas después de los riegos (con excepción de la columna de sedimento Chilolo), sin embargo, los principales cambios reflejados se observan en el aumento de coloraciones amarillas en todas las columnas. Dichos cambios pueden estar asociados a la precipitación de minerales secundarios de hierro (ferrihidrita, jarosita y schweermanita) que fueron debidamente identificados por medio de la técnica de DRX. Cabe hacer notar que a pesar de no haber sido detectado ninguno de estos minerales en la columna de suelo Tinajas (ver Tabla 59) los cambios de color permiten suponer su presencia, aunque probablemente su baja concentración o escasa cristalinidad impidieron que la técnica los identificara.

A pesar de que el cambio de color fue evidente a simple vista (como se observa en la figura 94), el uso del análisis colorimétrico es importante, ya que el cuantificar los cambios de color debido al contacto e interacción de la solución ácida ferrocuprífera con los diferentes suelos/sedimentos estudiados puede ser de relevancia para comparar y evaluar un evento de contaminación en campo, a través de la presencia de ciertos colores, relacionados a la precipitación de diferentes minerales (principalmente minerales de Fe).

### **5.3.8 Prueba de extracción de EPT después de los eventos de riego con la solución ácida ferrocuprífera.**

Esta prueba se realizó con el propósito de determinar la capacidad de liberación de los EPT retenidos en los suelos y sedimentos estudiados después de los riegos realizados con la solución ácida ferrocuprífera. Este análisis se llevó a cabo en las muestras más superficiales (0-2 cm) tomadas en las columnas después de los riegos. La tabla 68 muestra los resultados de la prueba de extracción considerando la concentración soluble de cada elemento (mg/L) junto con la concentración total (mg/kg) determinada por medio de FRX para cada EPT. Los resultados fueron comparados con los valores de fondo para aguas superficiales tomados de dos fuentes diferentes (Tabla 67), una realizada por la Universidad de Sonora (Burgos Flores, 2001) y otro realizado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON, 2005).



**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Tabla 67. Valores de fondo de EPT para aguas superficiales en la zona de estudio. ND: No Detectado.**

Elemento	Valor de fondo (Burgos Flores,2001)	Valor de fondo (ITSON, 2005)
	mg/L	
As	ND	ND
Cd	0.01	ND
Cr	ND	ND
Cu	2.77	22.74
Fe	36.1	235
Mn	22.9	5.88
Pb	1.55	ND
Zn	0.58	9.51

**Tabla 68. Concentración soluble de EPT después de las pruebas de extracción con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>. <LD: Debajo del límite de detección instrumental.**

Muestra	As total	As	Cd total	Cd	Cr total	Cr	Cu total	Cu	Fe total	Fe	Mn total	Mn	Pb total	Pb	Zn total	Zn
	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L
Blanco 1		<LD		<LD		<LD		0.04		0.05		0.05		<LD		0.1
Blanco 2		<LD		<LD		<LD		<LD		<LD		0.02		<LD		0.0
Tinajas 1	25.9	<LD	<LD	0.2	42.8	<LD	628.9	19.8	37589	0.25	1523.1	55.7	70.0	<LD	361.8	12.8
Tinajas 2	25.9	<LD	<LD	0.2	42.8	<LD	628.9	20.1	37589	0.25	1523.1	57.2	70.0	<LD	361.8	12.9
El Álamo 1	28.5	<LD	<LD	0.01	39.4	<LD	314.9	4.4	28364	0.01	1072.7	11.8	77.1	<LD	208.4	3.2
El Álamo 2	28.5	<LD	<LD	0.01	39.4	<LD	314.9	4.3	28364	2.78	1072.7	11.4	77.1	<LD	208.4	3.1
Chilolo 1	17.0	<LD	<LD	<LD	47.6	<LD	218.0	0.1	31429	1.53	607.7	3.0	61.0	<LD	132.1	0.1
Chilolo 2	17.0	<LD	<LD	<LD	47.6	<LD	218.0	0.2	31429	3.67	607.7	3.3	61.0	<LD	132.1	0.1
Bacanuchi 1	26.0	<LD	<LD	0.1	40.6	<LD	811.6	19.4	44685	0.22	1099.0	22.7	38.4	<LD	218.3	6.9
Bacanuchi 2	26.0	<LD	<LD	0.1	40.6	<LD	811.6	19.2	44685	0.23	1099.0	22.7	38.4	<LD	218.3	6.9

La tabla 68, muestra que As, Cr y Pb no se encuentran solubles en ninguna muestra, por lo que no se liberan desde los suelos y sedimentos después de la prueba de extracción.

En lo que respecta al Cd, a pesar de no haber sido detectado por la técnica de Fluorescencia de Rayos X en ninguna columna, este se encuentra soluble en las muestras Tinajas (0.2 mg/L), El Álamo (0.01 mg/L) y Bacanuchi (0.1 mg/L), superando el valor de fondo para aguas subterráneas (0.01 mg/L) las muestras Bacanuchi y Tinajas.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

La concentración de Cu soluble después de la prueba de extracción se encuentra en un intervalo de 0.1 - 20.1 (mg/L), el cual es menor al valor de fondo determinado en muestras de agua superficial por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON, 2005), sin embargo, todas las muestras, con excepción de las muestras analizadas del sedimento Chilolo, superan el valor de fondo de 2.77 mg/L determinado por Burgos Flores.

Para el Fe, la concentración soluble después de la prueba de extracción se encuentra en un intervalo de 0.01 – 3.67 (mg/L), dichos valores se encuentran por debajo de los valores de fondo en muestras de agua superficial, los cuales se encuentran entre 36.1 – 235 mg/L. Esto implica que la aportación de este elemento a las aguas superficiales después de la simulación de la infiltración de la solución ácida ferrocuprífera sería mucho menor que la que tienen los materiales geológicos presentes en la cuenca del río Sonora.

La concentración de Mn extraíble varía entre 3 y 57.2 (mg/L), siendo mayores a los valores de fondo obtenidos por el ITSON las muestras correspondientes al suelo Tinajas, suelo Bacanuchi y sedimento El Álamo, y mayores al obtenido por Burgos Flores las muestras de los suelos Tinajas y Bacanuchi.

Finalmente, la concentración soluble de Zn varía entre 0.1 (para el sedimento Chilolo) y 12.9 mg/L (para el suelo Tinajas), superando el valor de fondo determinado por el ITSON únicamente las muestras del suelo Tinajas.

La realización de varios eventos de riego con la solución ácida ferrocuprífera tuvo como objetivo primordial promover cambios físicos y químicos en los suelos y sedimentos estudiados, así como determinar la máxima capacidad amortiguadora y de retención de EPT en cada una de las matrices evaluadas. Es evidente que en cada columna se simularon eventos extremos, en donde se simuló la llegada de la solución ácida ferrocuprífera en 3 ocasiones en los suelos Tinajas, Bacanuchi y el sedimento El Álamo (en el sedimento Chilolo no se realizaron más riegos por los inconvenientes presentados en dicha columna). Debido a ello, la prueba de extracción tuvo la finalidad de determinar la posible liberación (utilizando agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>) de los elementos de interés retenidos después de la interacción de la solución ácida y las columnas colectadas.

Los resultados de la prueba de extracción demuestran que no existe liberación en los primeros dos centímetros de As, Cr y Pb en ninguna de las muestras estudiadas. Por su parte, el Fe liberado se encuentra por debajo de los valores de fondo para aguas superficiales. En lo que respecta a Cd, Cu, Mn y Zn, algunas muestras superan los valores de fondo para aguas superficiales, es decir, dadas las condiciones simuladas existiría una mayor liberación de estos elementos que el aportado por el material geológico en la cuenca, sin embargo, este escenario es totalmente teórico.

### 5.3.9 Análisis micromorfológico y morfométrico en secciones delgadas de suelos y sedimentos.

#### a) Análisis micromorfológico.

Con la intención de observar los cambios ocurridos en los suelos y sedimentos estudiados tras el paso de la solución ácida ferrocuprífera, se realizó un análisis micromorfológico en las secciones delgadas realizadas en cada columna. Los resultados por columna se muestran en las siguientes páginas.

#### 1. Columna Tinajas.

La mineralogía en la sección delgada realizada en la columna antes de los riegos está conformada principalmente por cuarzo, plagioclasas y feldespatos. De igual forma, se observan cristales de filosilicatos (los cuales fueron identificados por medio de DRX, ver Tabla 59). La mineralogía presentada en la tabla 59 demuestra la existencia de yeso tanto en las muestras analizadas antes como después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera, sin embargo, en la sección delgada analizada antes de los riegos no se observó la presencia de yeso. En la figura 99 se observan dos microfotografías tomadas de la sección analizada.

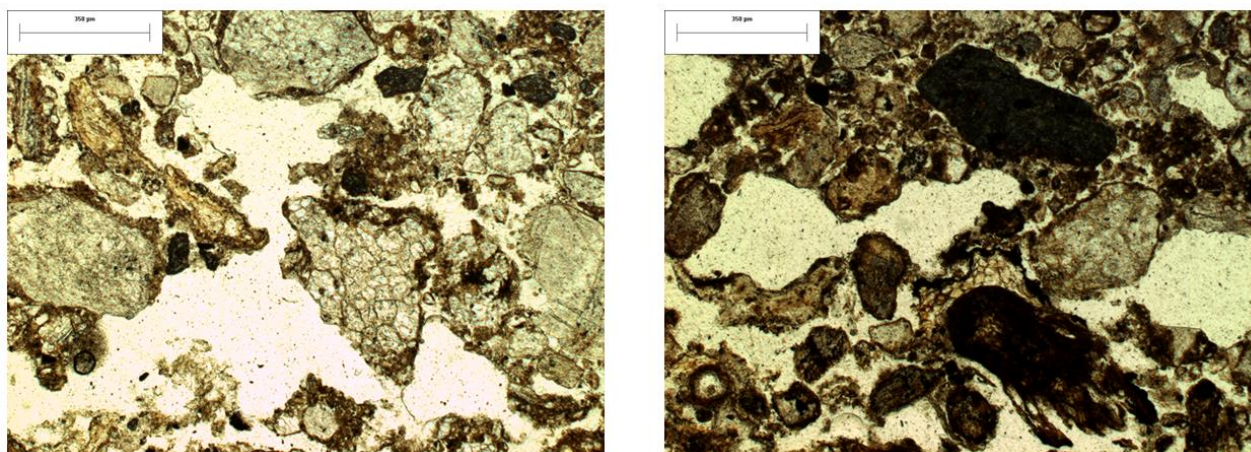


Figura 99. Microfotografías tomadas de la sección delgada del suelo Tinajas sin ningún riego.

Las 5 secciones analizadas después de los riegos (las cuales corresponden a diferentes profundidades de la columna), presentan la misma mineralogía, predominando cristales de cuarzo, plagioclasas, feldespatos y arcillas minerales. Se destaca la presencia de yeso a las profundidades de 0-4 y 8-12 cm, mineral que fue previamente identificado en la sección 5.3.6. De igual forma, se observan precipitados con coloraciones rojizas en los bordes de muchos cristales, principalmente en arcillas minerales. Estos precipitados pueden corresponder a minerales de hierro formados como consecuencia de la interacción de la solución ácida con este suelo. La figura 100 presenta microfotografías de las secciones analizadas después de los riegos.

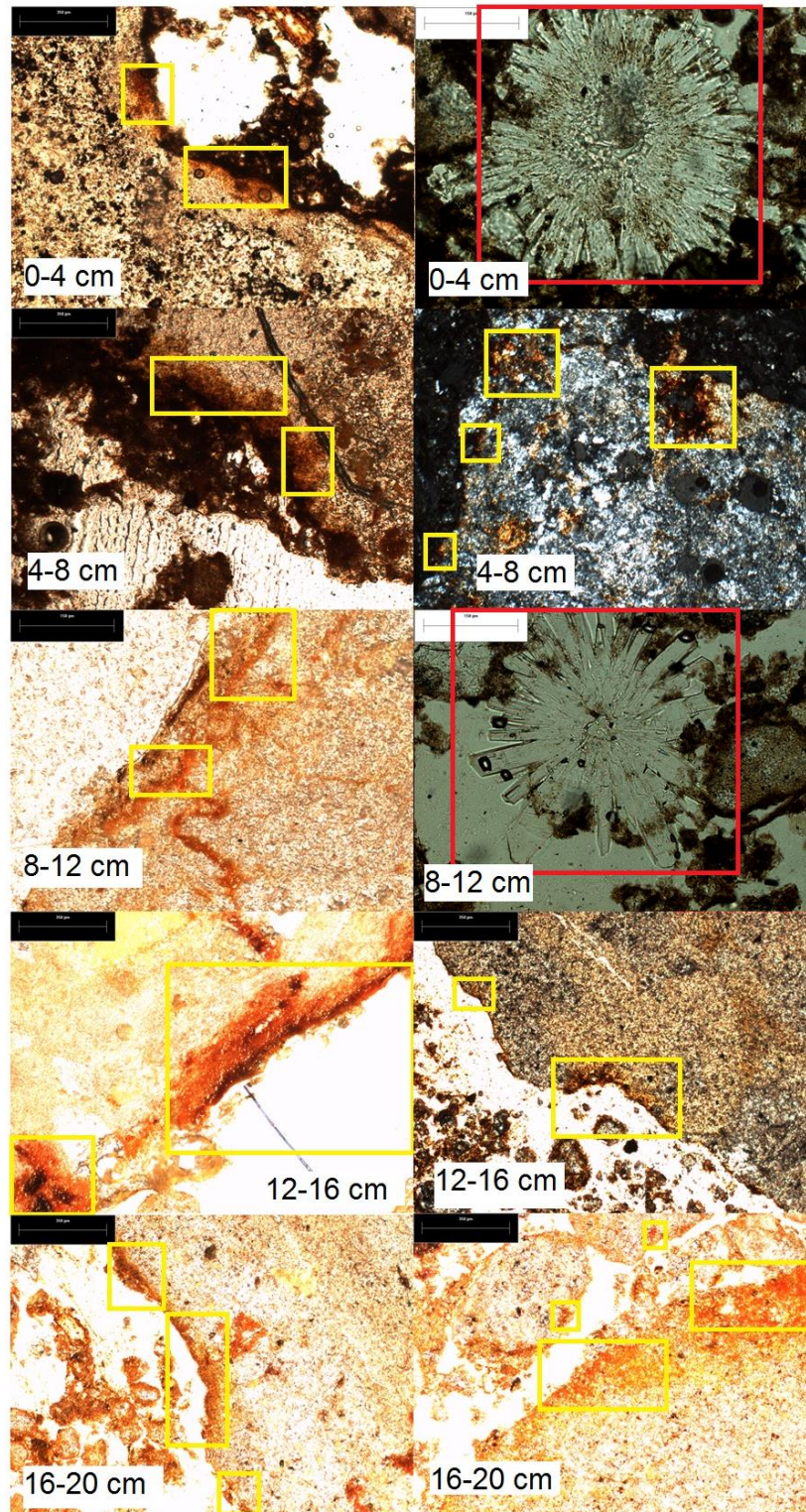


Figura 100. Microfotografías de secciones delgadas analizadas en diferentes profundidades del suelo Tinajas después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera. En cuadros amarillos se destaca la presencia de precipitados rojizos en los bordes de ciertos cristales. En cuadros rojos se señala la presencia de yeso.

## 2. Columna El Álamo.

En lo que respecta a la sección delgada analizada sin ningún riego, la mineralogía predominante está conformada principalmente por cristales de cuarzo, plagioclasas, feldespatos, así como cristales que corresponden al grupo de los filosilicatos. De igual forma, se destaca la presencia de minerales opacos. La mineralogía determinada coincide con los resultados presentados en la sección de Difracción de Rayos X (ver Tabla 60). En la figura 101 se observan dos microfotografías tomadas de la sección analizada.

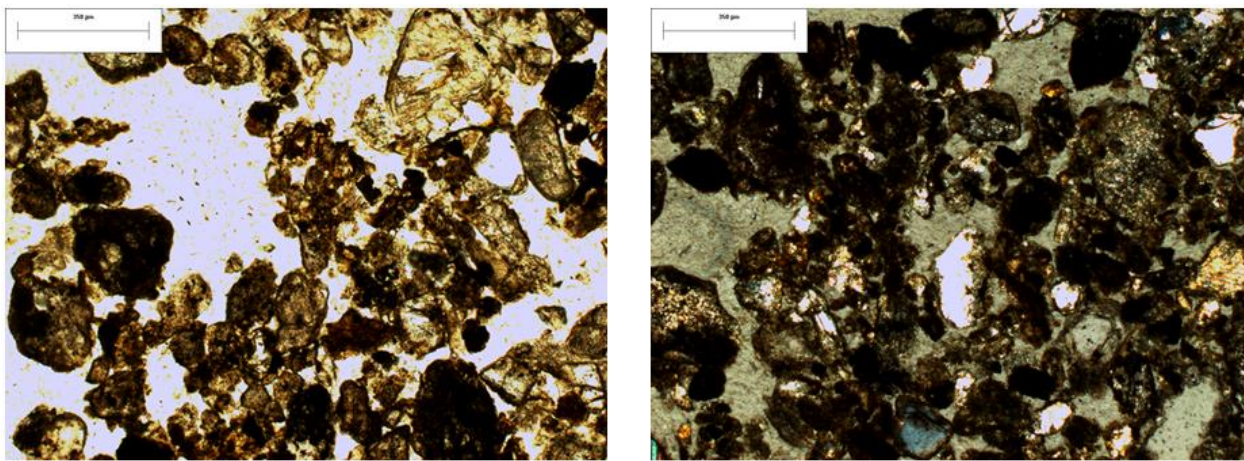


Figura 101. Microfotografías tomadas de la sección delgada del sedimento El Álamo sin ningún riego.

El análisis micromorfológico en las secciones obtenidas a diferentes profundidades después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera, demuestra la presencia de precipitados rojizos en los bordes de algunos cristales, los cuales aparentemente corresponden a minerales arcillosos. Estos precipitados rojizos no fueron identificados en la sección sin riego. Es probable que estos precipitados correspondan a minerales de hierro como ferrihidrita y schwertmanita, debidamente identificados por medio de DRX.

Se determinó la presencia de yeso en algunas profundidades, sobre todo en el intervalo de 16 a 20 cm. El yeso había sido previamente identificado por medio de DRX en la superficie de la columna. La figura 102 presenta microfotografías de las secciones analizadas después de los riegos.

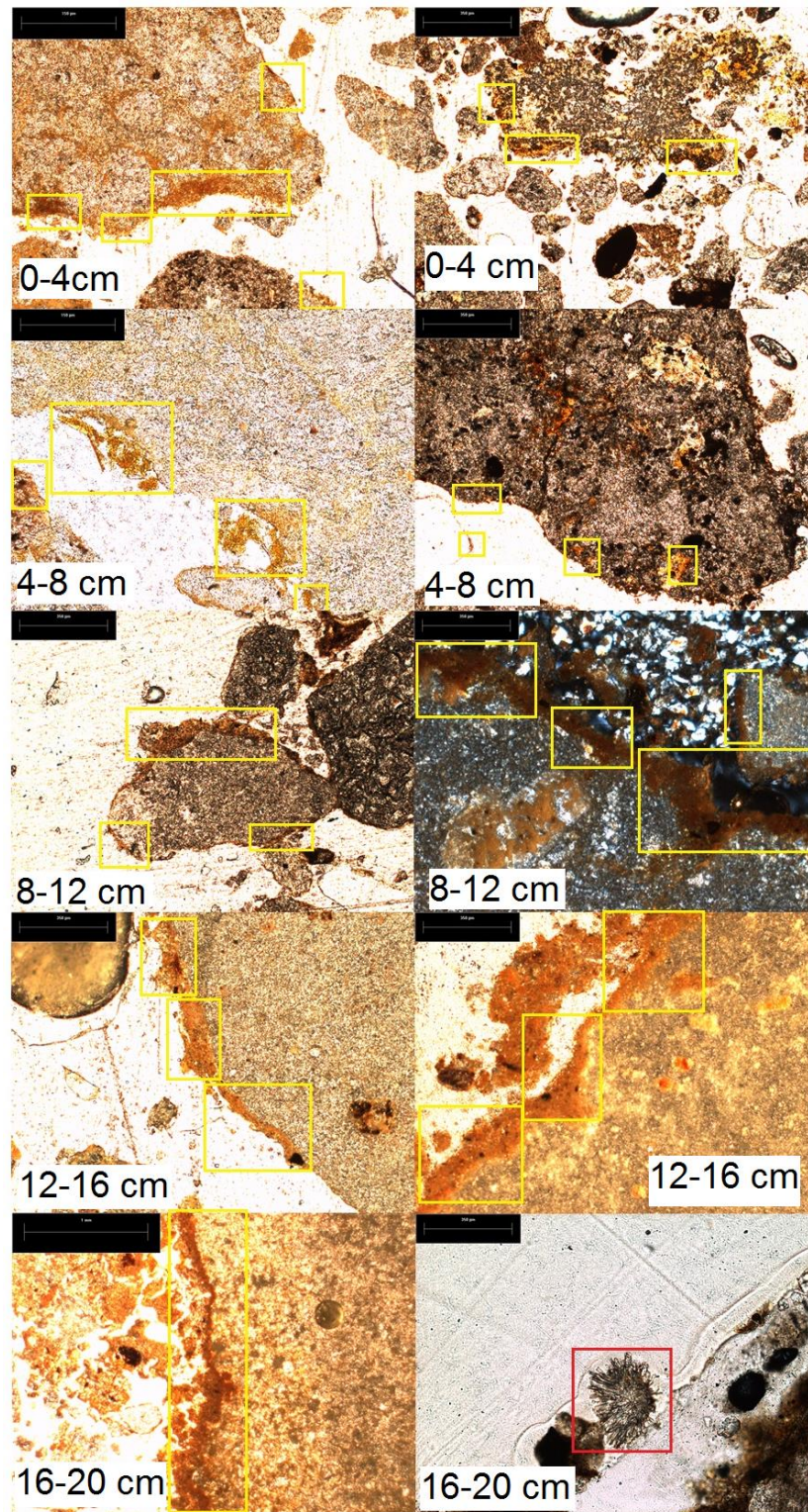


Figura 102. Microfotografías de secciones delgadas analizadas en diferentes profundidades del sedimento El Álamo después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera. En cuadros amarillos se destaca la presencia de precipitados rojizos en los bordes de ciertos cristales. En el cuadro rojo se señala la presencia de yeso.

### 3. Columna Chilolo

La sección delgada analizada antes de los riegos presenta una mineralogía similar a las encontradas en las secciones del suelo Tinajas y el sedimento El Álamo, es decir, principalmente se observa cuarzo y plagioclasas y en menor proporción minerales del tipo feldespato y cristales de filosilicatos. A diferencia de las columnas anteriores, se observa una coloración rojiza en la sección del sedimento Chilolo, lo cual puede deberse a una génesis diferente en relación a las muestras anteriores, incluso, la columna muestreada del sedimento Chilolo se encuentra cerca de la intersección entre el arroyo Tinajas y el río Bacanuchi, por lo que se infieren procesos diferentes en la formación de este material. En la figura 103 se observan dos microfotografías tomadas de la sección analizada.

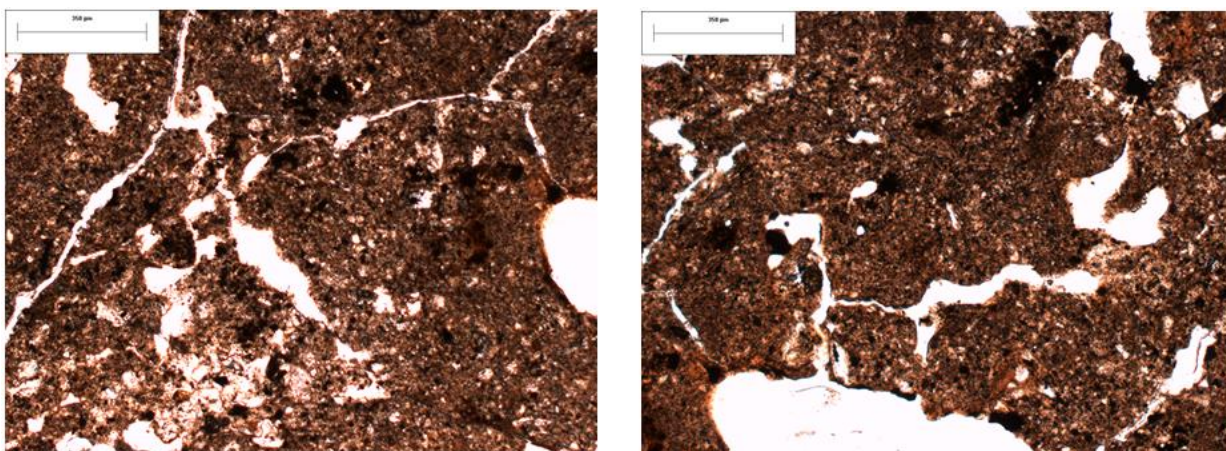


Figura 103. Microfotografías tomadas de la sección delgada del sedimento Chilolo sin ningún riego.

Como se observa en la figura 103, es notorio la presencia de coloraciones rojizas en el sedimento Chilolo antes de los experimentos, no obstante, en las secciones delgadas analizadas en diferentes profundidades después de los dos riegos realizados en esta columna, es posible distinguir la presencia de precipitados rojizos en los bordes de ciertos cristales (principalmente arcillas minerales y plagioclasas), los cuales son claramente diferentes a la matriz rojiza que se observa en la figura 103.

A pesar de que en la sección de DRX se determinó la presencia de yeso en los primeros centímetros de la columna, en el análisis micromorfológico no se observó la presencia del mismo en ninguna profundidad. La figura 104 presenta microfotografías de las secciones analizadas después de los riegos.

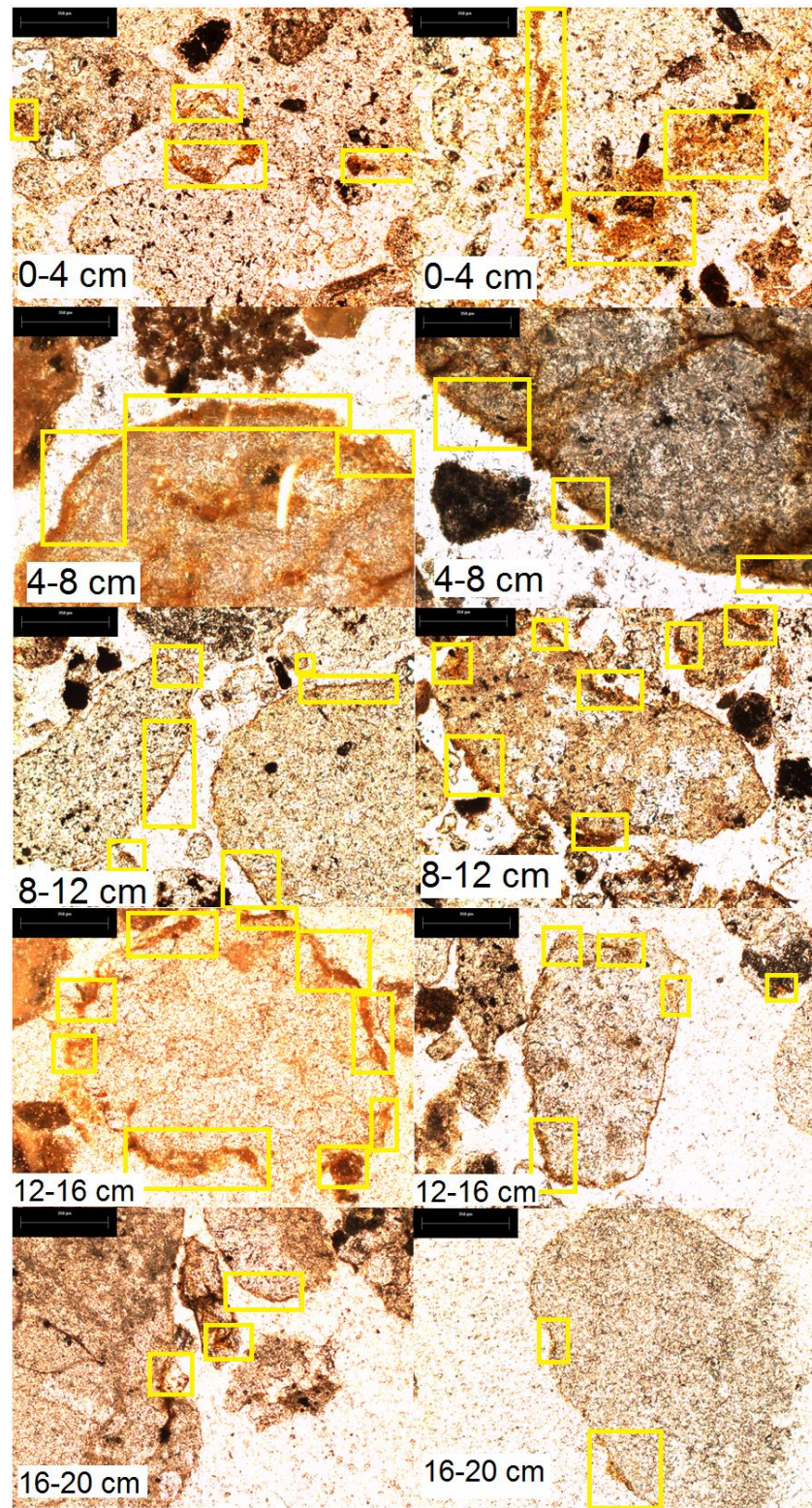


Figura 104. Microfotografías de secciones delgadas analizadas en diferentes profundidades del sedimento Chilolo después de los riegos con la solución ácida ferrocupriferá. En cuadros amarillos se destaca la presencia de precipitados rojizos en los bordes de ciertos cristales.



#### 4. Columna Bacanuchi.

En la figura 105 se observan dos imágenes de la sección delgada del suelo Bacanuchi sin ningún riego con la solución ácida ferrocuprífera, en dicha sección no se observaron precipitados rojizos en los bordes de cristales, únicamente se observó la presencia de coloraciones rojizas en el interior de algunos minerales, reflejando procesos de meteorización u óxido-reducción. La mineralogía predominante es de cuarzo, algunos cristales de calcita (mineral que fue identificado en la sección de DRX hasta en un 4%), plagioclasas, feldespato, filosilicatos y minerales opacos.

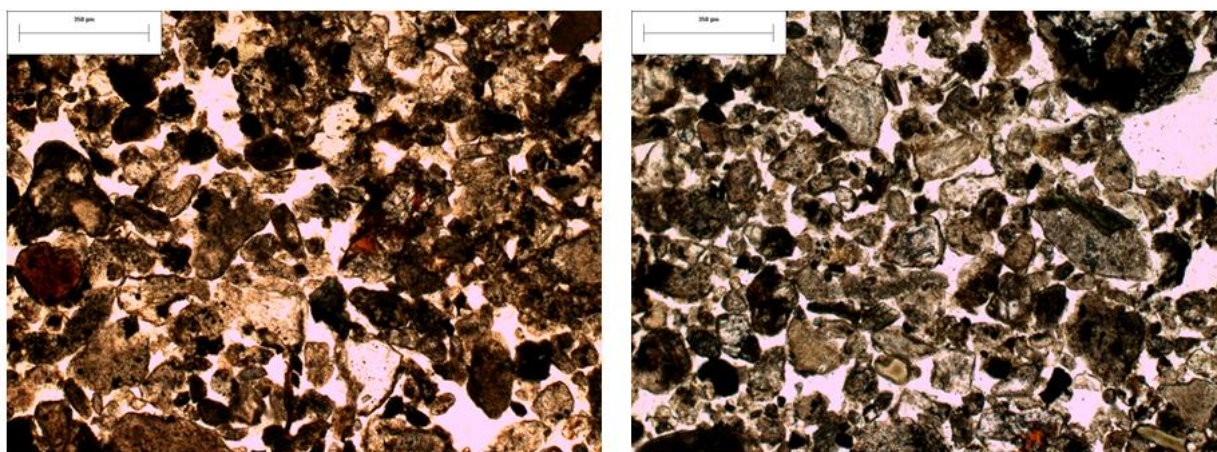


Figura 105. Microfotografías tomadas de la sección delgada del suelo Bacanuchi sin ningún riego.

Por su parte, las secciones analizadas después del paso del lixiviado ácido refleja la precipitación de nuevos minerales, principalmente yeso (el cual se identificó en todas las profundidades analizadas) y precipitados rojizos en los bordes de algunos cristales. Dichos precipitados pueden corresponder a minerales de hierro como ferrihidrita, jarosita y schwertmanita, formados por la interacción de la solución ácida y el suelo Bacanuchi. Cabe destacar la ausencia de calcita en todas las secciones analizadas, lo que refleja el agotamiento de la capacidad neutralizadora de acidez de este suelo después del paso del lixiviado ácido. La figura 106 presenta microfotografías de las secciones analizadas después de los riegos.

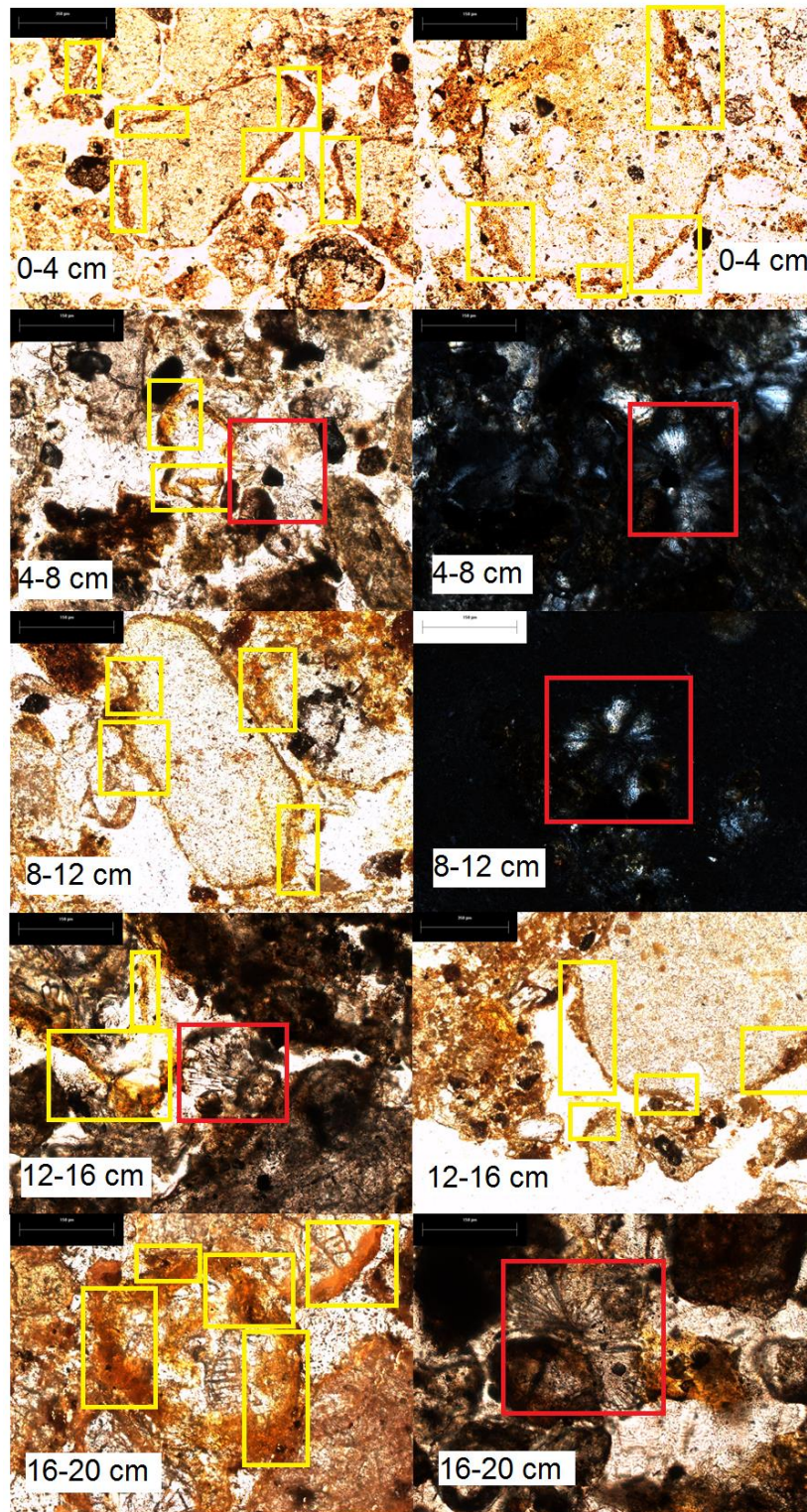


Figura 106. Microfotografías de secciones delgadas analizadas en diferentes profundidades del suelo Bacanuchi después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera. En cuadros amarillos se destaca la presencia de precipitados rojizos en los bordes de ciertos cristales. En cuadros rojos se señala la presencia de yeso.

### Resumen del análisis micromorfológico:

Las principales características observadas en las secciones son las siguientes:

- Un aumento en coloración rojiza y en la existencia de precipitados rojizos en las muestras regadas con el lixiviado ácido.
- Precipitación de yeso en las secciones delgadas analizadas después de los riegos con la solución ácida, dicho mineral no se encuentra presente en las secciones analizadas donde no se regó con este lixiviado ácido.
- La existencia de carbonatos en la sección sin riego de la columna de suelo Bacanuchi es poca (Difracción de Rayos X determinó un porcentaje de 4%), no obstante, el análisis micromorfológico en las secciones delgadas de este suelo después de los riegos permite determinar la ausencia de minerales carbonatados.

Al comparar las secciones delgadas de cada columna antes de los riegos (las cuales abarcan los primeros 5 centímetros de cada columna) con las secciones realizadas en los primeros 4 centímetros después de los riegos, se observa una aparente disminución en la porosidad total en las muestras afectadas con la solución ácida en comparación con las muestras originales (sin riego).

Para cuantificar los cambios observados en relación a la presencia de precipitados rojizos (posibles minerales de hierro formados como producto de la interacción de cada matriz con la solución ácida) y cambios de porosidad en las secciones delgadas de las muestras originales (sin riego) en comparación con las muestras regadas que abarcan los primeros centímetros de cada columna, se realizó un análisis morfométrico. Los resultados se observan en la siguiente sección.

### **b) Análisis morfométrico.**

Como se mencionó, este análisis se realizó en las secciones delgadas más superficiales de cada columna tanto antes como después de los riegos, con la intención de cuantificar los cambios en porosidad y en la presencia de precipitados rojizos. Este análisis se realizó en 3 imágenes diferentes de cada sección delgada analizada. Los resultados para cada columna se muestran en las siguientes páginas.

#### **1. Columna Tinajas.**

En la tabla 69 se observa la comparación de los resultados obtenidos en las muestras antes y después de los riegos. Por su parte, las figuras 107 y 108 muestran el análisis morfométrico en el suelo Tinajas antes y después de los experimentos con el lixiviado ácido, respectivamente.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tabla 69. Análisis morfométrico en secciones delgadas del suelo Tinajas.

Muestra	# de imagen	Precipitados rojizos	Otros minerales	Poros	Total
		%			
Tinajas sin riego	1	6.62	72.89	20.50	100
	2	2.89	59.99	37.12	100
	3	0.45	45.80	53.75	100
	PROMEDIO	3.32	59.56	37.12	100
Tinajas con riego	1	14.26	62.54	23.19	100
	2	10.40	62.93	26.67	100
	3	5.68	77.67	16.65	100
	PROMEDIO	10.12	67.71	22.17	100

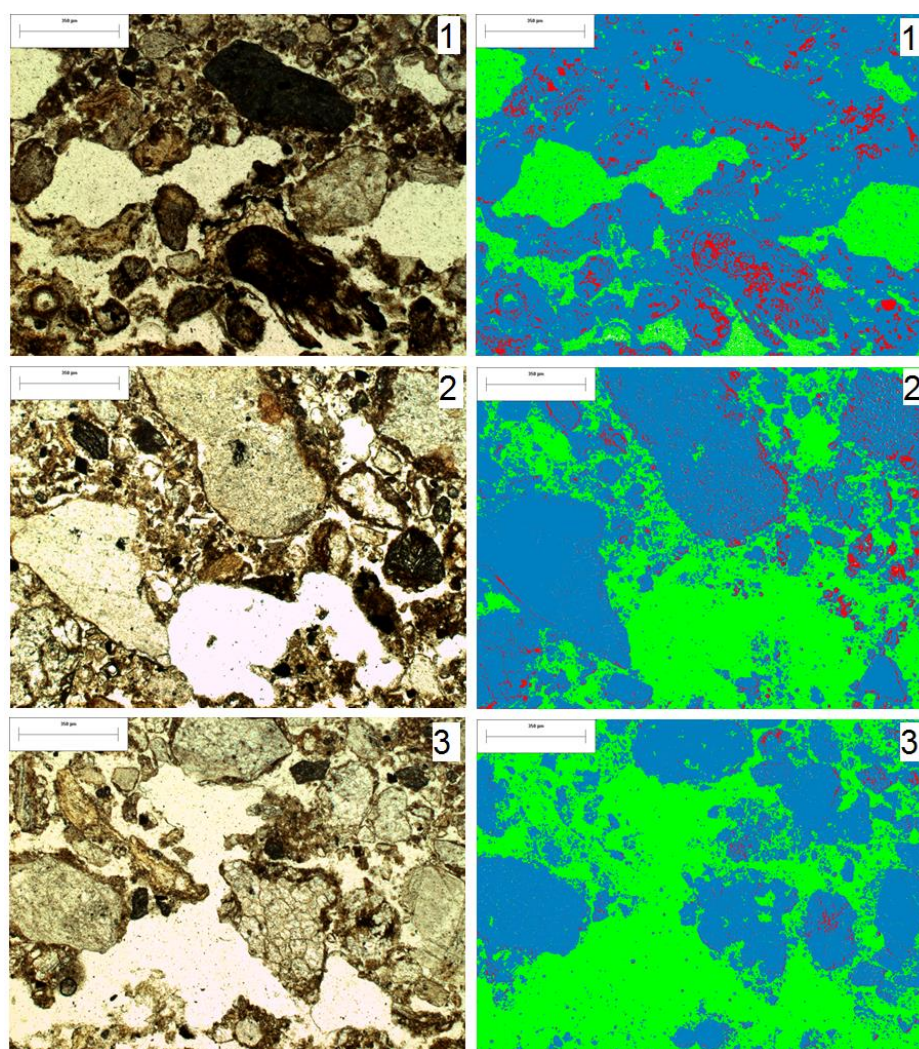
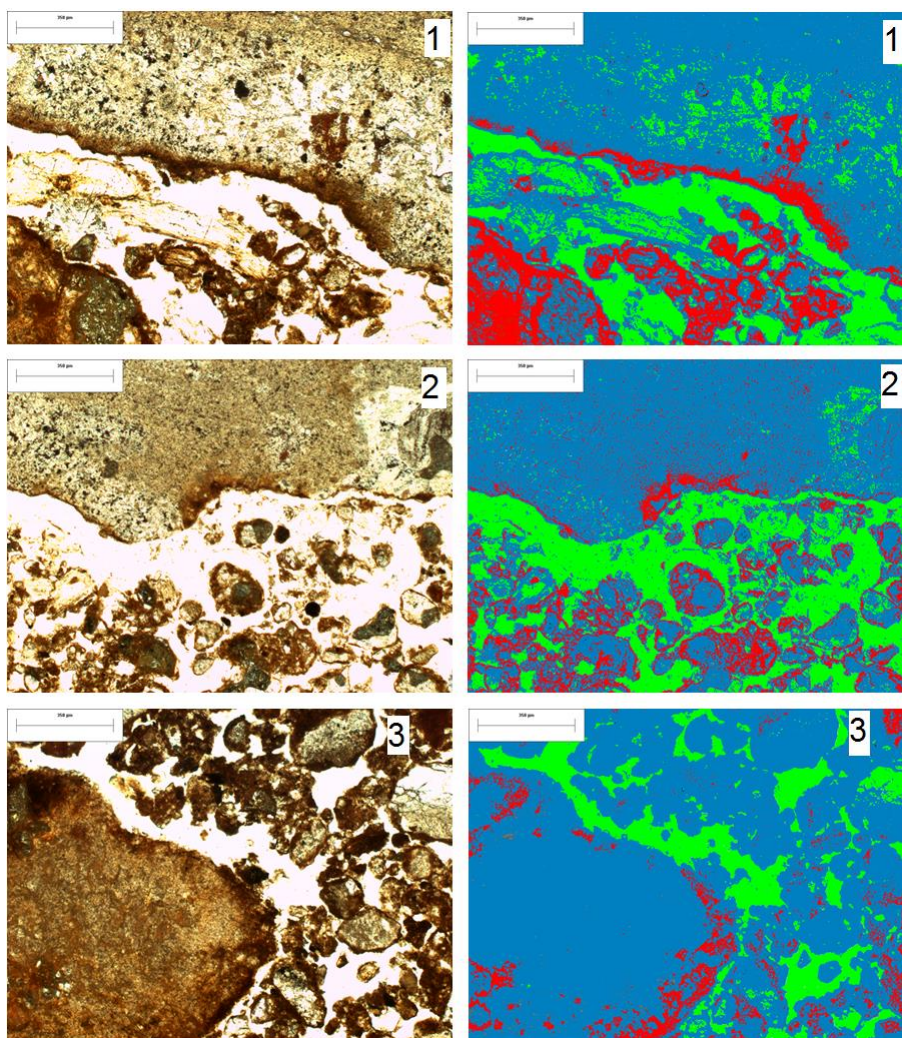


Figura 107. Microfotografías del análisis morfométrico en el suelo Tinajas sin ningún riego con el lixiviado ácido. En color rojo se muestran todos los precipitados rojizos que pueden corresponder a hierro, en color verde los poros y en color azul otros minerales presentes en la muestra.



**Figura 108.** Microfotografías del análisis morfométrico en el suelo Tinajas después de los riegos con el lixiviado ácido. En color rojo se muestran todos los precipitados rojizos que pueden corresponder a hierro, en color verde los poros y en color azul otros minerales presentes en la muestra.

Los resultados mostrados en el análisis morfométrico para el suelo Tinajas permiten determinar una disminución en la porosidad del suelo después del paso de la solución ácida ferrocuprífera, en el intervalo de 0-5 cm. Dicha disminución en la porosidad puede deberse a los espacios ocupados por la precipitación de nuevos minerales, como yeso y precipitados de minerales de hierro, lo cual se refleja por el aumento de los precipitados rojizos en las secciones analizadas después de los riegos, aumentando de un promedio de 3.32 % en las muestras sin irrigar a un promedio de 10.12% en las muestras irrigadas.

## **2. Columna El Álamo.**

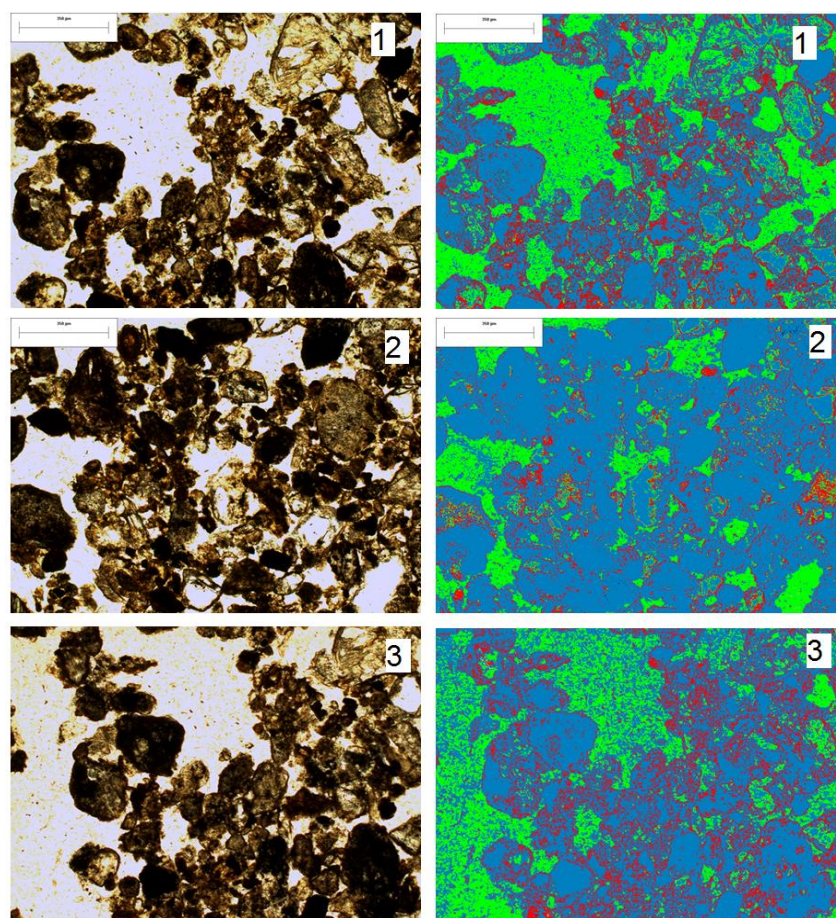
En la tabla 70 puede observarse la comparación de los resultados obtenidos en las muestras antes y después de los riegos. Por su parte, las figuras 109 y 110 muestran el

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

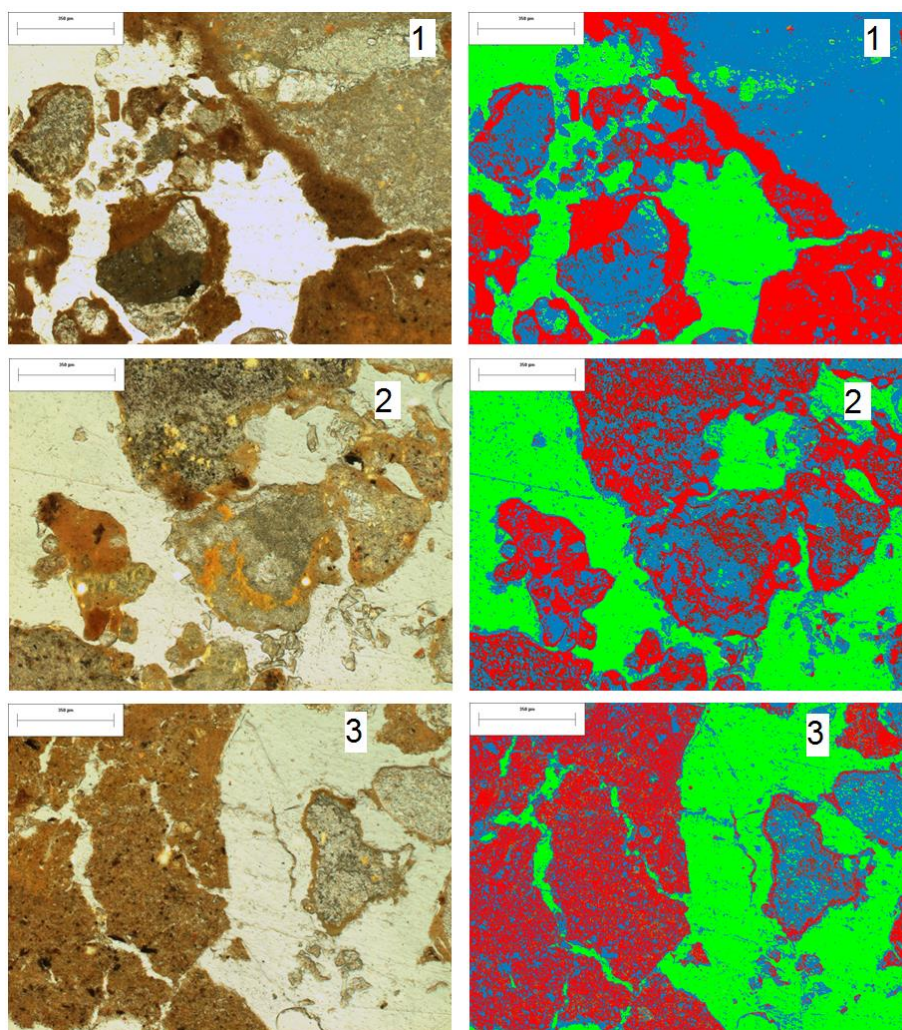
análisis morfométrico en el sedimento El Álamo antes y después de los experimentos con el lixiviado ácido, respectivamente.

**Tabla 70. Análisis morfométrico en secciones delgadas del sedimento El Álamo.**

Muestra	# de imagen	Precipitados rojizos	Otros minerales	Poros	Total
		%			
El Álamo sin riego	1	12.70	57.75	29.55	100
	2	7.53	78.76	13.71	100
	3	15.30	66.86	17.84	100
	<b>PROMEDIO</b>	<b>11.84</b>	<b>67.79</b>	<b>20.37</b>	<b>100</b>
El Álamo con riego	1	30.01	45.10	24.89	100
	2	26.25	34.50	39.25	100
	3	32.41	29.30	38.29	100
	<b>PROMEDIO</b>	<b>29.56</b>	<b>36.30</b>	<b>34.14</b>	<b>100</b>



**Figura 109. Microfotografías del análisis morfométrico en el sedimento El Álamo sin ningún riego con el lixiviado ácido. En color rojo se muestran todos los precipitados rojizos que pueden corresponder a hierro, en color verde los poros y en color azul otros minerales presentes en la muestra.**



**Figura 110.** Microfotografías del análisis morfométrico en el sedimento El Álamo después de los riegos con el lixiviado ácido. En color rojo se muestran todos los precipitados rojizos que pueden corresponder a hierro, en color verde los poros y en color azul otros minerales presentes en la muestra.

A diferencia del suelo Tinajas, se observa un aumento en la porosidad del sedimento El Álamo después de los riegos, ya que el promedio determinado de porosidad antes de los riegos fue de 20.37% aumentando a 34.14% después de los mismos. Dicho aumento puede deberse al poder erosivo de la solución ácida, la cual facilita la erosión de partículas por la acidez de la misma. En lo que respecta a los precipitados rojos, es notorio el aumento de ellos después de la interacción con la solución ácida, llegando a estar presentes hasta en un 32.41% en la tercer imagen analizada. Este aumento en los precipitados puede deberse a la formación de minerales de hierro determinados en los análisis de DRX.

### 3. Columna Chilolo.

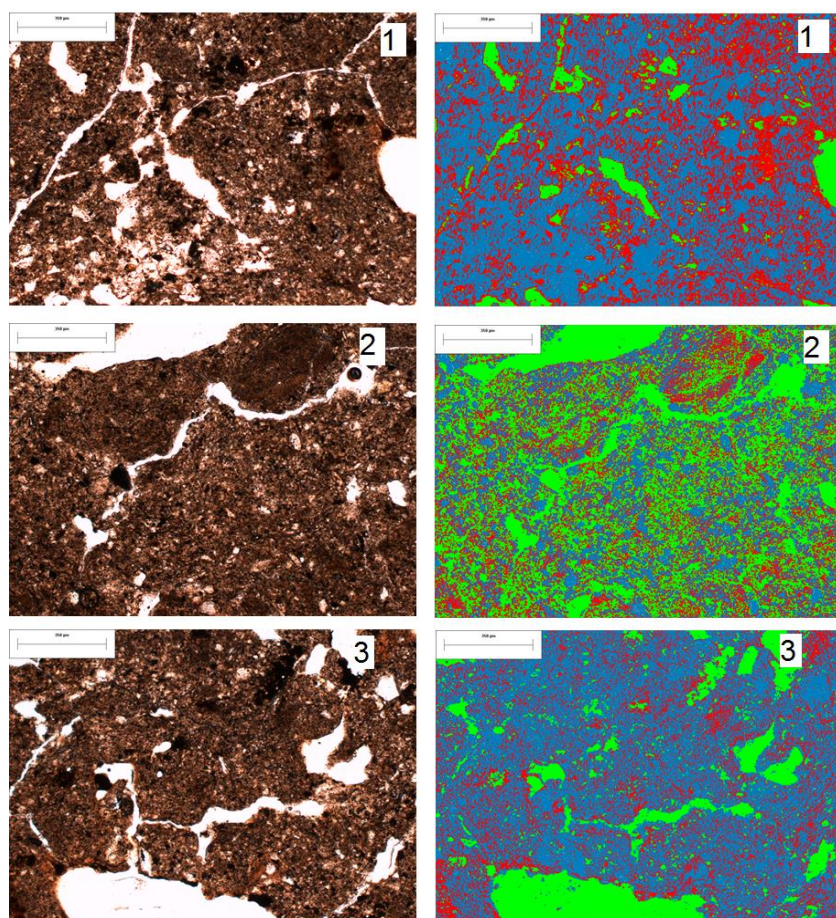
En la tabla 71 puede observarse la comparación de los resultados obtenidos en las muestras antes y después de los riegos. Por su parte, las figuras 111 y 112 muestran el

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

análisis morfométrico en el sedimento Chilolo antes y después de los experimentos con el lixiviado ácido, respectivamente.

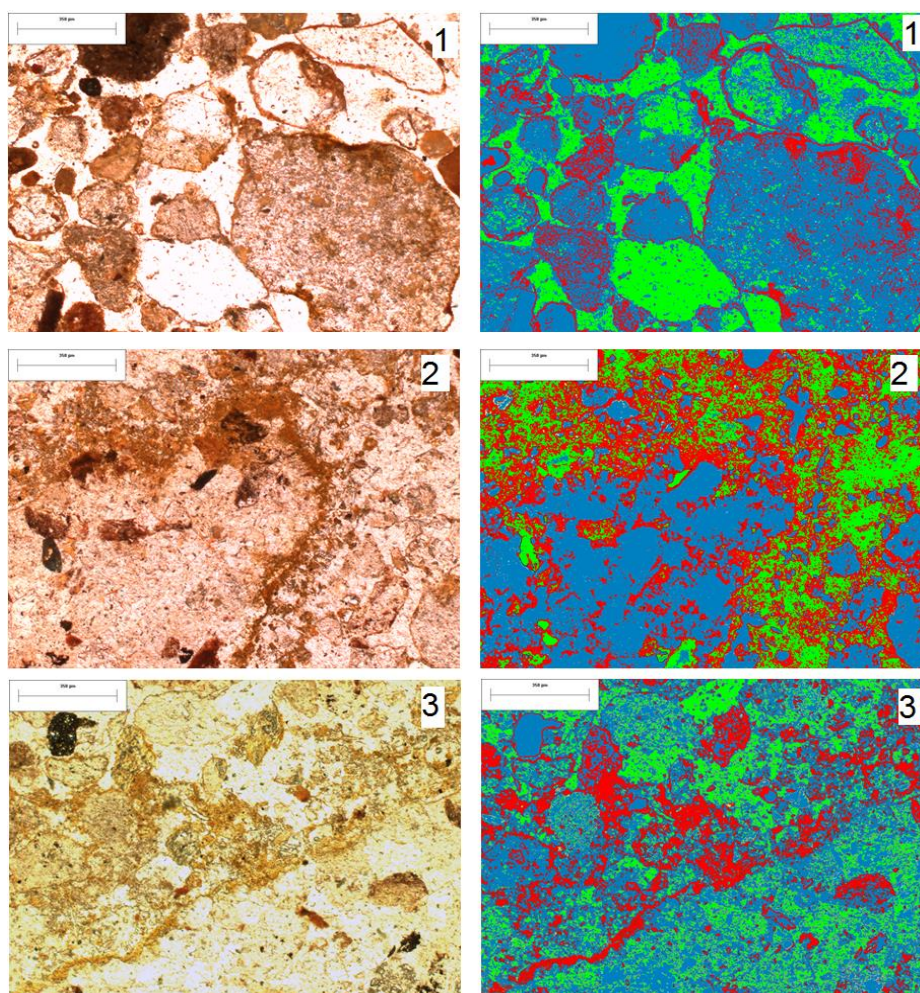
**Tabla 71. Análisis morfométrico en secciones delgadas del sedimento Chilolo.**

Muestra	# de imagen	Precipitados rojizos	Otros minerales	Poros	Total
		%			
Chilolo sin riego	1	33.08	59.57	7.34	100
	2	24.64	31.10	44.26	100
	3	19.38	59.68	20.95	100
	<b>PROMEDIO</b>	<b>25.70</b>	<b>50.12</b>	<b>24.18</b>	<b>100</b>
Chilolo con riego	1	12.82	63.23	23.93	100
	2	37.44	40.70	21.84	100
	3	17.14	48.65	34.20	100
	<b>PROMEDIO</b>	<b>22.47</b>	<b>50.86</b>	<b>26.66</b>	<b>100</b>



**Figura 111. Microfotografías del análisis morfométrico en el sedimento Chilolo sin ningún riego con el lixiviado ácido. En color rojo se muestran todos los precipitados rojizos que pueden corresponder a hierro, en color verde los poros y en color azul otros minerales presentes en la muestra.**





**Figura 112.** Microfotografías del análisis morfométrico en el sedimento Chilolo después de los riegos con el lixiviado ácido. En color rojo se muestran todos los precipitados rojizos que pueden corresponder a hierro, en color verde los poros y en color azul otros minerales presentes en la muestra.

No se observa un cambio notorio en los promedios de la porosidad antes de los riegos (24.18%) y después de los mismos (26.66%). Esto puede deberse a que en realidad existió poca interacción entre la solución ácida y el sedimento (producto de fugas) por lo que no ocurrieron cambios notorios en la porosidad del sedimento. Lo mismo se observa en los precipitados rojizos, incluso, a diferencia de las columnas anteriores, el porcentaje de los mismos disminuye después de los riegos, esto se debe a que el sedimento presenta coloraciones rojas antes del riego, no obstante, es notorio que los precipitados rojizos encontrados después del riego se encuentran en los bordes de los cristales (lo cual no se aprecia en la sección analizada sin riegos), lo que puede asociarse a procesos químicos entre los sólidos del sedimento y el lixiviado ácido que logró penetrar a través de él.

#### **4. Columna Bacanuchi.**

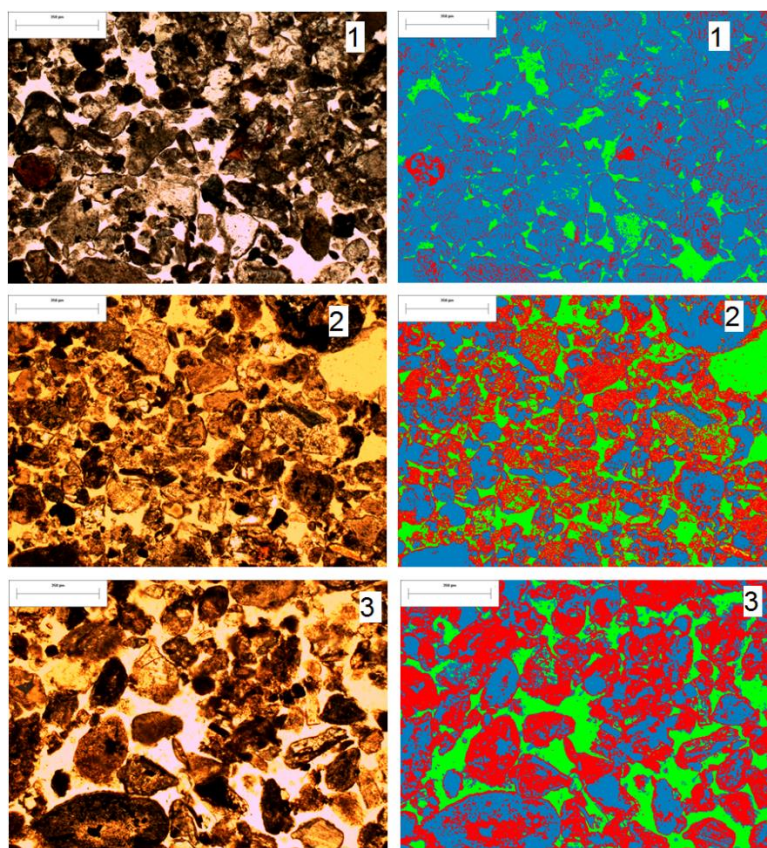
En la tabla 72 puede observarse la comparación de los resultados obtenidos en las

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

muestras antes y después de los riegos. Por su parte, las figuras 113 y 114 muestran respectivamente el análisis morfométrico en el suelo Bacanuchi antes y después de los experimentos con el lixiviado ácido.

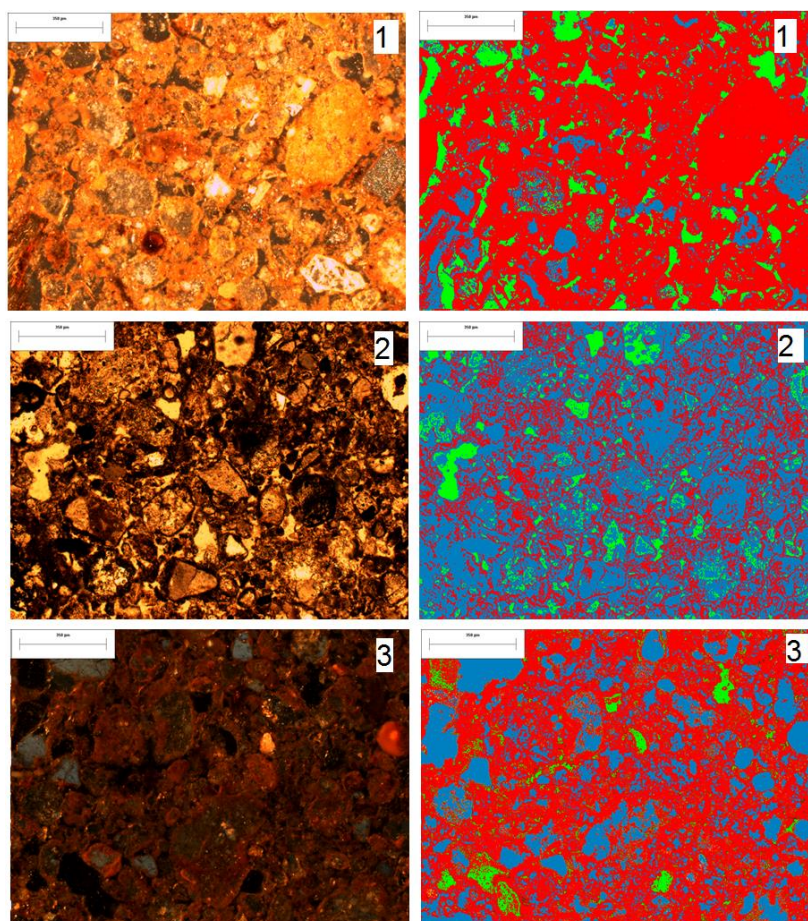
**Tabla 72. Análisis morfométrico en el suelo Bacanuchi.**

Muestra	# de repetición	Precipitados rojizos	Otros minerales	Poros	Total
		%			
Bacanuchi sin riego	1	9.63	81.77	8.60	100
	2	33.76	52.21	14.03	100
	3	43.70	34.18	22.12	100
	<b>PROMEDIO</b>	<b>29.03</b>	<b>56.05</b>	<b>14.92</b>	<b>100</b>
Bacanuchi con riego	1	80.40	9.50	10.09	100
	2	30.70	63.24	6.06	100
	3	55.97	31.02	12.99	100
	<b>PROMEDIO</b>	<b>55.69</b>	<b>34.59</b>	<b>9.71</b>	<b>100</b>



**Figura 113. Microfotografías del análisis morfométrico en el suelo Bacanuchi sin ningún riego con el lixiviado ácido. En color rojo se muestran todos los precipitados rojizos que pueden corresponder a hierro, en color verde los poros y en color azul otros minerales presentes en la muestra.**

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES



**Figura 114. Microfotografías del análisis morfométrico en el suelo Bacanuchi después de los riegos con el lixiviado ácido. En color rojo se muestran todos los precipitados rojizos que pueden corresponder a hierro, en color verde los poros y en color azul otros minerales presentes en la muestra.**

Los resultados de la tabla 72 muestran un aumento en el porcentaje de precipitaciones rojizas en la sección analizada después de los riegos en comparación con la sección en donde no se realizó ningún riego. Esto puede deberse a la formación de minerales de hierro (ferrihidrita, jarosita y schwertmanita) que precipitaron como resultado de la interacción entre el lixiviado ácido y el suelo.

De igual forma, se observa que el análisis morfométrico en el suelo Bacanuchi demuestra una tendencia a la disminución de la porosidad del suelo Bacanuchi después del paso de la solución ácida ferrocuprífera. Esta disminución en la porosidad puede deberse a la formación de minerales de hierro y minerales como yeso (identificados por medio de DRX), los cuales pueden estar ocupando los espacios vacíos del suelo. Como se había mencionado con anterioridad, el poder erosivo de la solución ácida ferrocuprífera tras su paso por este suelo es mínimo (debido a la capacidad neutralizadora de este suelo) por lo que es probable que no exista erosión de las partículas y por ende no exista un aumento visible en la porosidad.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los análisis micromorfológicos realizados en secciones delgadas demuestran la existencia de nuevos minerales después del paso de la solución ácida ferrocuprífera, siendo notorio la formación de yeso y la presencia de precipitados rojizos que pueden tratarse de minerales de hierro previamente identificados por medio de DRX. La formación de yeso está relacionada a la retención de los sulfatos presentes en la solución ácida, los cuales al interactuar con el calcio presente en minerales como las plagioclasas o calcita (en el caso del suelo Bacanuchi) facilitan su formación. De igual forma, la precipitación química de minerales de hierro puede estar relacionada a la retención de EPT en cada una de las columnas, ya que estos permiten su retención por medio de procesos de sorción.

De igual forma, los análisis morfométricos demuestran el aumento en el porcentaje de precipitados rojizos (presumiblemente precipitados de hierro) después de los riegos con la solución ácida. Por su parte, estos análisis permiten determinar cambios de porosidad en los suelos Tinajas y Bacanuchi, en donde en ambos casos ocurrió una aparente disminución de la misma. En el caso del sedimento El Álamo se observó un aumento en la porosidad debido probablemente al poder erosivo del lixiviado ácido. Finalmente, en el caso del sedimento Chilolo no se ve un cambio evidente en la porosidad entre las muestras analizadas antes y después de los experimentos.

En la siguiente sección se presenta el análisis químico de las secciones delgadas, con la intención de determinar la composición de los precipitados rojizos observados en los análisis micromorfológico y morfométrico, y la posible retención de los EPT en las diferentes fases sólidas determinadas con anterioridad.

### 5.3.10 Análisis químicos en secciones delgadas.

#### A) Microscopía Electrónica de Barrido (MEB-EDS).

Con el propósito de analizar químicamente las diferentes secciones delgadas correspondientes a diferentes profundidades de las columnas de suelos y sedimentos después del paso de la solución ácida, se llevó a cabo un análisis por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS). La intención es determinar la presencia de los diferentes EPT para confirmar su retención en cada una de las muestras analizadas, además de conocer la composición química de los precipitados rojizos observados en el análisis anterior, los cuales presumiblemente se tratan de minerales de hierro que fueron determinados por DRX en la superficie de las columnas. Los resultados se presentan en las siguientes páginas.

#### 1. Columna de suelo Tinajas.

Los resultados y discusiones para todas las profundidades se muestran en esta sección, al igual que las microfotografías y espectros de emisión de las profundidades 0-4 y 4-8 cm, por su parte, por cuestiones de espacio, las microfotografías y espectros de emisión para las profundidades 8-12, 12-16 y 16-20 cm se muestran en el **ANEXO 9**.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

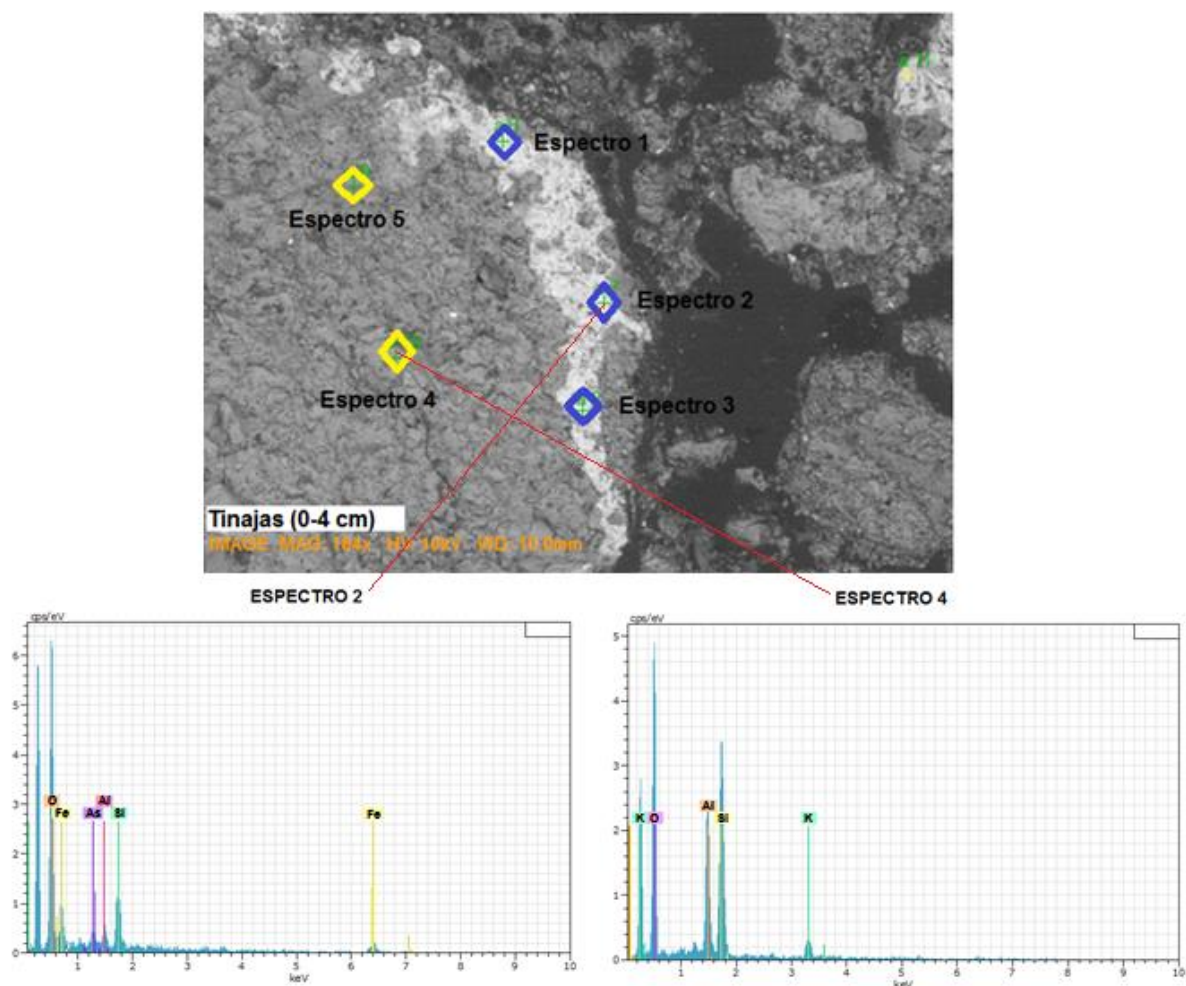


Figura 115. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 0-4 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 73. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 0-4 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)							Total
		Si	O	Fe	Al	As	K	Ca	
Tinajas (0-4cm)	Espectro 1	13.25	33.34	48.54	4.87	ND	ND	ND	100
	Espectro 2	11.54	30.31	54.54	3.07	0.54	ND	ND	100
	Espectro 3	13.16	32.77	50.29	3.78	ND	ND	ND	100
	Espectro 4	30.62	48.98	ND	14.48	ND	5.92	ND	100
	Espectro 5	26.07	41.16	ND	11.22	ND	ND	21.55	100

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

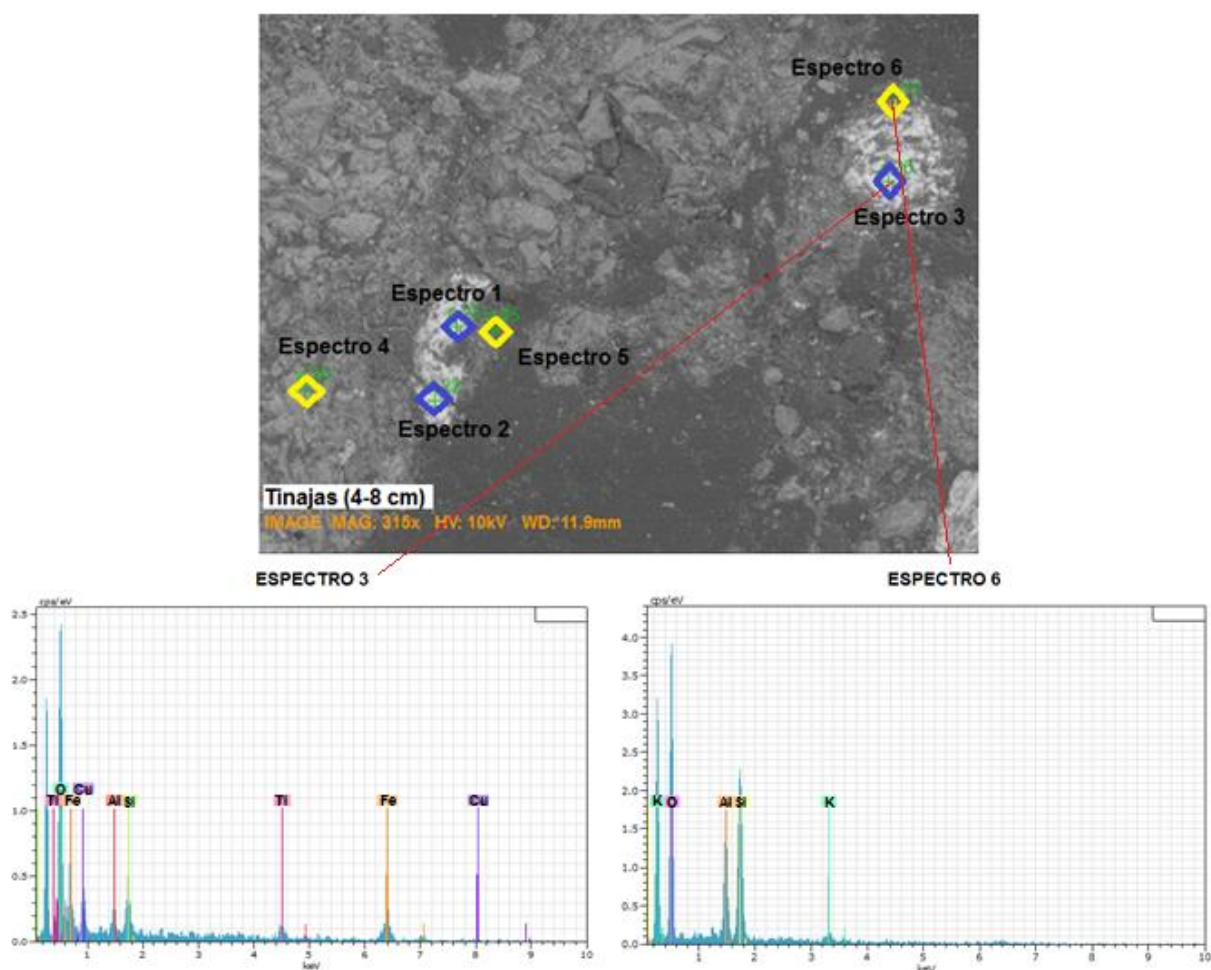


Figura 116. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 4-8 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 74. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 4-8 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)								Total
		Si	O	Fe	Al	As	Cu	K	Ti	
Tinajas (4-8cm)	Espectro 1	10.57	31.16	54.26	4.01	ND	ND	ND	ND	100
	Espectro 2	9.97	30.59	54.49	4.54	0.41	ND	ND	ND	100
	Espectro 3	9	29.27	56.37	3.27	ND	0.94	ND	1.15	100
	Espectro 4	31.89	48.14	ND	11.4	ND	ND	8.57	ND	100
	Espectro 5	33.17	49.64	ND	12.1	ND	ND	5.09	ND	100
	Espectro 6	33.97	50.73	ND	13	ND	ND	2.3	ND	100

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados del análisis de MEB-EDS en las secciones del suelo Tinajas reflejan que los precipitados rojizos observados en la sección del análisis micromorfológico corresponden principalmente a precipitados de hierro, teniendo porcentajes en peso máximos de hierro de 54.54% en la profundidad de 0-4 cm y 56.37% en la sección de 4-8 cm (con un máximo de 93.25% entre 8-12 cm, 60.42% de 12-16 cm y 52.98% entre 16-20 cm, ver **ANEXO 9**). Dichos resultados confirman la presencia de minerales de hierro secundarios como producto de la interacción de este suelo con la solución ácida ferrocuprífera.

Dentro de los resultados se observa la presencia de diferentes EPT en las partículas analizadas en los precipitados (rombos azules), observándose en cada profundidad los siguientes aspectos:

0-4 cm: Se detectaron Fe, Al y As, con porcentajes en peso máximos de 54.54%, 4.87% y 0.54%, respectivamente. No se detectó la presencia de ningún otro EPT.

4-8 cm: Fueron identificados Fe (con un máximo de 56.37% en peso), Al (4.54%), As (0.41%) y a diferencia de la profundidad de 0-4 cm, fue identificado Cu con un máximo de 0.95% en peso.

En el **ANEXO 9** se puede observar la presencia de Fe, Al, As y Cu en las profundidades de 8-12, 12-16 y 16-20 cm, destacando la presencia de Cr en la profundidad de 8-12 cm con un porcentaje máximo de 0.46%. A pesar de no tratarse de un elemento estudiado en este trabajo, se identificó la presencia del metal Titanio (Ti) en las profundidades de 4-8 y 16-20 cm.

En lo que respecta a los puntos analizados fuera de los precipitados rojizos (rombos amarillos), que corresponden a los cristales donde se encuentran los precipitados rojizos, en todas las profundidades se identificaron los siguientes elementos: Si, O, Al (en todas las profundidades), K (en todas las profundidades con excepción de 12 a 16 cm), Na (8-12 cm y 16-20 cm) y finalmente Ca (0-4 cm). Estos resultados indican que los precipitados de hierro (en los cuales se observó la presencia de Al, As, Cu y Cr), precipitaron en cristales con la composición química de plagioclasas y filosilicatos (los cuales fueron identificados por medio de DRX en la superficie de la columna). Tomando en cuenta los análisis micromorfológicos y los resultados de MEB-EDS, es posible afirmar que la retención de los diferentes EPT en el suelo Tinajas se debe a la precipitación de minerales de Fe, los cuales precipitan principalmente en filosilicatos y plagioclasas. La formación de minerales de Fe, permite la retención de EPT, siendo identificados Al, As, Cu y Cr. El resto de los EPT: Cd, Mn, Pb y Zn no fueron identificados por medio de este análisis, por lo que es factible que se encuentren en concentraciones menores al límite de detección de esta técnica utilizada.

### 2. Columna de sedimento El Álamo.

Los resultados y discusiones para todas las profundidades se muestran en esta sección, al igual que las microfotografías y espectros de emisión de las profundidades 0-4 y 4-8 cm, por su parte, por cuestiones de espacio, las microfotografías y espectros de emisión para las profundidades 8-12, 12-16 y 16-20 cm se muestran en el **ANEXO 9**.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

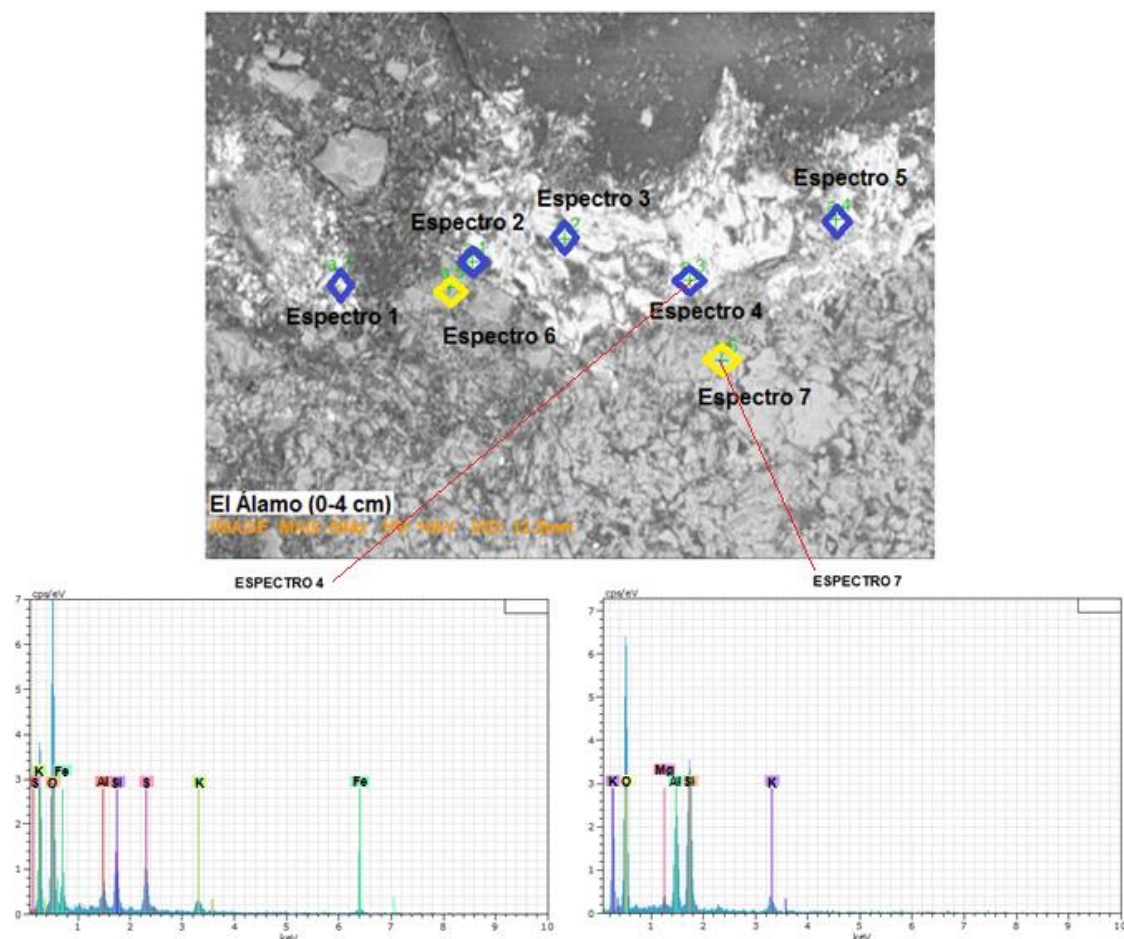


Figura 117. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 0-4 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 75. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 0-4 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)								Total
		Si	O	Fe	Al	S	Ca	K	Mg	
El Álamo (0-4 cm)	Espectro 1	15.35	42.99	9.25	14.99	9.23	5.46	2.73	ND	100
	Espectro 2	14.27	42.14	14.25	11.41	7.69	5.49	4.75	ND	100
	Espectro 3	11.22	41.17	22.41	5.01	10.4	4.24	5.54	ND	100
	Espectro 4	10.59	40.49	25.51	5.25	10	1.42	6.72	ND	100
	Espectro 5	9.24	40.6	27.25	4.41	7.79	2.74	7.97	ND	100
	Espectro 6	43.44	52.34	ND	2.95	ND	ND	1.27	ND	100
	Espectro 7	29.78	48.43	ND	13.82	ND	ND	6.71	1.26	100



CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

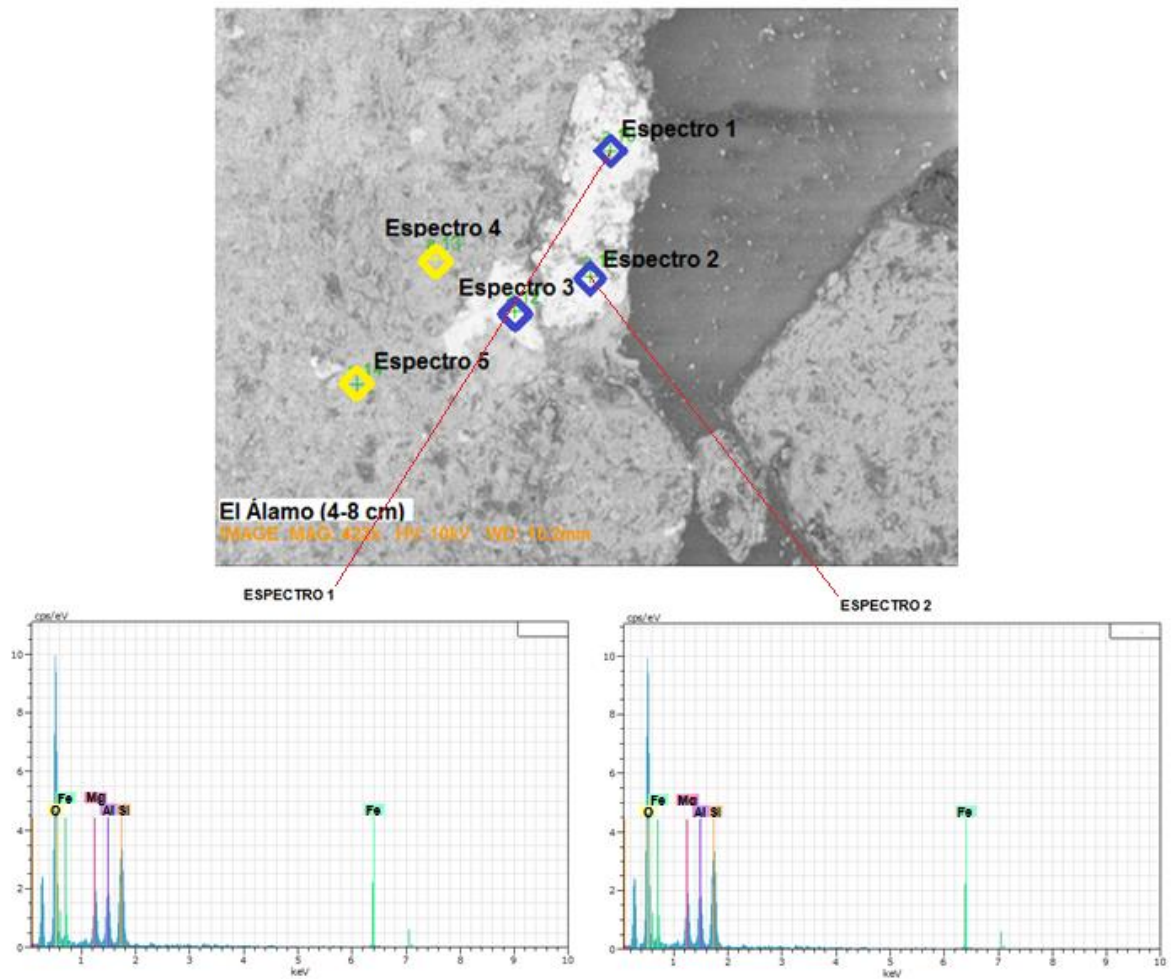


Figura 118. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 4-8 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 76. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 4-8 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)						Total
		Si	O	Fe	Al	K	Mg	
El Álamo (4-8 cm)	Espectro 1	10.99	30.41	55.71	1.79	ND	1.1	100
	Espectro 2	11.05	30.97	55.14	2.05	ND	0.79	100
	Espectro 3	10.94	31.25	54.49	2.41	ND	0.91	100
	Espectro 4	22.71	44.26	14.75	9.1	1.24	7.94	100
	Espectro 5	22.94	44.57	12.94	9.14	2.49	7.92	100

Para el caso de los precipitados rojizos encontrados en la columna de sedimento El Álamo después de los experimentos con la solución ácida ferrocuprífera, los resultados demuestran que químicamente se trata de precipitados principalmente de hierro, ya que el análisis químico en estos precipitados mediante MEB-EDS confirman que a las profundidades de 0-4 cm el máximo porcentaje en peso de Fe es de 27.25%, de 55.71% en la profundidad de 4-8 cm y de 20.57%, 60.82% y 60.34% en las profundidades de entre 8 y 20 cm (ver **ANEXO 9**).

De los EPT analizados en este trabajo, únicamente se detectó mediante MED-EDS la presencia de Al, en porcentajes máximos de 14.99, 2.41, 2.58, 3.9 y 2.46 % en las profundidades de 0-4, 4-8, 8-12, 12-16 y 16-20 cm, respectivamente. No se determinó la presencia de As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb y Zn en ninguna profundidad, lo cual puede deberse a que sus concentraciones son tan bajas que no fueron detectadas por la técnica instrumental utilizada, o bien, el total de puntos analizados no fue el necesario para su identificación.

En lo que respecta al análisis de los puntos correspondientes a los cristales en donde se observan los precipitados rojizos, en todas las profundidades se determinó la presencia de Si, O, Al y K, de igual forma se detectó Mg en las profundidades de 0-4 y 4-8 cm, Fe en la profundidad de 4-8 cm y Na a los 16-20 cm. Estos resultados corresponden a la composición química de plagioclasas y filosilicatos determinados por medio de DRX, por lo cual es posible inferir que los precipitados de hierro (minerales de hierro secundarios) precipitaron en cristales de minerales de plagioclasa y filosilicatos (minerales de arcilla).

Al igual que los minerales de hierro identificados en la sección 5.3.6, se observó la presencia del mineral secundario yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), el cual está relacionada a la composición química determinada en la profundidad de 0-4 cm, en donde se tiene un porcentaje en peso máximo de S y Ca de 10.41% y 5.49%, respectivamente.

### **3. Columna de sedimento Chilolo**

Los resultados y discusiones para todas las profundidades se muestran en esta sección, al igual que las microfotografías y espectros de emisión de las profundidades 0-4 y 4-8 cm, por su parte, por cuestiones de espacio, las microfotografías y espectros de emisión para las profundidades 8-12, 12-16 y 16-20 cm se muestran en el **ANEXO 9**.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

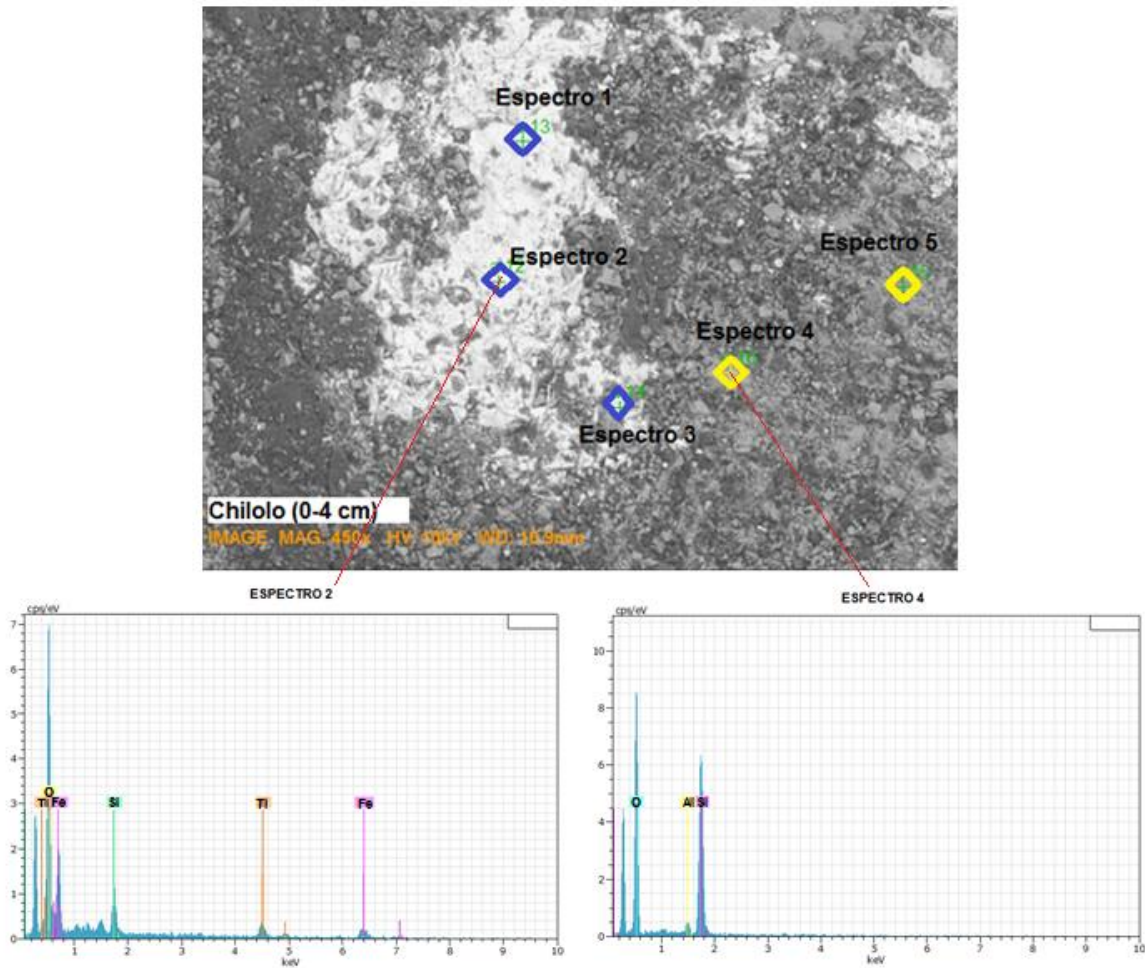


Figura 119. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 0-4 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 77. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 0-4 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)						Total
		Si	O	Fe	Al	Ti	Na	
Chilolo (0-4 cm)	Espectro 1	7.78	28.2	62.37	1.65	ND	ND	100
	Espectro 2	7.7	31.59	46.02	0.5	14.2	ND	100
	Espectro 3	10.65	29.92	58.16	1.27	ND	ND	100
	Espectro 4	45.17	53.04	ND	1.79	ND	ND	100
	Espectro 5	46.27	50.99	ND	2.01	ND	0.73	100

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

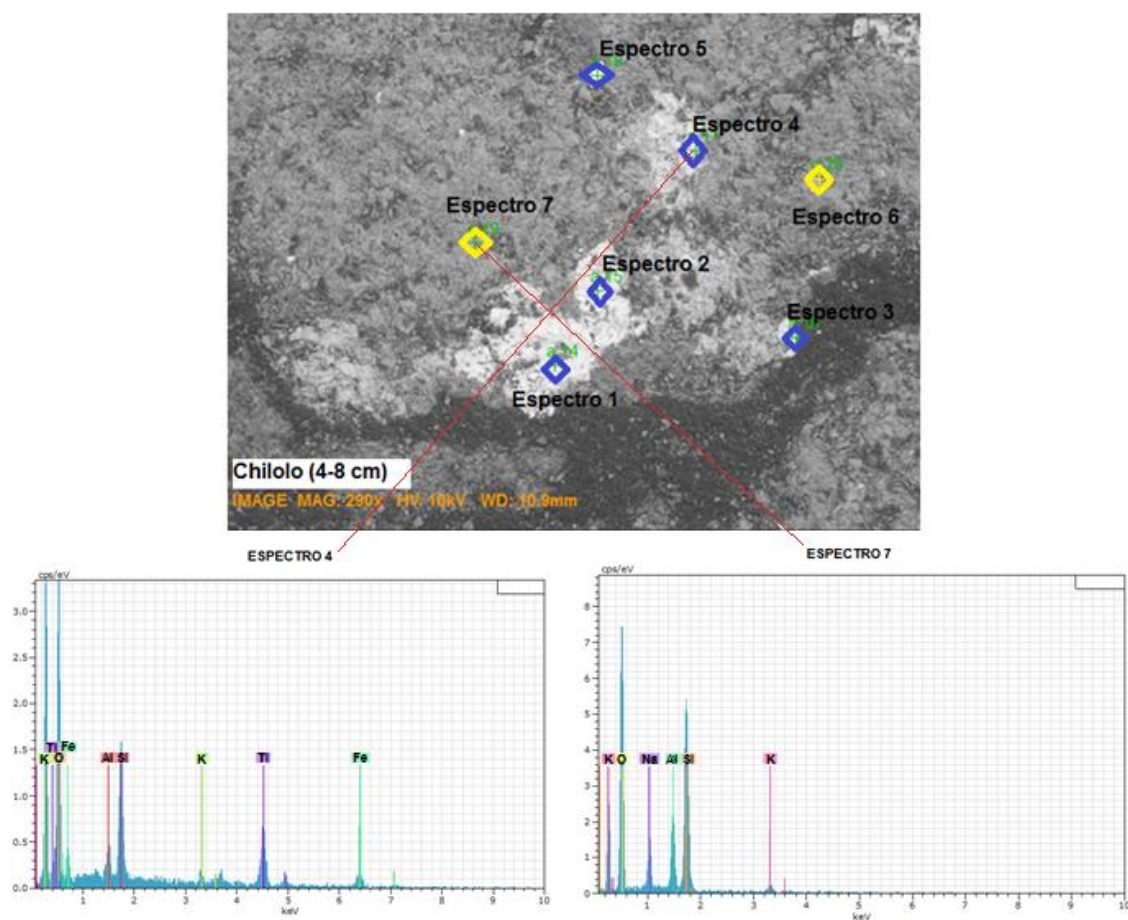


Figura 120. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 4-8 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 78. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 4-8 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)							Total
		Si	O	Fe	Al	Ti	Na	K	
Chilolo (4-8 cm)	Espectro 1	9.18	29.22	59.76	1.84	ND	ND	ND	100
	Espectro 2	8.77	28.94	60.46	1.83	ND	ND	ND	100
	Espectro 3	14.49	33.01	50.07	2.43	ND	ND	ND	100
	Espectro 4	10.86	36.9	25.95	1.75	22.7	ND	1.87	100
	Espectro 5	40.27	49.54	10.19	ND	ND	ND	ND	100
	Espectro 6	34.73	48.22	ND	7.53	ND	ND	9.52	100
	Espectro 7	33.75	48.87	ND	8.78	ND	5.95	2.65	100

Al igual que en las anteriores columnas, los precipitados observados en la sección 5.3.10 tienen en su composición química al hierro como elemento principal, con un porcentaje en peso máximo de 62.37% (0-4 cm), 60.46% (4-8 cm), 54.79% (8-12 cm), 52.01% (12-16 cm) y 61.29% (16-20 cm). Esta composición está relacionada a la formación de minerales secundarios de hierro, principalmente ferrihidrita, debidamente identificada en esta columna.

De la misma forma que en la columna de sedimento El Álamo, no se determinó la presencia de los EPT analizados en este trabajo (As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb y Zn), con la excepción de Al (en una concentración máxima de 2.97% a la profundidad de 8-12 cm). Esto puede deberse a que sus concentraciones se encuentran por debajo del límite de detección, o bien, el total de puntos analizados no fue el necesario para su identificación

En el caso de los puntos analizados que forman parte de los cristales en donde se encuentran los precipitados de Fe, los resultados confirman la identificación de elementos como Si, O, Al y Na en todas las profundidades, de igual forma se determinó K (4-8, 8-12 y 16-20 cm), Mg (8-12 y 12-16 cm) y Ca (en la profundidad de 12-16 cm). Esto confirma que los precipitados de Fe se forman en partículas que corresponden a minerales de plagioclasas y filosilicatos (cuya composición química es de Si, O, Al, K, Mg, Na y Ca), los cuales fueron determinados en el análisis de DRX en la superficie de la columna.

#### **4. Columna de suelo Bacanuchi**

Los resultados y discusiones para todas las profundidades se muestran en esta sección, al igual que las microfotografías y espectros de emisión de las profundidades 0-4 y 4-8 cm, por su parte, por cuestiones de espacio, las microfotografías y espectros de emisión para las profundidades 8-12, 12-16 y 16-20 cm se muestran en el **ANEXO 9**.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

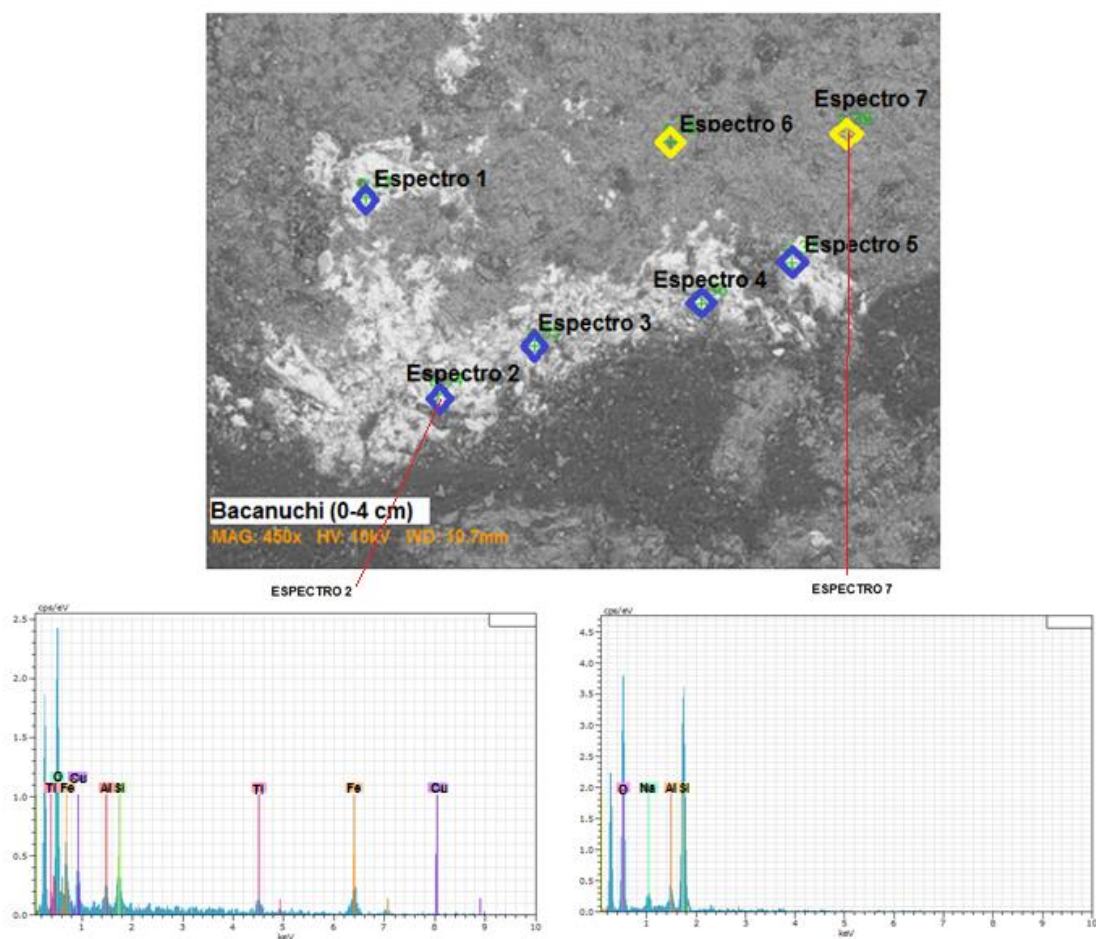


Figura 121. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 0-4 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 79. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 0-4 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)							Total
		Si	O	Fe	Al	Cu	Ti	Na	
Bacanuchi (0-4 cm)	Espectro 1	9.91	27.74	57.5	2.27	0.53	2.05	ND	100
	Espectro 2	8.9	28.75	59.27	1.15	0.49	1.44	ND	100
	Espectro 3	9.19	27.21	60.02	1.94	0.39	1.25	ND	100
	Espectro 4	10.26	29.02	57.28	1.97	0.35	1.12	ND	100
	Espectro 5	11.5	29.27	54.74	1.79	0.41	2.29	ND	100
	Espectro 6	37.67	51.59	ND	9.07	ND	ND	1.67	100
	Espectro 7	42.42	52.05	ND	3.32	ND	ND	2.21	100

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

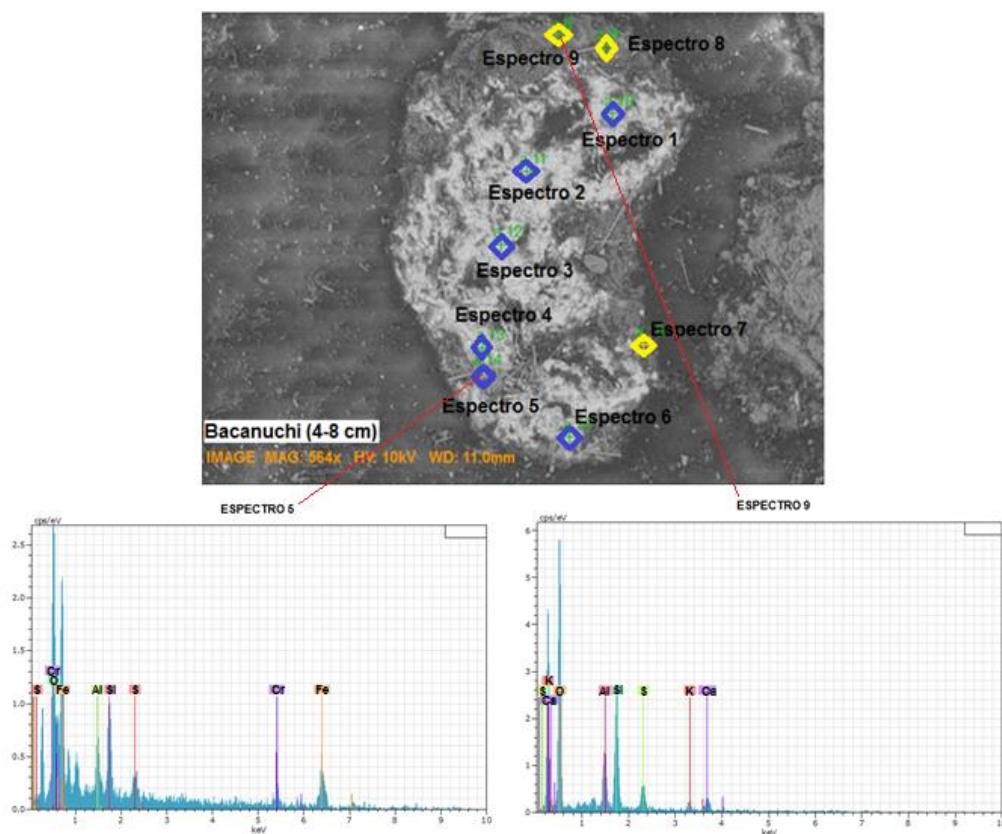


Figura 122. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 4-8 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 80. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 4-8 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)									Total
		Si	O	Fe	Al	Cr	K	Cu	S	Ca	
Bacanuchi (4-8 cm)	Espectro 1	11.85	31.71	51.29	3.57	0.42	1.16	ND	ND	ND	100
	Espectro 2	11.45	31.79	51.59	3.79	0.41	0.97	ND	ND	ND	100
	Espectro 3	9.23	29.74	56.52	2.74	0.37	1.4	ND	ND	ND	100
	Espectro 4	11.04	31.07	54.51	2.94	ND	ND	0.44	ND	ND	100
	Espectro 5	9.7	29.54	55.17	2.54	0.35	0.9	ND	1.39	0.41	100
	Espectro 6	10.4	30.56	56.06	1.96	0.41	0.61	ND	ND	ND	100
	Espectro 7	27.62	49.67	ND	7.09	ND	3.45	ND	5.25	6.92	100
	Espectro 8	22.17	50.62	ND	7.75	ND	2.95	ND	5.94	10.6	100
	Espectro 9	23.95	48.66	ND	8.89	ND	3.2	ND	6.1	9.2	100

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En lo que respecta al suelo Bacanuchi, se observa que los precipitados rojizos identificados en el análisis micromorfológico, al igual que en las columnas anteriores, están compuestos principalmente de Fe, con porcentajes en peso máximos de 60.02% (0-4 cm), 56.52% (4-8 cm), 63.9% (8-12 cm), 57.04% (12-16 cm) y 51.1% (16-20 cm). Dichos precipitados de Fe, corresponden a minerales secundarios identificados en DRX, entre ellos ferrihidrita, schwertmanita y jarosita (los cuales son los únicos minerales en cuya composición se presenta el Fe). Al igual que en el suelo Tinajas y a diferencia de las secciones analizadas en los sedimentos El Álamo y Chilolo, en las secciones delgadas analizadas del suelo Bacanuchi se determinó la presencia de EPT como Cu, Cr y As. Los resultados por cada profundidad se muestran a continuación:

0-4 cm: Se detectaron Fe, Al y Cu, con porcentajes en peso máximos de 60.02%, 2.27% y 0.53%, respectivamente.

4-8 cm: Fueron identificados Fe (con un máximo de 56.52% en peso), Al (3.79%), Cr (0.42%) y Cu (0.44%).

En el **ANEXO 9** se puede observar la presencia de Fe y Al en las profundidades de 8-12, 12-16 y 16-20 cm, destacando la presencia de Cu en la profundidad de 8-12 cm con un porcentaje máximo de 0.41% y As en las profundidades de 8-12 y 12-16 cm, con porcentajes máximos de 0.36% y 0.41%, respectivamente. En lo que respecta a Cd, Mn, Pb y Zn, no se determinó su presencia en ningún punto analizado, lo que puede sugerir que estos elementos se encuentran probablemente en concentraciones por debajo del límite de detección instrumental.

Los resultados en las diferentes secciones delgadas analizadas en las 4 columnas a diferentes profundidades demuestran la presencia de precipitados de hierro, los cuales se encuentran en cristales con la composición química de plagioclasas y filosilicatos. Dichos precipitados pueden corresponder a minerales secundarios identificados por medio de DRX, entre ellos ferrihidrita, schwertmanita y jarosita, los cuales son de importancia en la retención de EPT. Tomando en cuenta precisamente la retención de EPT, se determinó en los suelos Tinajas y Bacanuchi la presencia en algunas profundidades de As, Cr y Cu, al igual que Al en todas las secciones analizadas, dichos EPT se encuentran presentes en los precipitados de Fe, lo cual podría relacionarse a la sorción de estos elementos en los precipitados secundarios de Fe. En lo que respecta a los sedimentos El Álamo y Chilolo no se identificó ningún EPT, con excepción de Fe y Al. Esto puede relacionarse a la mayor retención de EPT en los suelos Tinajas y Bacanuchi, siendo muy bajas las concentraciones en los sedimentos, por lo que es probable que no hayan sido identificados por el límite de detección del equipo.

Debido a que no en todas las secciones delgadas analizadas se identificó la presencia de EPT, se utilizó la técnica de microsonda electrónica de barrido para determinar la presencia y posible retención de EPT después del paso de la solución ácida. Cabe destacar, que a diferencia del análisis de MEB-EDS, el uso de la microsonda fue más dirigido a ciertas secciones delgadas y se llevó a cabo únicamente para analizar puntos dentro de los precipitados de Fe con la intención de definir la presencia de EPT en dichos precipitados. Además, los puntos analizados en 8 secciones delgadas, corresponden a diferentes puntos en relación a los analizados por la técnica de MEB-EDS.



**B) Microsonda Electrónica de Barrido.**

Esta técnica se utilizó en 8 secciones delgadas (2 para cada columna) con la intención de analizar diferentes puntos de los precipitados de hierro y determinar la posible retención de EPT, los cuales fueron identificados únicamente en los suelos Tinajas y Bacanuchi con el uso de la técnica MEB-EDS. Los resultados se presentan en las figuras 123-130.

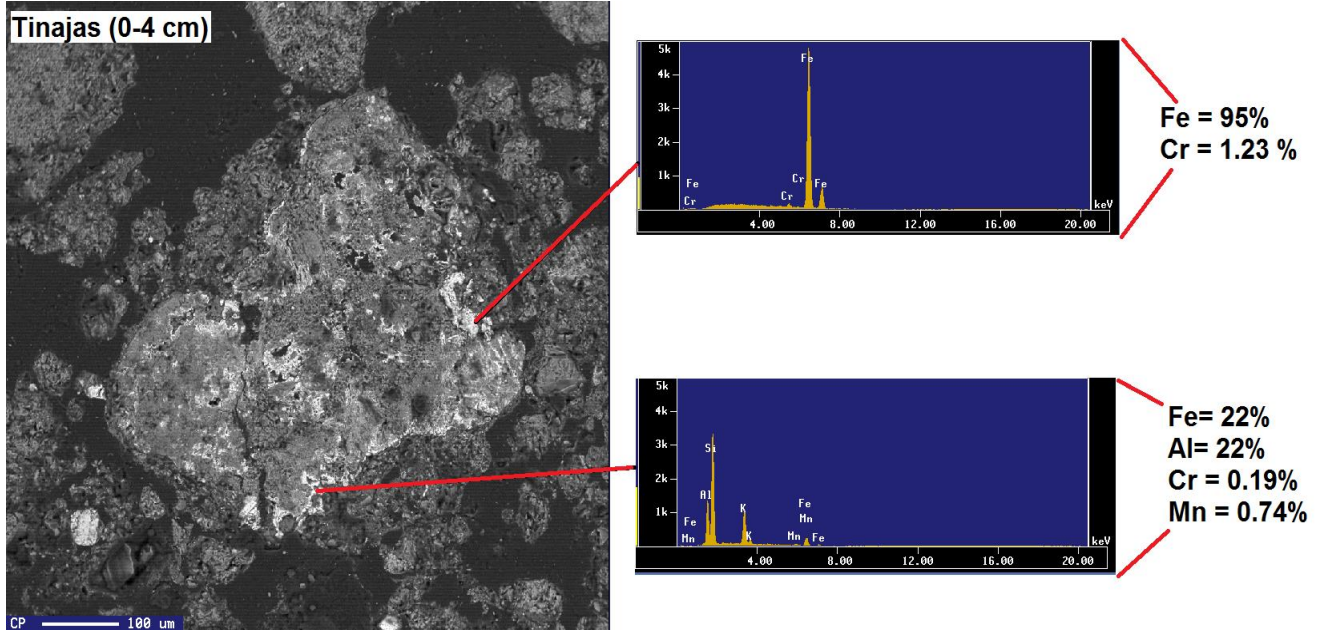


Figura 123. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.

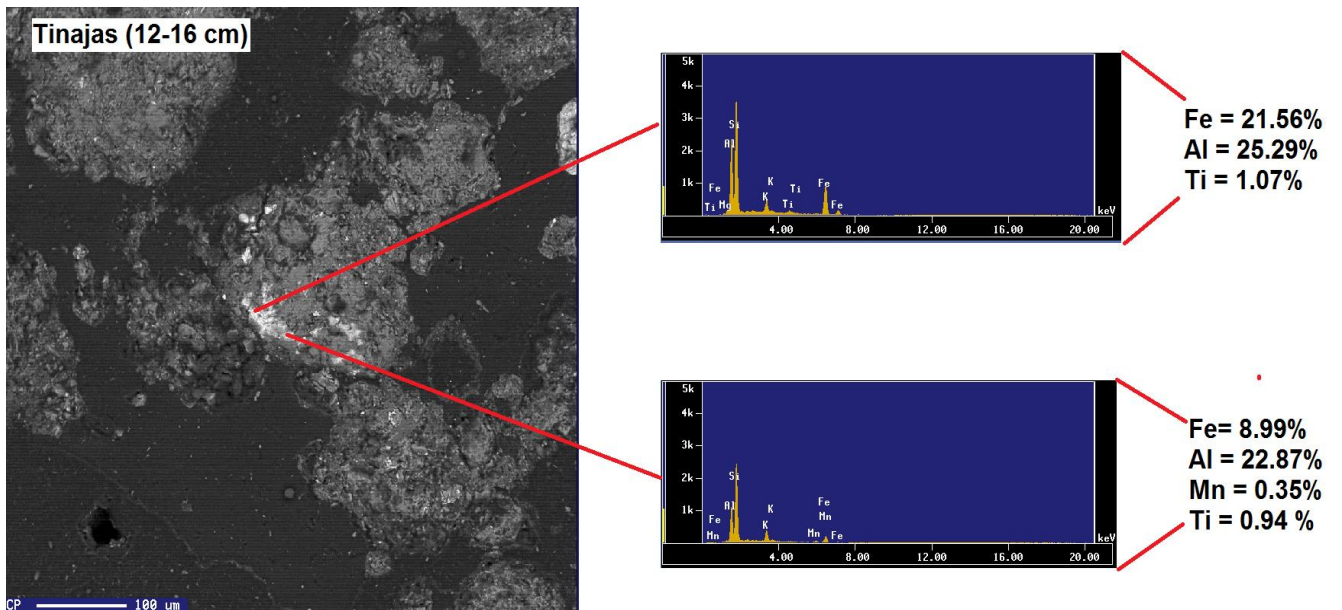


Figura 124. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.

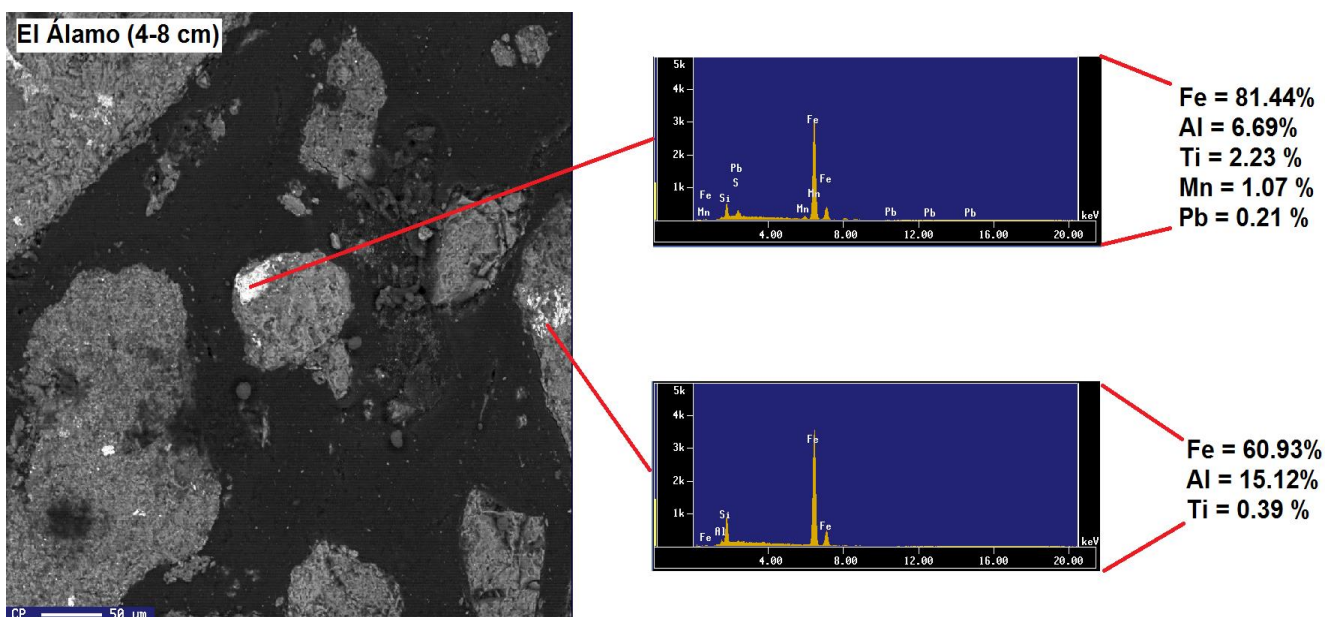


Figura 125. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.

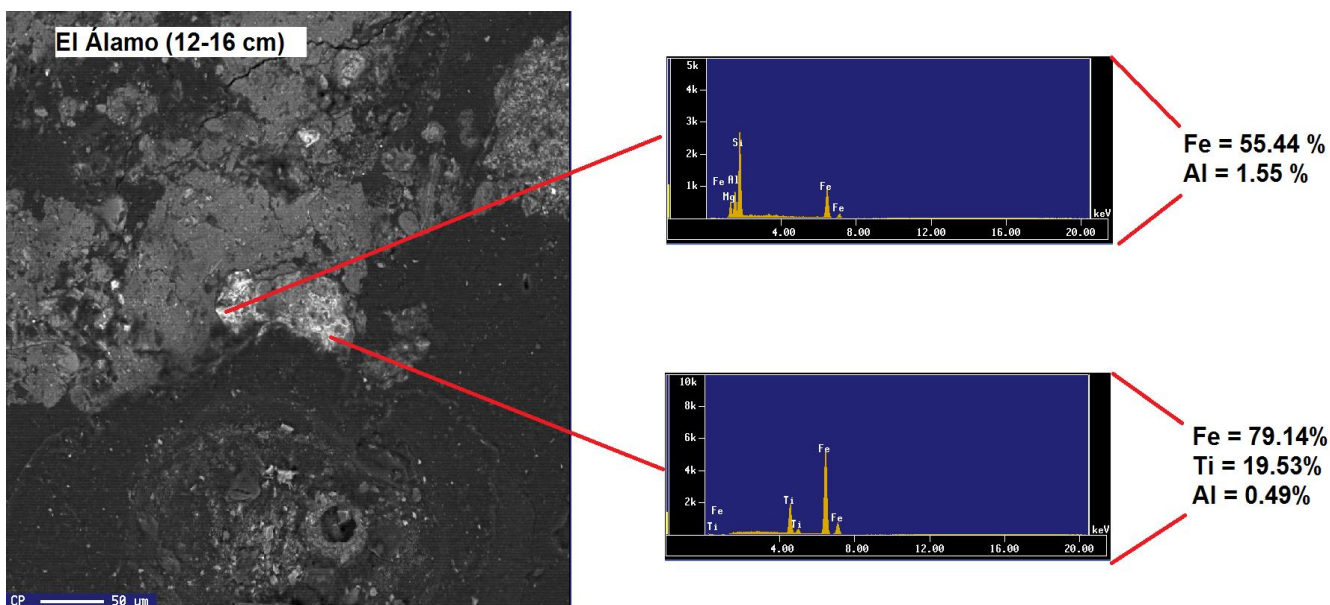


Figura 126. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

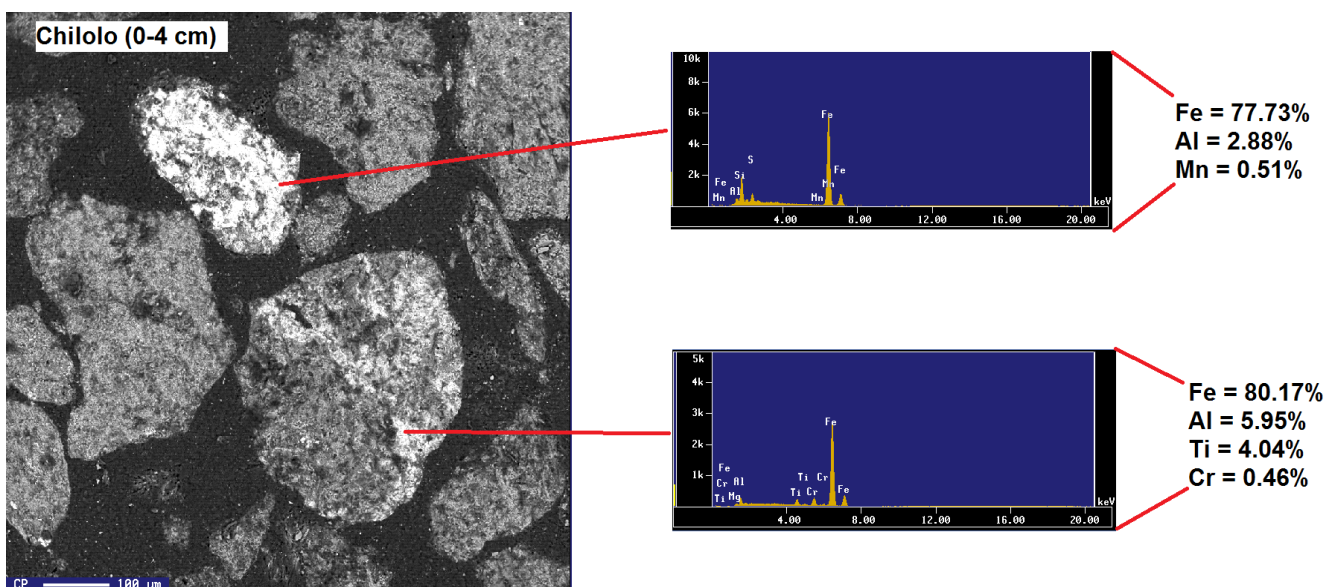


Figura 127. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 0-4 cm.

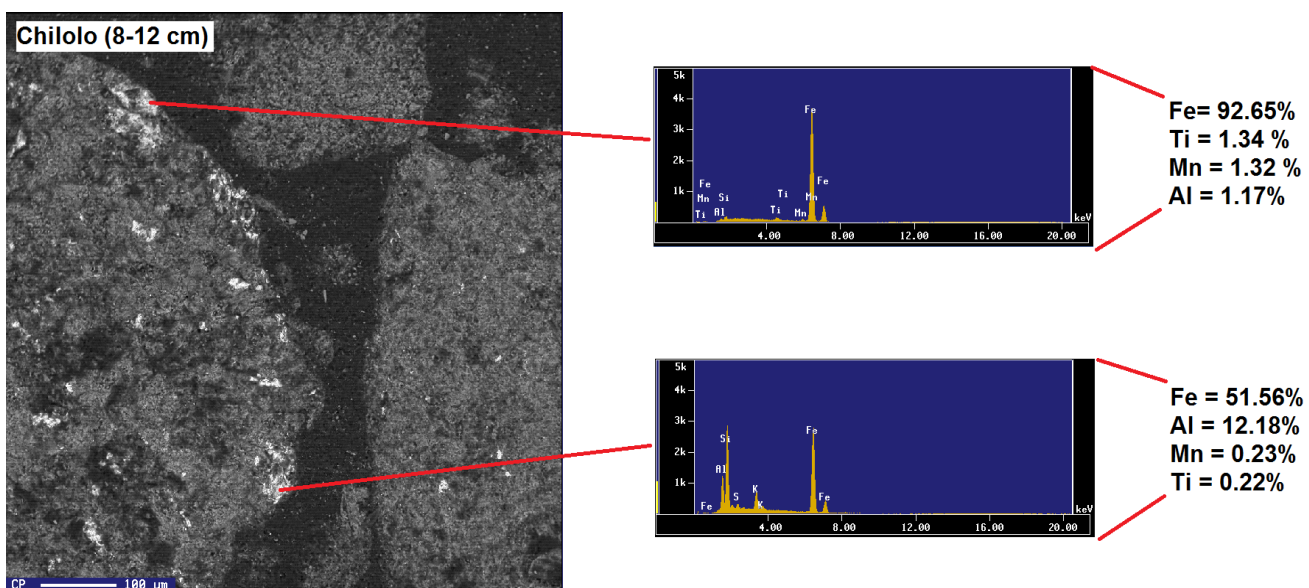


Figura 128. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 8-12 cm.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

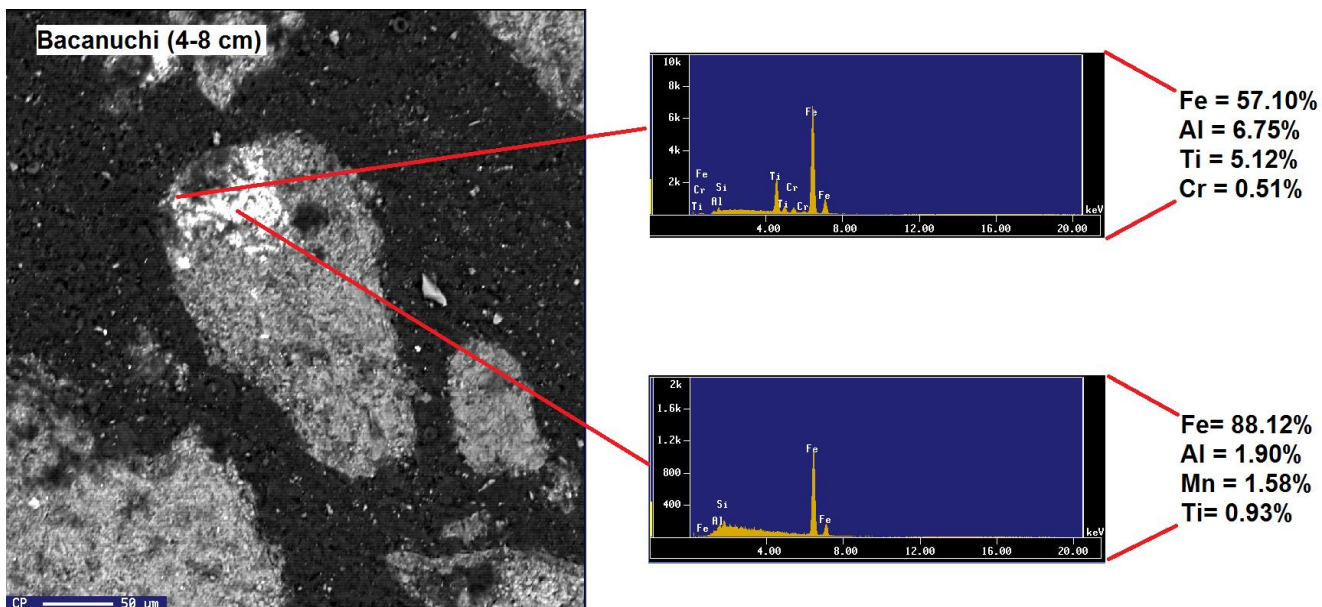


Figura 129. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 4-8 cm.

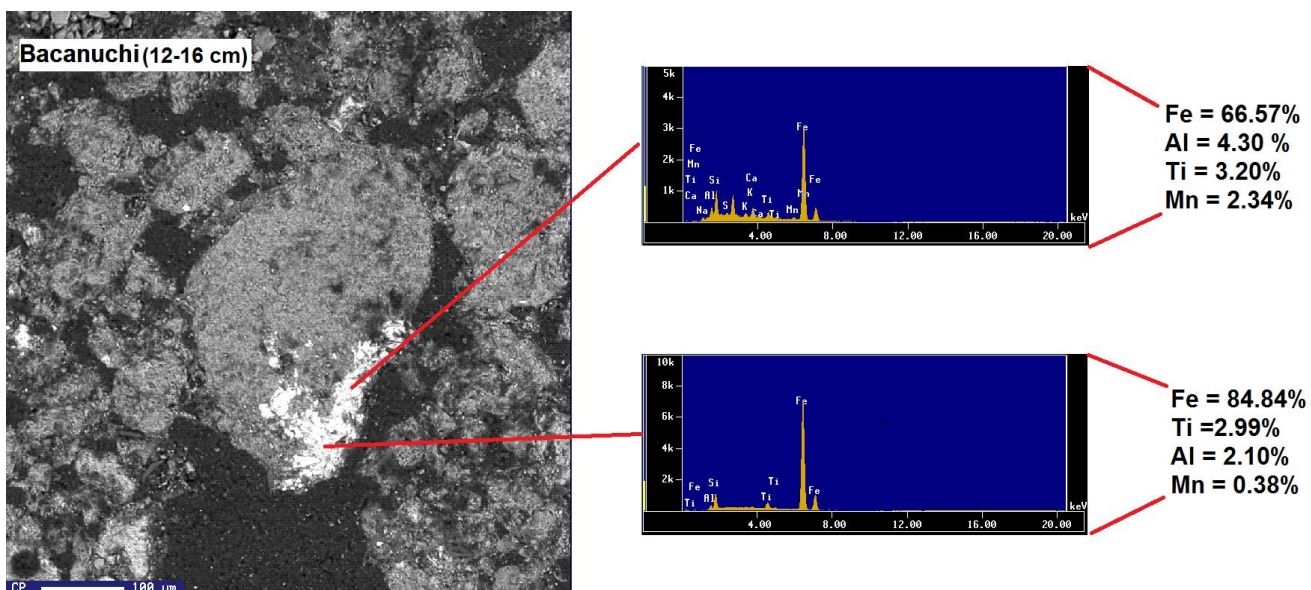


Figura 130. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 12-16 cm.

Los resultados presentados en las figuras 123-130 se resumen a continuación:

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la columna de suelo Tinajas, se analizaron dos secciones correspondientes a las profundidades de 0-4 y 12-16 cm. En el primer intervalo (0-4 cm) se identificaron los siguientes elementos: Fe (en un máximo de 95% en peso), Al (en un máximo de 22% en peso), Cr (en un máximo de 1.23% en peso) y a diferencia del análisis anterior, se determinó Mn, en un porcentaje en peso máximo de 0.74%. En lo que respecta a la profundidad de 12-16 cm, se determinó Fe (con un máximo de 21.56%), Al (en un máximo de 25.29%) y Mn (en un máximo de 0.35%). Aunque no es un metal de interés en este trabajo (debido a que su concentración en la solución ácida ferrocuprífera se determinó por debajo de los límites de detección instrumentales) se determinó la presencia de Ti, en una concentración máxima de 1.07%.

En la columna de sedimento El Álamo, se analizaron las profundidades de 4-8 cm y 12-16 cm, destacándose la presencia de los EPT Mn y Pb en el intervalo de 4-8 cm, en porcentajes en peso máximos de 1.07% y 0.21%, respectivamente. De igual forma, se observa al Fe como el elemento principal, con porcentajes máximos de 81.44% en la profundidad de 4-8 cm y 79.14% en el intervalo de 12-16 cm. Cabe destacar que los puntos analizados por medio de MEB-EDS en todas las profundidades analizadas (entre 0-20 cm) no se había detectado la presencia de ningún otro EPT diferente al Fe y Al. Por medio de microsonda electrónica de barrido se confirma la presencia de por lo menos Mn y Pb en las fases sólidas precipitadas después de la interacción de la solución ácida y este sedimento.

En lo que respecta a la columna de sedimento Chilolo, se analizaron las profundidades cuyo intervalo va de 0-4 y 8-12 cm. Los resultados en el intervalo de 0-4 cm, demuestran la presencia de Fe (en un máximo de 80.17%), Al (en un máximo de 5.95%), Mn (en un máximo de 0.51%) y Cr (en un máximo de 0.46%). De igual forma, en la profundidad de 8-12 cm, se identificó Fe (92.65% máximo), Al (máximo de 1.17%) y Mn (en un máximo de 1.32%). detectándose de igual forma Ti. Al igual que en el sedimento El Álamo, los estudios de MEB-EDS no permitieron identificar ningún otro EPT diferente al Fe y Al, sin embargo, por medio de microsonda electrónica de barrido fue posible determinar la presencia en las fases sólidas precipitadas de al menos Mn y Cr.

Finalmente, en el suelo Bacanuchi se analizaron las profundidades de 4-8 y 12-16 cm. Los resultados de este análisis reflejan la presencia de Fe en las dos profundidades, en porcentajes en peso máximos de 88.12% (0-4 cm) y 84.84% (12-16 cm) y Al (en un porcentaje máximo de 6.75 % entre 0-4 cm y 4.30% entre 12-16 cm). De igual forma, se detectó Mn (en un máximo de 1.58% entre 0-4 cm y 0.38% entre 12-16 cm) y Cr en la profundidad de 4-8 cm en un porcentaje de 0.51%.

El uso de la microsonda fue enfocado a analizar ciertas secciones delgadas y puntos diferentes a los analizados en la parte de MEB-EDS, debido a que no en todas las secciones delgadas se determinó la presencia de EPT, por lo mismo, fue de interés utilizar otra técnica. El uso de la microsonda electrónica de barrido, permitió confirmar que los precipitados formados en las secciones analizadas después del paso de la solución ácida ferrocuprífera corresponden a precipitados principalmente de Fe y Al. A diferencia del estudio de MEB-EDS, con el uso de microsonda se logró determinar la presencia de EPT no solamente en los suelos Tinajas y Bacanuchi, sino que también se determinó la presencia de EPT como Mn, Cr y Pb en las secciones de los sedimentos El Álamo y Chilolo.

**C) Mapeo elemental por medio de microsonda Electrónica de Barrido.**

Los resultados hasta ahora mostrados del análisis de MEB-EDS y microsonda electrónica de barrido confirman que los precipitados formados después de la interacción de la solución ácida ferrocuprífera y los diferentes suelos/sedimentos están constituidos principalmente de Fe. Dichos precipitados corresponden a minerales secundarios de Fe que fueron identificados en muestras sólidas en la superficie de las columnas por medio de DRX. No obstante, los resultados demuestran que estos precipitados se encuentran en todas las profundidades analizadas. De igual forma, se ha podido observar que estos precipitados de Fe son importantes debido a que en ellos se presentan diferentes EPT, entre ellos Al, As, Cr, Cu, Mn y Pb, debidamente identificados en diferentes secciones delgadas analizadas a diferentes profundidades. A pesar de ello, en ninguna sección se identificó Cd ni Zn, elementos de interés en este trabajo. Con el propósito de inferir la presencia de As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb y Zn en dos áreas de las secciones del sedimento El Álamo (4-8 cm) y del suelo Bacanuchi (12-16 cm) se realizaron mapeos elementales usando la técnica de microsonda electrónica de barrido. Este mapeo utiliza diferentes colores para inferir el porcentaje de cada elemento de interés en el área analizada, tal y como se observa en la tabla 81. Los resultados se muestran en las tablas 82 y 83.

**Tabla 81. Significado de los colores en relación al % de cada elemento en el mapeo elemental realizado con la técnica de microsonda electrónica de barrido.**

Tipo de colores	Color	% del elemento de interés en un punto determinado
<b>Negro</b>	Negro	0
<b>Fríos</b>	Azul	0 - 10
<b>Intermedios</b>	Verde	10 - 30
	Amarillo	30 - 50
<b>Cálidos</b>	Rojo	50 - 70
	Morado	70 - 90
<b>Blanco</b>	Blanco	90 - 100

**Tabla 82. Resultados del mapeo elemental en el área analizada del sedimento El Álamo (4-8 cm).**

Sección del sedimento El Álamo	Elemento	Color (%)						
		Negro	Azul	Verde	Amarillo	Rojo	Morado	Blanco
	As	85.9	13.9	0.2	0	0	0	0
	Cd	95.9	4	0.1	0	0	0	0
	Cr	94	5.9	0.1	0	0	0	0
	Cu	81.7	18	0.3	0	0	0	0
	Mn	59.6	40.2	0.2	0	0	0	0
	Pb	99.9	0.1	0	0	0	0	0
	Zn	80.5	16.8	2.4	0.3	0	0	0

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

**Tabla 83. Resultados del mapeo elemental en el área analizada del suelo Bacanuchi (12-16 cm).**

Sección del suelo Bacanuchi	Elemento	Color (%)						
		Negro	Azul	Verde	Amarillo	Rojo	Morado	Blanco
	As	89.2	10.8	0	0	0	0	0
	Cd	96.5	3.4	0.1	0	0	0	0
	Cr	73.4	26	0.5	0.1	0	0	0
	Cu	83.8	16.1	0.1	0	0	0	0
	Mn	65.1	34.7	0.2	0	0	0	0
	Pb	99.9	0.1	0	0	0	0	0
	Zn	83	16.9	0.1	0	0	0	0

Es evidente la presencia de los diferentes EPT en las dos áreas analizadas, sin embargo, casi la totalidad de ambas imágenes analizadas se encuentra entre los colores negro y azul, lo que evidencia que su porcentaje es bajo (menor al 10%). La realización de este mapeo tuvo como propósito demostrar la presencia de los EPT en las fases sólidas en dos áreas correspondientes al sedimento El Álamo y al suelo Bacanuchi, confirmándose la presencia principalmente de As, Cr, Cu, Mn y Zn, en donde más del 5% del área analizada en ambas secciones tienen concentraciones entre 0 y 10% (colores azules). En el **ANEXO 10** se muestran las imágenes de ambas secciones analizadas en el mapeo elemental.

En la sección 5.3.1 se dijo que en todas las columnas se observó la retención de estos en diferentes proporciones (utilizando curvas de elución y balances de masa), lo que en su momento se relacionó a que los EPT presentes en la solución ácida quedaron retenidos en las fases sólidas de los suelos y sedimentos estudiados probablemente por procesos de precipitación y/o sorción, lo cual se confirmó con los análisis de MEB-EDS y los análisis micromorfológico y morfométrico.

Los análisis micromorfológico, morfométrico y los análisis químicos por medio de MEB-EDS, microsonda electrónica de barrido y mapeos elementales, permiten mencionar los siguientes puntos:

- Mediante análisis micromorfológicos se observó la presencia de precipitados rojizos, que en general se encuentran en los bordes de ciertos cristales. Dichos precipitados no se observaron en las secciones delgadas analizadas donde no se realizó ningún riego con la solución ácida ferrocuprífera. Los precipitados rojizos antes mencionados son claramente diferentes en tamaño y textura a los cristales rojos observados en las secciones delgadas estudiadas sin ningún riego con la solución ácida, los cuales probablemente estén relacionados a procesos de óxido-reducción ajenos a los experimentos realizados en este trabajo.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

- Los análisis de morfometría demuestran cuantitativamente que las secciones delgadas analizadas después de los riegos con la solución ácida presentan un aumento en la presencia de precipitados rojizos y en general en la coloración rojiza en comparación con las secciones delgadas donde no se realizó ningún experimento con la solución ácida ferrocuprífera. De igual forma, se observó la evidencia de posibles cambios en la porosidad como consecuencia del paso de la solución ácida, la cual por su poder erosivo (en relación a su acidez) pudo haber ocasionado la erosión de los poros en algunas de las columnas analizadas.
- Mediante microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS) se determinó que los precipitados rojizos observados en los bordes de ciertos cristales, presentan una composición química predominantemente de Fe. Observándose de igual forma la presencia de EPT como Al, As, Cu y Cr. Estos EPT se determinaron únicamente en secciones delgadas correspondientes a los suelos Tinajas y Bacanuchi, lo cual puede estar asociado a la mayor capacidad de retención de EPT en estas matrices (principalmente en el suelo Bacanuchi) en relación a los sedimentos estudiados. Estos análisis químicos mediante MEB-EDS demuestran que los EPT identificados se encuentran dentro de los precipitados de Fe, los cuales pueden estar asociados a minerales como ferrihidrita, jarosita y/o schwertmanita, los cuales fueron identificados por medio de DRX en muestras superficiales y que además, fueron inferidos por medio de diagramas Eh vs pH (principalmente jarosita) y por medio de modelación geoquímica (ferrihidrita en el caso del suelo Bacanuchi).
- Los precipitados rojizos se encuentran principalmente en los bordes de ciertos cristales tal como se observó en el análisis micromorfológico. Mediante MEB-EDS se confirma que dichos precipitados se encuentran en cristales con la composición química de filosilicatos y plagioclasas. Dicho resultado está relacionado con los resultados vistos en DRX, en donde se observó la presencia de estos minerales y además, el porcentaje de estos disminuye en las muestras analizadas después de los riegos con la solución ácida, lo que implica que al formarse los precipitados de Fe en estos cristales su porcentaje disminuye.
- Debido a que en los sedimentos El Álamo y Chilolo no se determinó ningún EPT y que además en los suelos no se observó la presencia de EPT como Mn, Cd o Zn, se realizó un análisis con microsonda electrónica de barrido. Esta técnica permitió determinar la presencia de EPT como Mn, Pb y Cr en las secciones delgadas de ambos sedimentos. De igual forma, con el uso de esta técnica se realizaron mapeos elementales en dos áreas del sedimento El Álamo y el suelo Bacanuchi, en donde los resultados evidencian la presencia de EPT en diferentes porcentajes.
- De forma general, es posible decir que después del paso de la solución ácida ferrocuprífera a través de los diferentes suelos y sedimentos estudiados, se presentaron fenómenos de precipitación por medio de la formación de minerales de Fe y la retención de EPT por medio de mecanismos de sorción, principalmente en los precipitados de Fe y posiblemente en filosilicatos.



#### **5.4 Evaluación del efecto del paso de la solución ácida ferrocuprífera en la estructura del suelo Tinajas y del sedimento El Álamo.**

El flujo de lixiviados en la base de las columnas Tinajas y El Álamo (Figuras 33 y 38) refleja la existencia de cambios en la velocidad de infiltración entre los diferentes riegos, observándose una tendencia a la disminución de la velocidad de dichos flujos conforme el paso de los riegos. De manera general, se puede observar una disminución en la infiltración de los lixiviados con el paso de los episodios de riego, lo que refleja una disminución en la porosidad total del suelo Tinajas y el sedimento El Álamo como consecuencia del paso de la solución ácida.

Las variaciones de la velocidad del flujo indican cambios en la porosidad original del suelo y sedimento. Para cuantificar dichos cambios y saber con mayor precisión las alteraciones en la estructura original de ambas matrices se realizó un análisis por tomografía de rayos X.

##### **Tomografía de rayos X.**

Para conocer con certeza lo sucedido en la red porosa y en la estructura de ambas columnas, se realizó un estudio de Tomografía de Rayos X en tres etapas diferentes, la primera de ellas antes del primer riego, para tener un parámetro con el cual se pudieran comparar los cambios en la porosidad, el segundo después del primer riego y la tercera para el tercer y último riego con la solución ácida ferrocuprífera.

El análisis de la porosidad de suelos y sedimentos, a partir de los datos generados por la Tomografía de Rayos X, se hace en tres aspectos: a) Distribución de poros por volumen de suelo, b) Porosidad 2D y c) Porosidad 3D.

##### **a) Distribución de poros por volumen.**

Este tipo de gráficas permite visualizar el volumen que ocupan los poros y el número total de poros en dicho volumen, es decir, el comparar los gráficos (antes y después de los riegos con la solución ácida ferrocuprífera) es una forma de saber si existió un cambio en el volumen de los poros y el tamaño de los mismos. El análisis se realizó en tres profundidades de las columnas: superficie, parte media y base, donde se compara en cada una de ellas la relación de volumen y número de poros antes de los riegos y después del primer y tercer episodio de infiltración de la solución ácida.

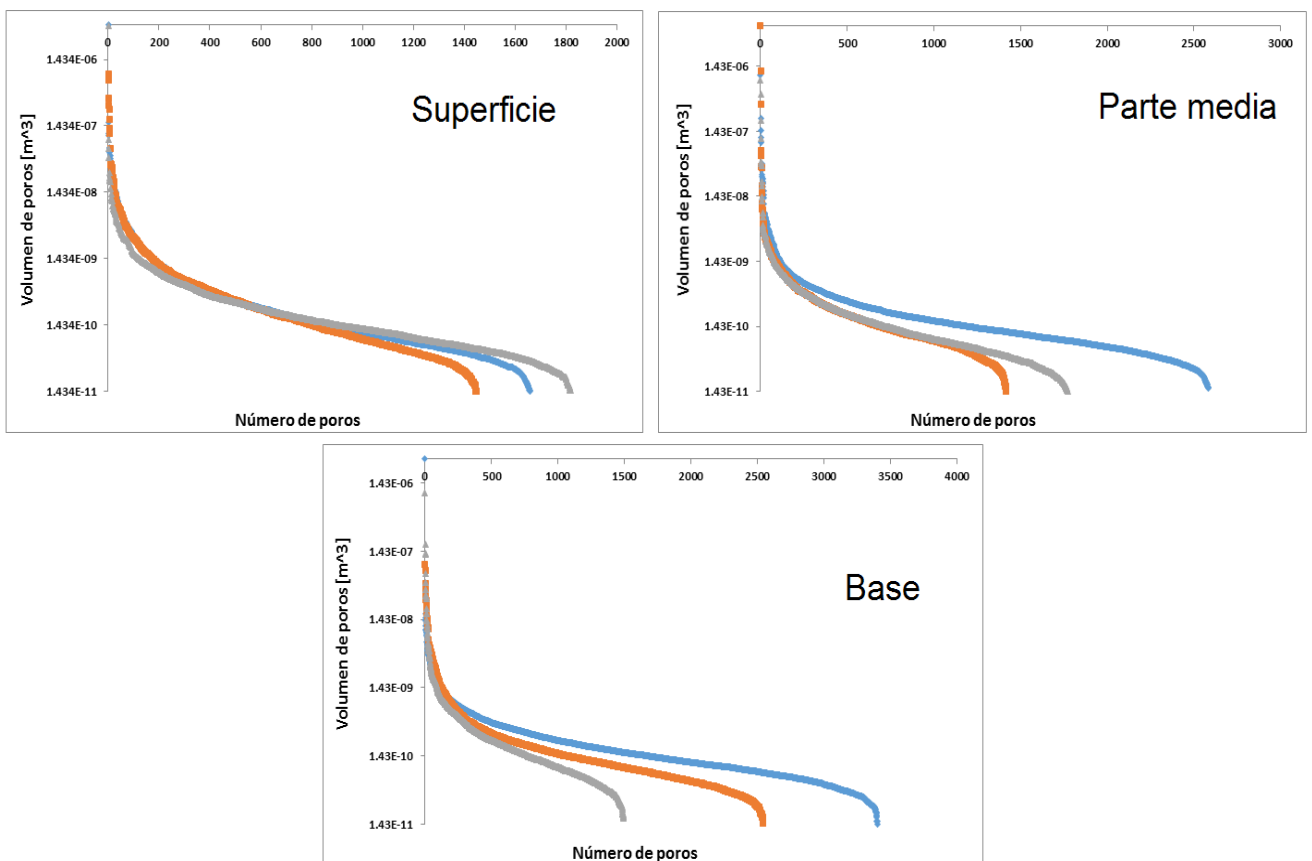
Los resultados evidencian de forma general cambios en el volumen y número de poros en la columna de suelo Tinajas en las tres profundidades evaluadas, como consecuencia del paso de la solución ácida ferrocuprífera.

La figura 131 muestra los cambios en estos parámetros en la columna de suelo Tinajas. Se puede observar en la superficie que después del primer riego el número total de poros disminuyó en relación a la cantidad de poros en la columna sin regar, no obstante, después de 3 riegos la cantidad y volumen de los poros aumentó, por lo que se infiere que en la superficie de la columna de suelo y después de 3 eventos de infiltración de la solución ácida, existe erosión en las partículas del suelo y por lo tanto el volumen y cantidad de poros aumenta.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En lo que respecta a la parte media de la columna de suelo, el número total de poros y el volumen de dichos poros disminuye después del primer y tercer riego en comparación a la columna sin regar. Al comparar los gráficos del primer y tercer riego, puede decirse que el número de poros grandes aumentó después de 3 eventos de infiltración de la solución ácida. En general, para esta profundidad se puede interpretar que los poros se sellan después del primer riego como producto de la erosión de las partículas que proceden de la superficie, tapando los poros a profundidades inferiores, sin embargo, después del tercer riego parece existir una erosión en esta profundidad provocando un aumento en el volumen de poros.

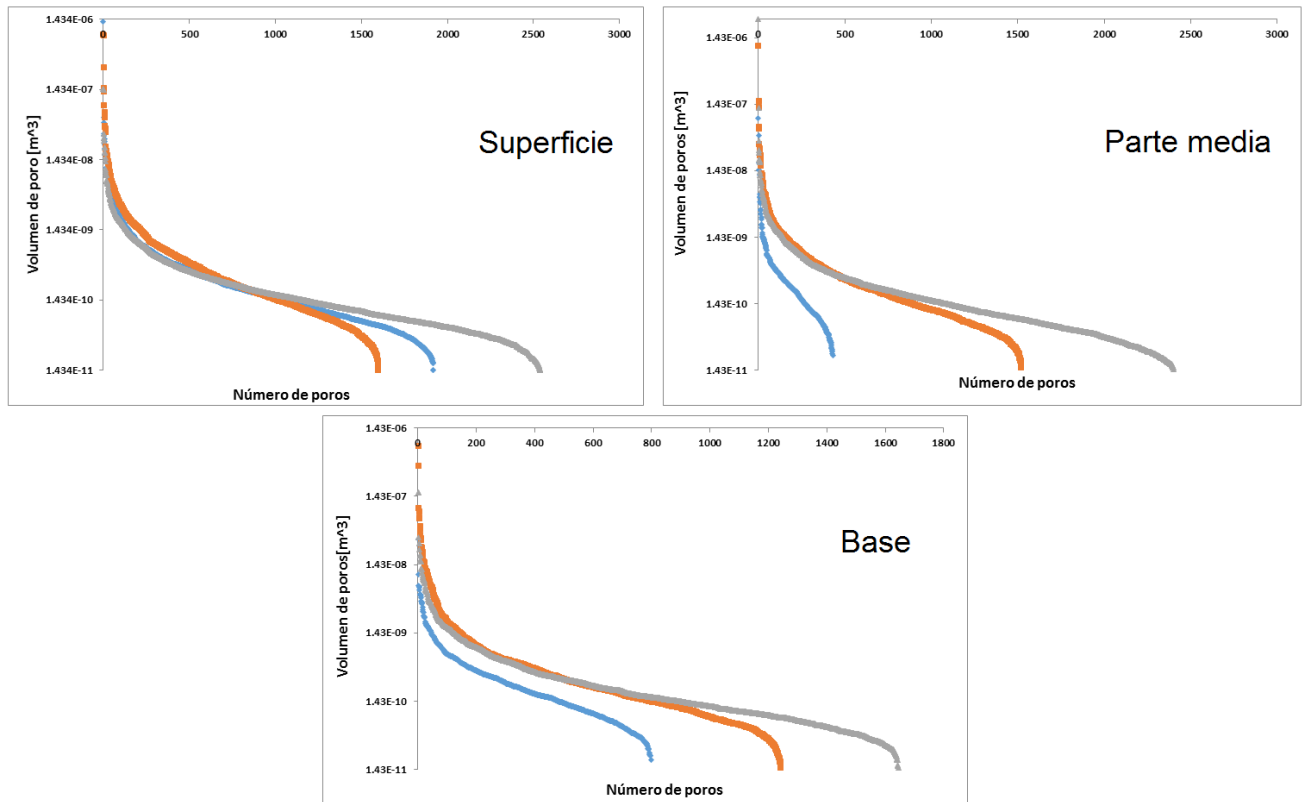
En lo que corresponde a la base de la columna se puede observar la disminución gradual del volumen y la cantidad de poros con el paso de los riegos, lo que evidencia el sellamiento de los poros como consecuencia de la erosión de las paredes de los macroporos en las partes superiores de la columna por la solución ácida, que viajan hacia las partes bajas del perfil del suelo.



**Figura 131.** Distribución de poros por volumen, en la superficie, parte media y base de la columna de suelo Tinajas. Color azul sin riego, color naranja después del primer riego, color gris después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífica.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la figura 132 se presentan los resultados para la columna de sedimento El Álamo.



**Figura 132. Distribución de poros por volumen, en la superficie, parte media y base de la columna de sedimento El Álamo. Color azul sin riego, color naranja después del primer riego, color gris después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera.**

Se observa que en la superficie de la columna se presenta una disminución en el volumen y número de poros en la columna después del primer riego en relación a la misma columna sin el riego con la solución ácida. Por su parte, después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera se observan cambios en el volumen y número de poros, reflejando un aumento en ambas variables en relación a los poros existentes antes de los riegos y después del primer riego, por lo que se infiere la erosión de los macroporos del sedimento, teniendo como consecuencia el aumento en el volumen y la cantidad de poros, provocado por el poder erosivo de la solución ácida.

En lo que respecta a la parte media y base de la columna de sedimento, se observa un claro aumento en el volumen y cantidad de poros con el paso de los riegos, lo que refleja la erosión de los macroporos por la acidez de la solución ácida.

Es interesante señalar las diferencias entre las columnas de sedimento y la columna de suelo. En la columna de sedimento se observa el aumento en el volumen ocupado por los poros y el número de los mismos en todas las profundidades, mientras que en la columna de suelo se observa erosión en la parte alta y media, mientras que la base de la columna recibe las partículas de suelo erosionadas en las partes altas, disminuyendo con esto el espacio poroso. Al comparar estos resultados con lo observado en las curvas de velocidad

de infiltración en el suelo Tinajas, en la figura 33 se observa una disminución de la velocidad de infiltración en el último riego respecto al primero, así como una homogeneización del flujo, este comportamiento refleja la disminución de la porosidad, incluso se podría hablar del tamaño de poros, en la base de la columna del suelo Tinajas, es decir, el flujo pudo haberse incrementado en las dos terceras partes de la columna, pero al llegar a los 20 cm de profundidad, el flujo fue frenado y homogeneizado por la nueva y reducida porosidad de la base de la columna (50 ml/min). En el caso de la columna de sedimento (Figura 38) se observa que la velocidad de flujo disminuyó con los riegos, y al igual que en la columna de suelo, se hizo homogénea (no varío a lo largo del riego, 100 ml/min). Este resultado refleja la menor porosidad que tiene la columna de sedimento en la base, de este modo, el flujo rápido que pudo haber ocurrido en la parte alta de la columna, fue frenado por la porosidad inferior observada en la base.

### **b) Porosidad 2D**

Este tipo de gráficas refleja el porcentaje de porosidad medido en 165 cortes que se hicieron en la parte alta, en la parte media y en la base de ambas columnas. Se utilizan para observar el comportamiento homogéneo o heterogéneo de la porosidad de una matriz a lo largo de la columna.

De las figuras 133 a 135 se observan los gráficos de porosidad 2D en la columna de suelo Tinajas para la parte superficial, media y base, respectivamente. Cabe destacar que los picos anómalos (como el visto en el corte 63 de la figura 133) no representan la porosidad original de la columna, sino que son poros creados por los instrumentos instalados en la columna (tensiómetros) al momento de su equipamiento. Los resultados obtenidos de este tipo de gráficas en la columna Tinajas, permiten, al comparar los gráficos sin riego y después de 1 y 3 riegos con la solución ácida ferrocuprífera, concluir que:

- La porosidad cambia con los riegos.
- Al observar una porosidad más heterogénea entre cortes antes del riego que después de alguno de los riegos, la infiltración de la solución ácida provoca una redistribución de los poros a lo largo de la columna, tendiendo a ser más homogénea (el % de porosidad es similar entre los diferentes cortes).
- La porosidad disminuye, de manera general, en las tres profundidades.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

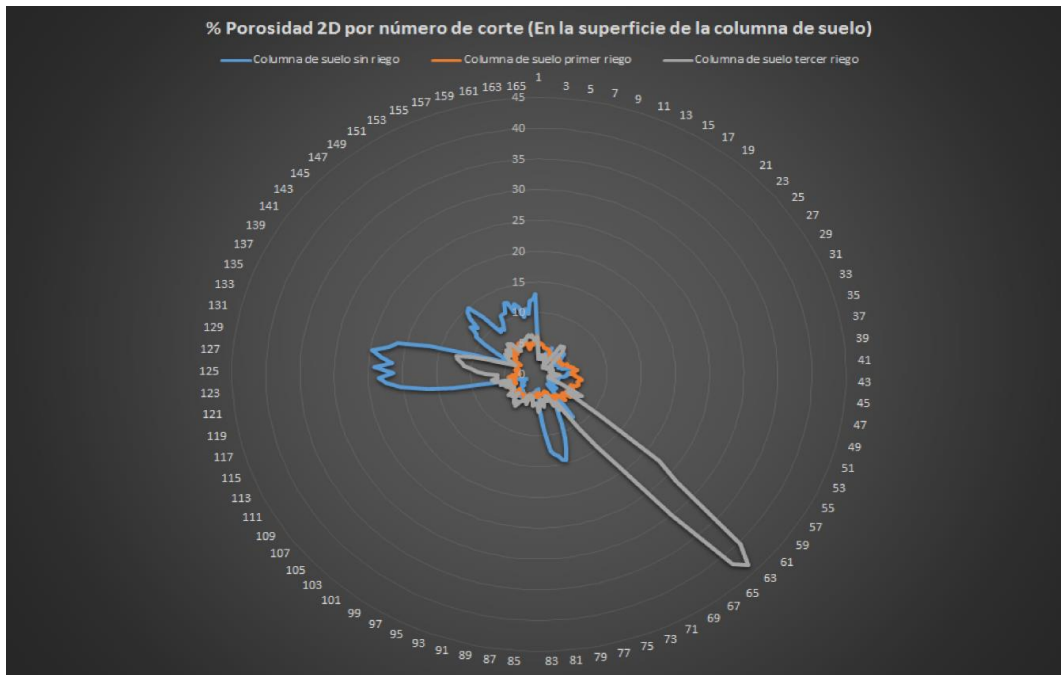


Figura 133. Porosidad 2D en la superficie de la columna de suelo Tinajas. Color azul sin riego, color naranja después del primer riego, color gris después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera.

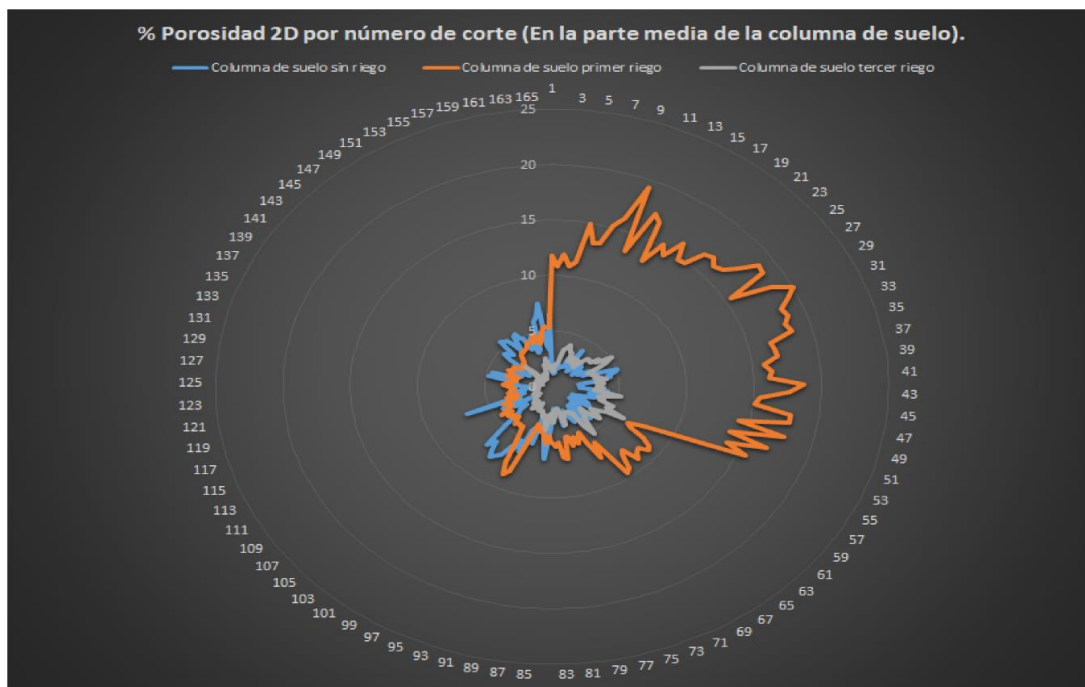
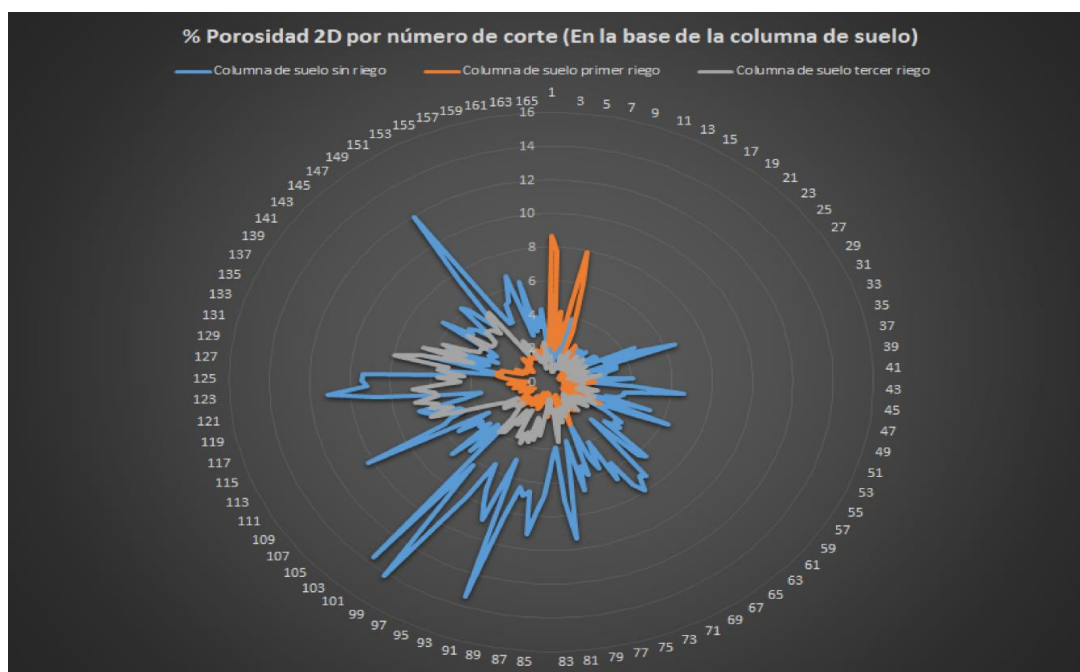


Figura 134. Porosidad 2D en la parte media de la columna de suelo Tinajas. Color azul sin riego, color naranja después del primer riego, color gris después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera.



**Figura 135. Porosidad 2D en la base de la columna de suelo Tinajas. Color azul sin riego, color naranja después del primer riego, color gris después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera.**

De igual forma, se presentan los resultados en porosidad 2D para la columna de sedimento El Álamo en las figuras 136-138, en la superficie, en la parte media y en la base de la misma, respectivamente. Nuevamente los picos anómalos representan la porosidad creada por los aparatos instalados en la columna, como el que se observa en los cortes 141 y 143 de la figura 136.

En las 3 figuras se observa una modificación en la porosidad del sedimento en las 3 profundidades antes mencionadas en lo que corresponde a la toma antes de los riegos y después de 1 y 3 riegos, lo que evidencia que la solución ácida modificó la estructura original del sedimento, cambiando la porosidad del mismo. Las gráficas 2D para la columna El Álamo permiten concluir los siguientes puntos:

- La porosidad fue modificada con el paso de los riegos.
- Se observa una porosidad heterogénea entre cortes después del primer riego, homogenizándose después del tercer riego, lo que puede implicar la redistribución de los poros a lo largo de la columna después del paso del último riego.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

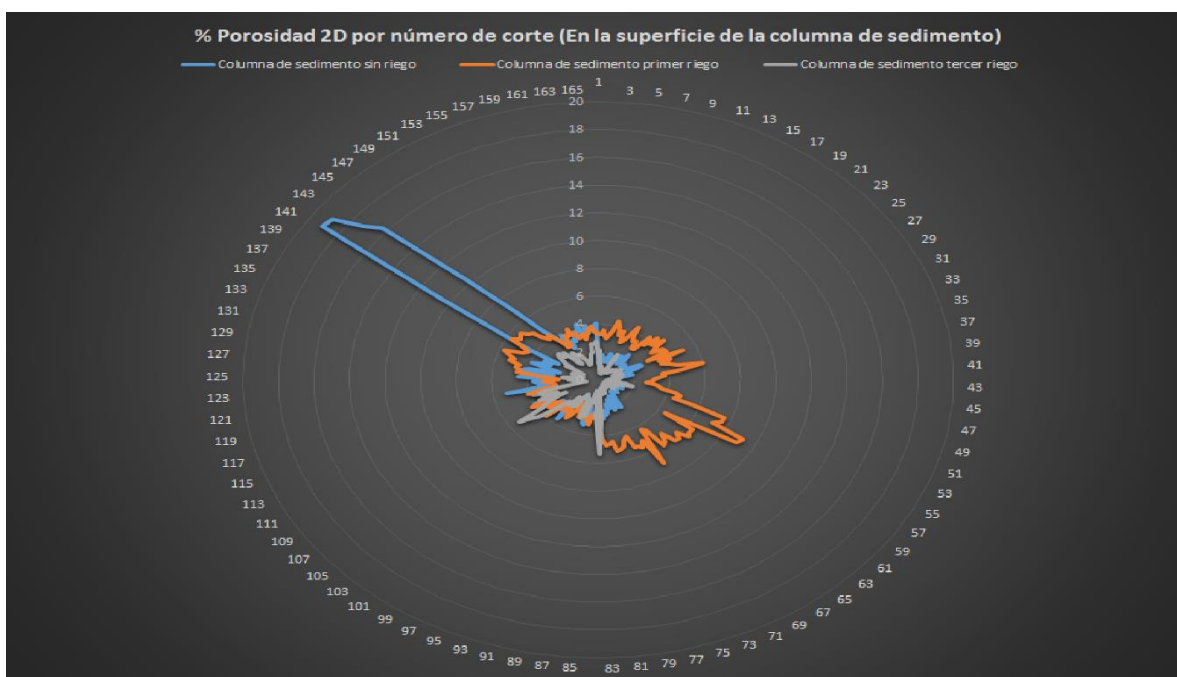


Figura 136. Porosidad 2D en la superficie de la columna de sedimento El Álamo. Color azul sin riego, color naranja después del primer riego, color gris después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera.

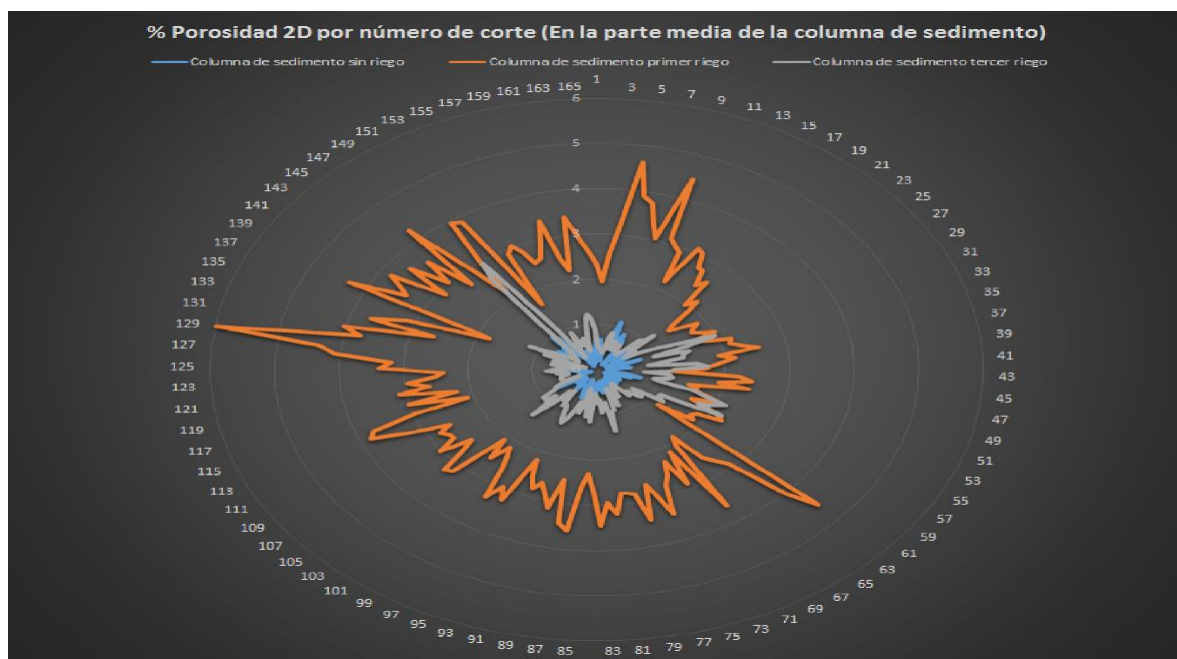


Figura 137. Porosidad 2D en la parte media de la columna de sedimento El Álamo. Color azul sin riego, color naranja después del primer riego, color gris después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera.

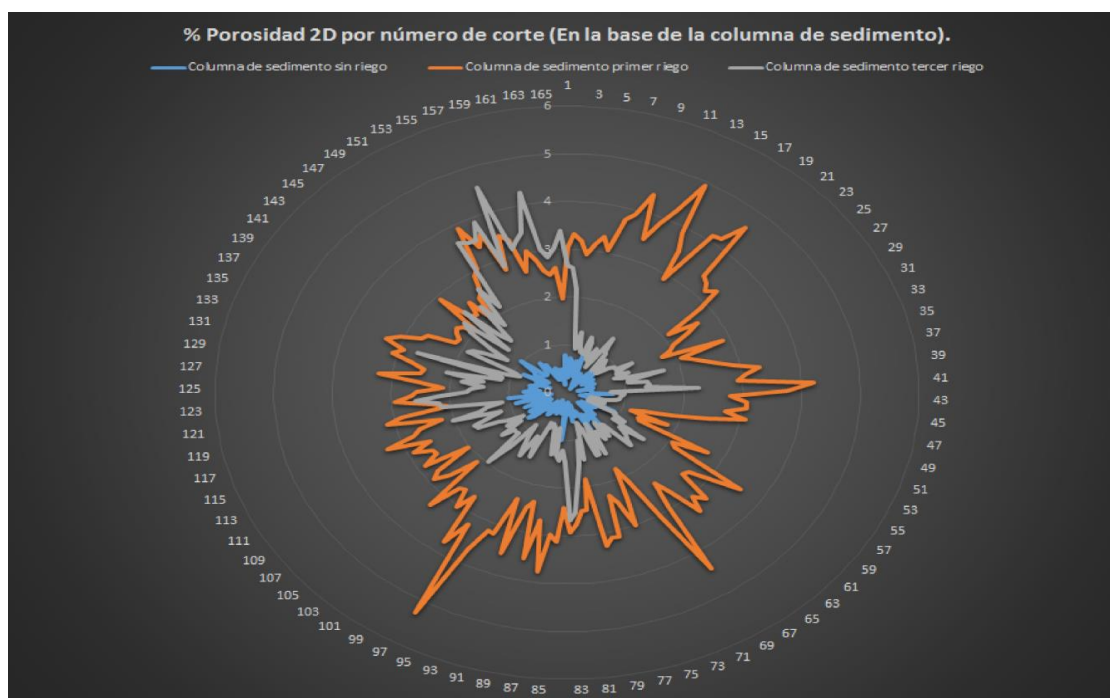


Figura 138. Porosidad 2D en la base de la columna de sedimento El Álamo. Color azul sin riego, color naranja después del primer riego, color gris después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera.

### c) Porosidad 3D

La porosidad en 3D indica el porcentaje de la porosidad total para ambas columnas en 10 subniveles (o subvolúmenes), los cuales representan diferentes profundidades de las columnas, siendo el subnivel 1 la base de ambas columnas y el subnivel 10 la superficie de las mismas.

En la figura 139 se observa la porosidad total en 10 subniveles (profundidades) para la columna de suelo Tinajas. El subnivel 10 correspondiente a la superficie de la columna, presenta una porosidad total de 6.84% antes de los riegos con la solución ácida, posteriormente la porosidad disminuye hasta 4.33% después del primer riego, lo que implica que algunos poros se sellaron con el paso de la solución, no obstante la porosidad aumenta después del tercer riego a una porosidad de 5.86%, por lo que se erosionaron algunos macroporos del suelo por la acidez de la solución. En general, es posible decir que el paso de la solución ácida ferrocuprífera redujo en 1% la porosidad original en la superficie de la columna Tinajas.

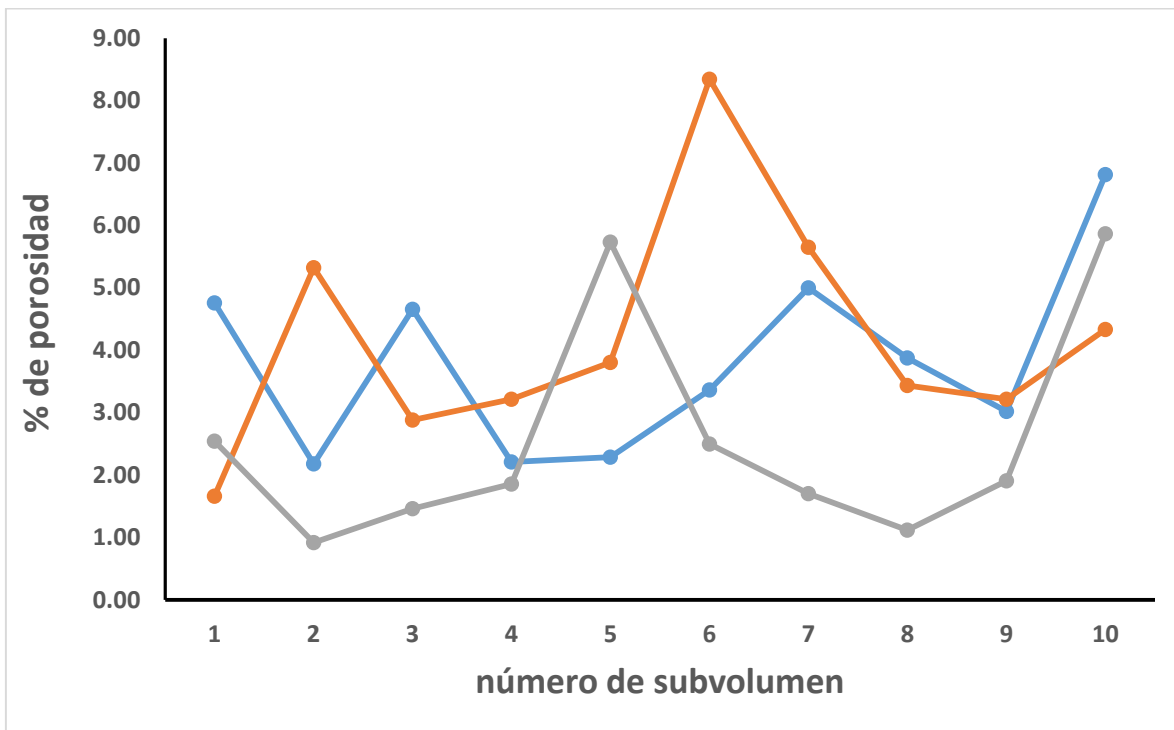
En la parte media de la columna de suelo, la porosidad original sin ningún riego fue de 2.28%, una vez realizada la primera infiltración del drenaje ácido la porosidad aumentó a 3.80% para terminar con una porosidad de 5.73% después del tercer riego, todo ello implica que a esta profundidad hubo una clara erosión de los macroporos, debido al “lavado” de las partículas del suelo por la acidez de la solución ácida.



## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Finalmente, en la base de la columna, la porosidad inicial sin afectar al suelo era de 4.75%, disminuyendo a 1.65% después del primer riego, saturando y sellando muchos de los macroporos existentes, sin embargo, al regar dos veces más con la solución ácida la porosidad aumenta hasta 2.54%. En general, la porosidad disminuyó 2.21% en relación a la porosidad sin riego y después del tercer riego con la solución ácida.

De manera general se observa una disminución de la porosidad a todo lo largo de la columna después de tres riegos con la solución ácida. Debido a las características de la solución de riego, se presume una erosión de las partículas del suelo en la superficie por la acidez de la solución, afectando la estructura y la porosidad original del suelo, resultando en el sellamiento de los macroporos en la base de la columna.

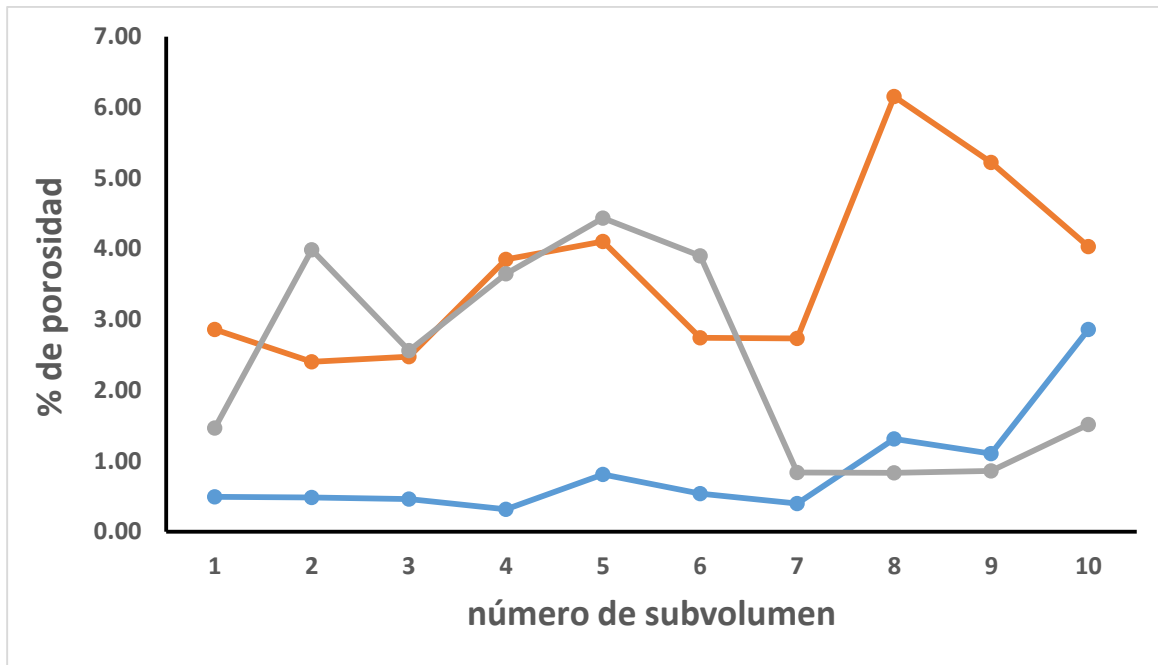


**Figura 139.** Porosidad 3D por subvolumen en la columna de suelo Tinajas en los diferentes riegos con la solución ácida. Color azul sin riego, color naranja después del primer riego, color gris después del tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera. Los subvolumenes 1 y 10 corresponden respectivamente a la base y superficie de la columna.

En la columna de sedimento El Álamo (Figura 140), se observa que en la superficie el porcentaje de la porosidad total antes de los riegos era de 2.85%, después del primer riego aumentó a 4.02%, disminuyendo después del tercer riego a 1.51%, reflejando un sellamiento de los macroporos, lo que implica que la erosión fue máxima en el primer riego, teniendo como consecuencia el taponamiento por esa erosión después del tercer riego.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la parte media y la base de la columna, la porosidad aumentó con el paso de los riegos, aparentemente no hubo gran diferencia entre el primero y el tercero. Cabe resaltar el hecho de que la porosidad en la última capa de la columna (base) disminuyó en el tercer riego (en relación al primer riego), una vez más puede considerarse que se debe a que es esta zona la que recibió el material resultado de la erosión que ocurrió centímetros arriba.



**Figura 140. Porosidad 3D por subvolumen en la columna de sedimento El Álamo en los diferentes riegos con la solución ácida. Color azul sin riego, color naranja primer riego, color gris tercer riego. Los subvolúmenes 1 y 10 corresponden respectivamente a la base y superficie de la columna.**

Los resultados del análisis por Tomografía de Rayos X muestran que el paso de la solución ácida ferrocuprífera modificó la estructura y la distribución del tamaño de poros del suelo Tinajas y del sedimento El Álamo, modificando con ello la velocidad de infiltración/tiempo de contacto de la solución ácida con las partículas de suelo/sedimento. Es claro el hecho de que los cambios provocados por el paso de la solución ácida a través del suelo, son diferentes al ocasionado en el sedimento. En el suelo, la solución ácida puede ser más agresiva debido al mayor contenido de materiales orgánicos que presentan los suelos, mientras que en los sedimentos la fracción mineral es mucho más importante que lo orgánico, siendo entonces más resistente al paso de la solución ácida.

En las figuras 141 y 142 se observan imágenes en 3D del suelo Tinajas y el sedimento El Álamo, respectivamente, tomadas durante el análisis tomográfico. Dichas imágenes fueron adquiridas antes de los riegos y después del primer y tercer riego con la solución ácida ferrocuprífera. Los diferentes colores implican conectividad de la red de poros, por lo que un mismo color implica poros interconectados. Por su parte, los espacios vacíos reflejan poros no conectados. Así, estas imágenes reflejan cambios en la estructura original tras el paso de la solución ácida por ambas columnas.

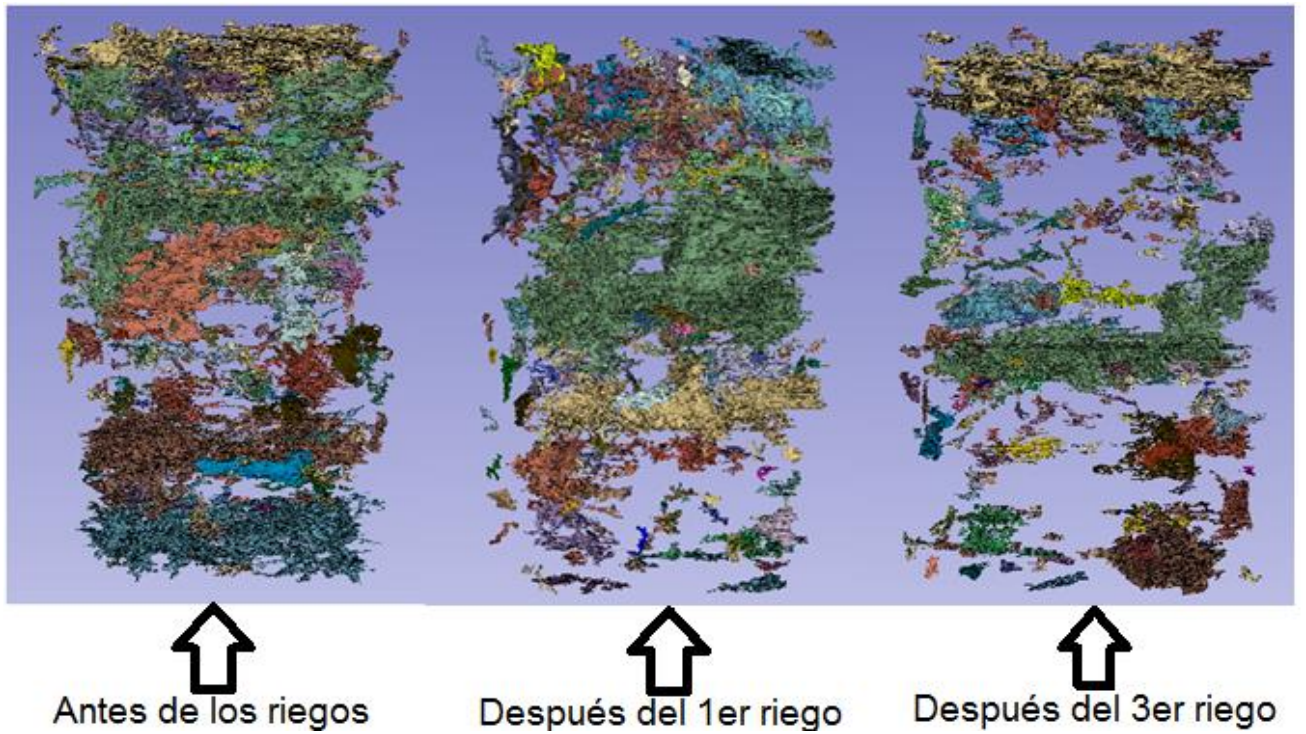


Figura 141. Imágenes en 3D de la columna de suelo Tinajas, adquiridas después del análisis por tomografía de rayos X.

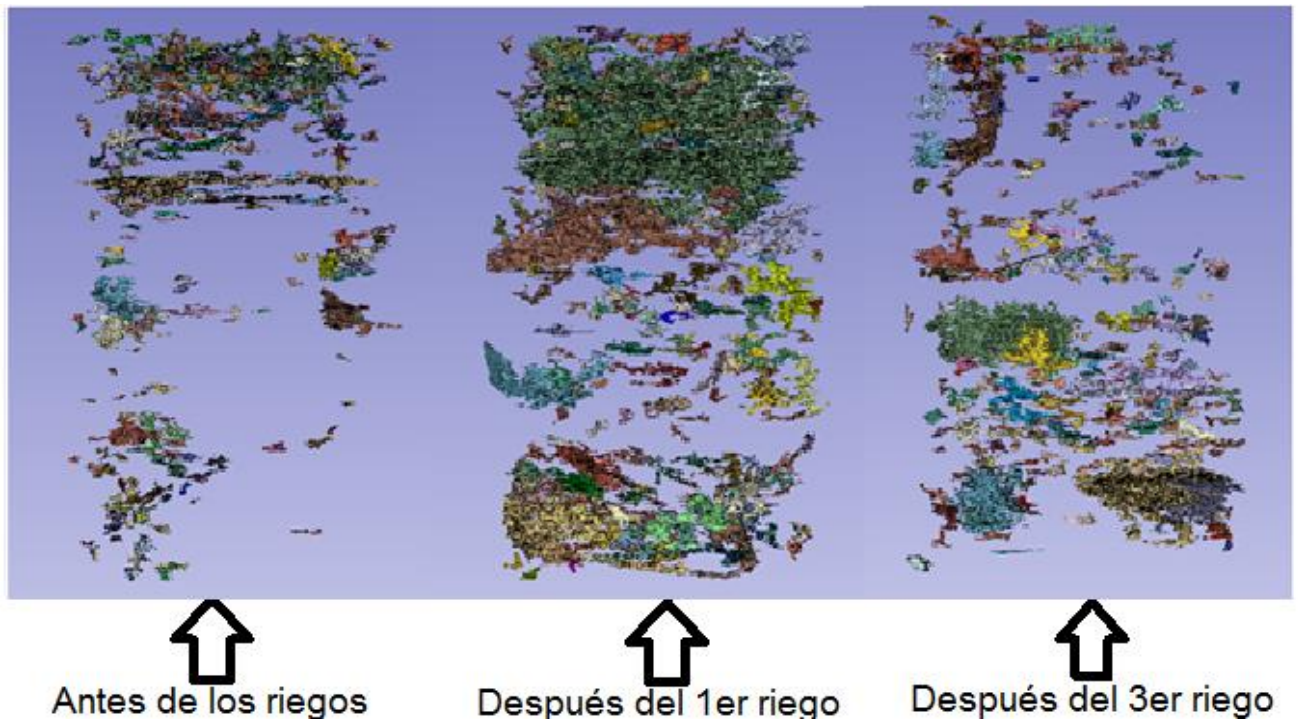


Figura 142. Imágenes en 3D de la columna de sedimento El Álamo, adquiridas después del análisis por tomografía de rayos X.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES

---

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, es posible concluir los siguientes puntos:

1. En la zona aparentemente afectada por el derrame de la solución ácida, donde se realizaron perfiles de excavación, se observaron precipitados amarillos en diferentes profundidades. De igual forma, se observó la importancia de la granulometría en los cambios de humedad y conductividad eléctrica. Se observó que el perfil más cercano al sitio del derrame está relacionado a una mayor concentración de elementos como Fe, Mn, Pb y Zn.
2. Análisis físicos y químicos realizados en las muestras superficiales de la zona visiblemente no afectada por la solución ácida ferrocuprífera, demuestran que el suelo Bacanuchi presenta características amortiguadoras notablemente diferentes al resto de las muestras, ya que presenta la mayor superficie específica (superficie de contacto), un mayor contenido de carbonatos (las muestras Tinajas y El Álamo carecen de carbonatos), un porcentaje mayor de partículas del tamaño textural de arcillas, así como un amplio intervalo de pH en donde puede retener cationes y/o aniones (considerando que presenta dos puntos de carga cero). El resto de las muestras presentan características físicas y químicas variables, coincidiendo en su punto de carga cero con un pH entre 2.55 y 3.24, por lo que presentan condiciones para retener vía sorción preferentemente cationes metálicos.
3. Por medio de curvas de elución (y la determinación del área bajo la curva) y balances de masa, se determinó que todas las columnas presentan la capacidad de retener en diferentes porcentajes a los diferentes EPT presentes en la solución ácida ferrocuprífera. La columna de suelo Bacanuchi es la mejor amortiguadora de estos elementos, reteniendo hasta en un máximo de 100% a todos los EPT estudiados (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn) aún después de dos eventos de irrigación.
4. Con la intención de evaluar lo ocurrido con los EPT después de su paso a través de los diferentes suelos y sedimentos, se realizaron diagramas Eh vs pH y se llevó a cabo una modelación geoquímica con el propósito de inferir la posible precipitación de nuevas fases minerales capaces de retener a los diferentes metales. Los resultados reflejan la posible precipitación y estabilidad de minerales secundarios de hierro, principalmente jarosita ( $KFe_3^{3+}(SO_4)_2(OH)_6$ ) y ferrihidrita ( $Fe_{10}^{3+}O_{14}(OH)_2$ ).
5. Algunos minerales inferidos en los diagramas Eh vs pH y la modelación geoquímica fueron debidamente identificados por medio de Difracción de Rayos X, principalmente jarosita y ferrihidrita, al igual que el mineral schwertmanita ( $Fe_{3+}_{16}O_{16}(OH)_{12}(SO_4)_2$ ), demostrando la precipitación de fases minerales de hierro en las columnas estudiadas, lo cual había sido inferido previamente por cambios de coloración en las columnas como consecuencia de la interacción de la solución ácida y los diferentes suelos y sedimentos estudiados.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

---

6. Para cuantificar esos cambios de coloración se realizó un análisis colorimétrico, el cual demuestra que en todas las columnas se determinó un aumento en los parámetros  $a^*$  (aumento en el color rojo) y  $b^*$  (aumento en el color amarillo) reflejando la precipitación de minerales de hierro después de los experimentos realizados.
7. Los resultados de Fluorescencia de Rayos X reflejan la retención de los EPT debido al incremento en la concentración total en comparación a las muestras superficiales no contaminadas tomadas en cada sitio. Mediante este análisis, se determinó que después de los diferentes episodios de simulación del paso de la solución ácida a través de las diferentes columnas, todos los EPT superan los valores de fondo naturales en la columna Bacanuchi en alguna profundidad entre 0 y 6 cm, y las concentraciones totales de todos ellos son mayores a la muestra superficial de suelo no irrigada con la solución ácida tomada en el mismo sitio, dichos resultados demuestran que este suelo retuvo a todos los metales analizados por lo que su concentración total aumentó. Por su parte, en la columna de suelo Tinajas únicamente se superan los valores de fondo para Cu, Mn y Zn, en la columna de sedimento El Álamo se superan para Cu y Zn y finalmente en la columna de sedimento Chilolo se superan para Cu y Pb. El Cu es el único elemento que supera los valores de fondo en las 4 columnas estudiadas. Para determinar el nivel de contaminación después de los riegos con la solución ácida se usó el Índice de geoacumulación (Igeo), en el cual fue posible determinar que el nivel de contaminación para As, Cr, Fe, Mn, Pb y Zn es de no contaminado a moderadamente contaminado y únicamente en las columnas Tinajas y Bacanuchi se tiene un nivel de contaminación de Cu de moderadamente contaminado (en el suelo Tinajas) a fuertemente contaminado (en el suelo Bacanuchi), lo cual refleja que en las situaciones simuladas únicamente el cobre representa un problema ambiental en dos de los sitios evaluados.
8. Para inferir la capacidad de liberación de los EPT retenidos en las columnas después de los experimentos con la solución ácida, se llevó a cabo una prueba de extracción con agua en equilibrio con  $\text{CO}_2$ , los resultados demuestran que el As, Cr y Pb no son solubles en ninguna muestra por lo que no se liberan desde los suelos y sedimentos. Por su parte, las concentraciones máximas solubles del resto de los elementos son: Cd = 0.2 mg/L, Cu = 20.1 mg/L, Fe = 3.67 mg/L, Mn = 57.2 mg/L y Zn = 12.9 mg/L, las cuales, con excepción del Fe, superan los valores de fondo para aguas superficiales de estudios anteriores.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

---

9. Por medio de análisis micromorfológicos y morfométricos en secciones delgadas realizadas después de la infiltración de la solución ácida se determinó la presencia de minerales secundarios como yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y precipitados de coloraciones rojizas, así como cambios en la porosidad en comparación a secciones delgadas realizadas antes de los experimentos con la solución ácida. Por medio de microscopía electrónica de barrido y microsonda electrónica se confirmó que los precipitados rojizos determinados en los análisis micromorfológicos corresponden a precipitados secundarios de hierro identificados previamente por medio de Difracción de Rayos X. De igual forma, se determinó que la retención de los EPT en las diferentes columnas se debe en primera instancia a la precipitación de las fases secundarias de hierro y en segunda instancia a posibles fenómenos de sorción en arcillas minerales (las cuales fueron identificadas previamente por medio de Difracción de Rayos X) así como a la sorción en los precipitados secundarios.
  
10. Con el uso de Tomografía de Rayos X se comprobó la existencia de cambios en la estructura original del suelo Tinajas y el sedimento El Álamo después del paso de la solución ácida, la cual causó principalmente la erosión de las partículas de la columna de suelo en la superficie por la acidez de la misma solución, provocando un sellamiento en la base de la columna, con lo cual existió una disminución en la porosidad a ese nivel. Por su parte, se observaron cambios en la porosidad de la columna de sedimento, principalmente reflejando una erosión de los macroporos y el consecuente incremento de la porosidad.

Considerando un contexto ambiental de la zona de estudio, es factible afirmar que con los resultados presentados en este trabajo, los suelos y sedimentos de la región presentan características amortiguadoras para retener los ETP en caso de posibles eventos de derrames de soluciones ácidas como la ocurrida en el año 2014 (dichas soluciones ácidas son comunes debido al tipo de actividad minera de la región), debido principalmente a la presencia de carbonatos (los cuales neutralizan la acidez y promueven una menor movilidad de EPT) en la región que corresponde al suelo Bacanuchi y en general, a la precipitación de fases secundarias de hierro (formadas por la interacción de la solución aplicada con las diferentes matrices estudiadas) que facilitan la retención de estos elementos.

## REFERENCIAS

---

- ABC-Analitic. (2014): Informe de resultados del muestreo y análisis de agua, sedimentos y biota de los ríos Bacanuchi y Sonora contaminados por la fuga proveniente de la mina Buenavista del Cobre.
- Abollino, M. Acetob, M. Malandrino, C. Sarzaninia, E. Mentastia. (2003): Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and organic substances. Water Research 37,1619–1627.
- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., Cruz-Chávez, E. (2004): El papel de óxidos de hierro en suelos Terra Latinoamericana, vol. 22, núm. 4pp. 485-497 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Adriano, D.C. (2003): Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. Springer, New York, NY, USA, 2nd edition.
- Aduvire, O. (2006): Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. Tratamiento de Aguas Acidas de Mina. Madrid.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2004. Toxicological Profile Information Sheet. Disponible en Internet en: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxpro2.html>.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2005. Division of Toxicology. ATSDR Information Center: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxfaq.html#bookmark05>.
- Akrami, B.S. (2014): Transport and retention of cadmium, copper, and lead in soils: miscible displacement experiments. Sharif University of Technology.
- Alloway, B.J. (1990): Soil processes and the behaviour of metals. Heavy metals in soils. Blachie Academic. England. p: 11-37.
- Alloway, B.J. (1995): Soil processes and the behaviour of metals. En: Heavy metals in soils, pp. 122-151. B.J.Alloway (ed.). Blackie. Londres.
- Altin, O., Ozbelge, O.H., Dogu, T. (1999): Effect of pH, flow rate and concentration on the sorption of Pb and Cd on montmorillonite: I. Experimental. J. Chem. Technol. Biotechnol. 74(12):1131–8.
- Anderson, T.H. and Silver, L.T. (1978): The nature and extent of Precambrian rocks in Sonora, México. in Roldán-Quintana, Jaime y Salas, G.A., eds., Resúmenes, Primer simposio sobre la geología y potencial minero en el estado de Sonora, UNAM, Inst. de Geología, p. 9-10.
- Anderson, T.H. and Silver, L.T. (1979): The role of the Mojave-Sonora megashear in the tectonic evolution of northern Sonora. Guidebook-Field Trip No. 27, GSA Annual Meeting. San Diego.
- Anderson, T.H. and Silver, L.T. (1981): An overview of Precambrian rocks in Sonora. UNAM. Inst. de Geología Revista Vol. 5 núm. 2 p. 131-139.
- Anderson, S.H., Peyton, R.L. and Gantzer, C.J. (1990): Evaluation of constructed and natural soil macro-pores using X-ray computed tomography. Geoderma, 46: 13-29.
- Andrade, L., Covelo, E. F., Vega, F. A. (2005): Uso de arcillas especiales para depuración de aguas residuales. Información tecnológica, 16, 3-10.
- Araujo-M.J. (1993): Evolución Paleogeográfica del Cretácico Inferior en la región noreste de Sonora. III simposio de la geología de Sonora y áreas adyacentes. Inst. de Geología. UNI-SON. p. 4-5.
- Arce García, O. (2000): Metales pesados presentes en el agua. Manual de prácticas. Universidad Mayor de San Simón. Bolivia.
- Armienta, M.A., Villaseñor, G., Rodríguez, R., Ongley, L.K. and Mango, H. (2001): The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, Mexico. Environ. Geol. 40 (4–5), 571–581.
- Bain, J.G., Blowes, D.W., Robertson, W.D. and Frind, E.O. (2000): Modelling of sulfide oxidation with reactive transport at a mine drainage site: J. Contam. Hydrol. 41 (1–2), 23–47.
- Barton, M.D., Staude, J.M., Zürcher, L., Megaw, P.K.M. (1995): Porphyry copper and other intrusion-related mineralization in Mexico. en Pierce, F.W., y Bolm, J. G. (eds.), Porphyry copper deposits of the American Cordillera: Arizona Geological Society Digest 20, 487-524.

- Bejat, L., Perfect, E., Quisenberry, V. L., Coyne, M.S. and Haszler, G. R. (2000): Solute Transport as Related to Soil Structure in Unsaturated Intact Soil Blocks. Plant and Soil Sciences Faculty Publications. Paper 10.
- Besoain, E. (1985): Minerales de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Bhattacharya, P., Jacks, G., Frisbie, S.H., Smith, E., Naidu, R., and Sarkar, B. (2002): Arsenic in the Environment: A Global Perspective, in Sarkar, B., ed., Heavy Metals in the Environment, Marcel Dekker, Inc.
- Bigham, JM. (1994): Mineralogy of ochre deposits formed by sulfide oxidation. In: Jambor J, Blowes D, editors. Hand- book on environmental geochemistry of sulfide mine- wastes. Mineral Assoc Can 22:103-132.
- Bigham, J.M., Schwertmann, U., Traina, S.J., Winland, R.L. and Wolf, M., (1996): Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(12): 2111-2121.
- Blowes, D.W. and Jambor, L.L. (1990): The pore-water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailing. Waite A mullet, Quebec, Canada. Applied Geochem., 5 (3): 327-346.
- Blowes, D.W. and Ptacek, C.J., (1994): Acid-neutralization mechanisms in inactive mine tailings. In: J.L. Jambor and D.W. Blowes (Editors), Short course handbook on environmental geochemistry of sulfide mine-waste. Mineralogical Association of Canada, Nepean, pp. 271-291.
- Bourg, A.C.M. (1995): Speciation of heavy metals in soils and groundwater and implications for their natural and provoked mobility. In "Heavy Metals", W. Salomons, U. Förstner & P. Mader, eds. Springer-Verlag, Berlin, 19-31.
- Bourg, A.C.M. and Loch J.P.G. (1995): Mobilization of heavy metals as affected by pH and redox conditions. In. Salomons, W. and Stigliani, W. M. Biogeochemistry of pollutants in soil and sediments. Springer. Berlin. P: 87-101.
- Boyle, M. and Fuller, W. H. (1987): Effect of municipal solid waste leachate composition on zinc migration through soils. J. Environ. Qual., 16, 357-360.
- Bradl, H., (2004): Adsorption of heavy metal ions in soils and soil constituents. Journal of Colloid and Interface Science, 227:1-18.
- Brookins, D.G. (1988): Eh-pH diagrams for geochemistry. Springer, Berlin, 176 pp.
- Buenrostro, F. (2007): Determinación de metales pesados en muestras de suelo superficial de la zona que circunda a las instalaciones de la empresa cromatos de México en Tultitlán, estado de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Burgos Flores, D., (2001). Tesis. Evaluación del riesgo ambiental por nitratos y nitritos, así como algunos metales, en la subcuenca central del río Sonora, México. Hermosillo, Sonora: UNISON.
- Bushnell, S.E. (1988): Mineralization at Cananea, Sonora, Mexico, and paragenesis and zoning of breccia pipes in quartzofeldspathic rock. Economic Geology, 83, 1760-1781.
- Calmano, W., Ahlf, W. and Forstner, U. (1996): Sediment Quality Assessment: Chemical and Biological Approaches. In: Calmano, W. and Forstner, U. Sediments and Toxic Substances. Environmental effects and ecotoxicity. Springer. Germany. p. 1-12.
- Calvo de Anta, R. (1997). El conocimiento del suelo como principio básico de la gestión de suelos contaminados. 50 aniversario de la SECS. Ponencias, 211-239.
- Camobreco, V.J., Richards, B.K., Steenhuis, T.S., Peverly, J.H and Mc-Bride M.B. (1996): Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. Soil Science, 161(11), 740-750.
- Cannon, H.L., Connally, G.C., Epstein, J.B., Parker, J.G., Thornton, I. and Wixson, G. (1978): Rocks: geological sources of most trace elements. Workshop at South Seas plantation Captiva Islands, FL, US.: Geochem Environ, v. 3, p. 17 - 31.
- Carter, D. L.; Mortland, M. M.; Kemper, W. D. (1986): Specific surface. In: Klute, A., ed. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2 nd. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. 413-423.
- Cary, E., Allaway, W.H., Olson, O.E. (1977): Control of chromium concentration in food plants. Absorption and translocation of chromium by plants. J. Agric. Food Chem. 25: 300-304.



- Castillo, A. (2014): Especiación geoquímica de contaminantes traza en matrices cerámicas conteniendo escoria waelz como recurso alternativo. Tesis de licenciatura. Universidad de Cantabria.
- Chen, C., Lau, B.L.T., Gaillard, J.-F., Packman, A.I. (2009): Temporal evolution of pore geometry, fluid flow, and solute transport resulting from colloid deposition. Water Resour. Res. 45(6).
- Chen, C., Packman, A.I., Zhang, D., Gaillard, J.-F. (2010): A multi-scale investigation of interfacial transport, pore fluid flow, and fine particle deposition in a sediment bed. Water Resour. Res. 46 (11).
- Childs, C.W. (1992): Ferrihydrite: A review of structure, properties and occurrence in relation to soils. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 155: 441-448.
- CNA. (2002): Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Sonora, Estado Sonora: México, D.F., Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.
- CONAGUA. (2007): Programa Hídrico Visión 2030. Organismo de Cuenca del Noroeste. Comisión Nacional del Agua. México, DF. 276 pp.
- CONAGUA. (2008): Proyecto CONAGUA. Sistema de Información Geográfica del Agua. Comisión Nacional del Agua. México, DF.
- CONAGUA. (2009): Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero 2624 Río Sonora, Estado de Sonora. Diario Oficial de la federación, 28 agosto, pp. 8-12.
- CONAGUA. (2011): Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2628 Río Bacanuchi, Estado de Sonora. Diario Oficial de la federación, 25 Enero, pp. 3-28.
- Coney, P.J. (1980): Cordilleran Metamorphic Core Complexes: An overview. Geological Society of América, Memoir 153, p. 7-31.
- Consejo minero, ministerio de minería. (2002): Guía metodológica sobre el drenaje ácido en la industria minera. Gobierno de Chile, 7-9.
- Cooper, G.A.; Arellano, R.V.; Johnson, J.H.; Okulitch, V.; Stoyanov, A. and Lochman, C. (1952): Cambrian stratigraphy and paleontology near Caborca, northwest Sonora México: Smithsonian Miscell. Coll., V. 119. 106 p.
- Cornelis, G., (2008): Leaching mechanisms of oxyanionic metalloids and metal species in alkaline solid waste. Ph. D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven.
- Csuros, M y C. Csuros. (2002): Environmental sampling and analysis for metals. Lewis Publisher. 372 pp.
- D'Amore, J. J., Al-Abed, S. R., Scheckel, K. G and Ryan, J. A. (2005): Methods for speciation of metals in soils: a review. Journal of Environmental Quality, vol.34, no.5, pp.1707–1745.
- Díaz-Ortega, J., Rivera-Uria, Y., Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, (2015): Micromorphological evidences of the mine acid drainage in the soils of the Sonora River, México (poster presentation). In: Resoration and reclamation of environmental liabilities-technosols; 2015 Sep 20-25; Ciudad de México, Mexico City: The International conference of the working group on Soils in Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas (Suitma 8).
- Di Ciocco, C. A.; Sandler, R. V.; Falco, L. B.; Coviella, C. E. (2014): Actividad microbiológica de un suelo sometido a distintos usos y su relación con variables físico-químicas. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina 46 (1): 73-85.
- Dijkstra, J.J., Meeussen, J.C.L. and Comans, R.N.J. (2004): Leaching of Heavy Metals from Contaminated Soils: An Experimental and Modeling Study. En: Environmental Science & Technology, 38 (16), 4390-4395.
- Dold, B., (2002): Basic concepts of environmental geochemistry of sulfide mine waste. curso de posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Doménech, X. (1997): Química del suelo. El impacto de los contaminantes. Ed. Miraguano, 11-18, 29-52, 119-122.
- Dowdy, R. H. and Volk, V. V. (1983): Movement of heavy metals in soils. In Chemical Mobility and Reactivity in Soil Systems, SSSA Spec. Publ. 11, ed. D. W. Nelson et al. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 227- 240.

- Duwig C., Prado, B., Delmas, P., Gastelum, A., Charrier, P. and Hidalgo, C. (2013): Impacts of porous structure organic matter and mineralogy on atrazine fate in two contrasting tropical soils. Goldschmidt, Florence, Italy, 25 AUG – 30 AUG 2013, Pag. 1023-1023.
- Echarri, L. (1998): Libro electrónico: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. TEMA11 Contaminación del agua. Ed. Teide. <http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/11CAgu/100CoAcu.htm>.
- Evanko, C.R. y D.A. Dzombak. (1997): Remediation of metals-contaminated soils and groundwater. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center (GWRTAC) "E" Series Report. 53 pp.
- Facchinelli A., Sacchi E., Mallen L. (2001): Multivariate statistical and GISbased approach to identify heavy metal source in soils. Environmental Pollution 114, 313-324.
- FAO. (2009): Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición, 34-54.
- Feng, Q., Zhang, Z., Chen, Y., Liu, L., Zhang, Z. y Chen, C., (2013). Adsorption and Desorption Characteristics of Arsenic on Soils: Kinetics, Equilibrium, and Effect of Fe(OH)<sub>3</sub> Colloid, H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> Colloid and Phosphate. Procedia Environmental Sciences, 18: 2636.
- Ferguson, J. E. (1990): The heavy elements; chemistry, environmental impact and health effects. Pergamon Press. Oxford, England, pp. 57-63, 143-166, 243-327.
- Flores Delgadillo, L., & Alcalá Martínez, J. R. (2010): Manual de Procedimientos Analíticos, Laboratorio de Física de Suelos. Departamento de Edafología, Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geología.
- Foster, A.L., Brown, G.E., Tingle, T.N. and Parks, G.A. (1998): Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray adsorption spectroscopy. American Mineralogist, 83 (5-6), 553-568.
- Fuller CC., Davis J.A. Waychunas G.A. (1993): Surface chemistry of ferrihydrite: Part2. Kinetics of arsenate adsorption and coprecipitation. Geochemistry Cosmochim Acta 57: 2271-2282.
- Gaillard, J.-F., Chen, C., Stonedahl, S.H., Lau, B.L.T., Keane, D.T., Packman, A.I. (2007): Imaging of colloidal deposits in granular porous media by X-ray difference micro-tomography. Geophys. Res. Lett.34 (18), L18404.
- Galán-Huertos, E. y Romero-Baena, A. (2008): Contaminación de suelos por metales pesados. Conferencia contaminación de suelos por metales pesados. 48-60. Macla N° 10. Revista de la sociedad española de mineralogía. ISSN: 1885-7264.
- Galster, H. (2000): Techniques of measurement, electrode processes and electrode treatment. In: Schüring J, Schultz HD, Fischer WR, Böttcher J, Duijnsveld WHM (eds) Redox: fundamentals, processes and applications. Springer, Berlin, pp 13–23.
- Gamiz, B. (2010): Organoclays as Soil Amendments to Increase the Efficacy and Reduce the Environmental Impact of the Herbicide Fluometuron in Agricultural Soils. J. Agric. Food Chem., 58 (13), 7893-7901.
- García, I., Dorransoro, C. (2005): Contaminación por metales pesados. En: Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola.
- Gastelum, A., Marquez, J., Trujillo, F., Duwig, C., Prado, B., Gamage, P. and Delmas, P. (2009): 3D porous media liquid-solid interaction simulation using sph modeling and tomographic images. IAPR Conference on Machine Vision Applications 2009. Yokohama, Japan. 20 – 22 May 2009. Pag.328-331.
- Glass, R.J., Oosting, G.H. and Steenhuis, T.S. (1989): Preferential solute transport in layered homogeneous sands as a consequence of wetting front instability. J. Hydrol., 110: 87-105.
- Goldberg, S. (1986): Chemical modeling of arsenate adsorption on aluminium and iron oxide minerals. Soil Sci Am J 50: 1154-1157.
- González Guadarrama, M. (2014). Evaluación de metales pesados en sedimentos del Lago de Chapala. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México.
- González-León, C., Valencia, V., López, M.B.H., Valencia-Moreno, M., T, C. (2010): The Arizpe sub-basin sedimentary and magnetic evolution of Basin and Range in north-central Sonora. México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Volumen 27, pp. 292-312.
- Gu, B. (1994): Adsorption and desorption of natural organic matter on iron oxide: mechanisms and models. En: Environmental Science & Technology, 28 (1), 38-46.
- Gustafsson, J.P. (2010): Visual MINTEQ. A free equilibrium speciation model. Beta version now released (on-line).

- Gutierrez-Ruiz, M.E., Romero, F, M. (2015): Valoración ambiental de la Cuenca del Río Sonora, asociado al derrame del 06 de Agosto del 2014 de Buena Vista del Cobre. AIMMGM, XXXI Convención Internacional de Minería, Acapulco Gro, México, Octubre 7-10. 604-616p.
- Guzmán Herrera, S.V. (2015): Evaluación del proceso de movilidad de arsénico y metales pesados en un sistema jal-suelo y su acumulación en las especies Nicotiana Glauca y Opuntia Lasiacantha. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hamdi, A.M. and Bennour, (2012): Influence of pH and Ionic Strength on the Adsorption of Copper and Zinc in Bentonite Clay. Chem Sci Trans., 1(2), 371-381.
- Hani H. (1990): The analysis of inorganic and organic pollutants in soil with special regard to their bioavailability. In. J. Environ. Anal. Chem. 39(2):197– 208.
- Henry, C.D. (1975): Geology and Geochronology of the granitic batholithic complex, Sinaloa México: Unpublished PhD Thesis. University of Texas in Austin, 159 p.
- Heredia, O.S y Cirelli, A. (2008): Importancia de las propiedades de los suelos en la determinación del riesgo de contaminación de acuíferos. CI. SUELO (ARGENTINA) 26(2): 131-140, 2008.
- Herrera-Salazar, J.E., y Vega-Granillo, E.L., (2005): Modelo conceptual y balance hidrológico superficial de la parte alta de la Subcuenca Río Sonora-Banámichi. in Rodríguez-R., R.; López-D., R; y Castro-L., J.: Actas INAGEQ, v. 11, núm. 1, p. 14.
- Herrmann C. y Zappettini E.O. (2014): Recursos Minerales, Minería y Medio Ambiente. Serie Publicaciones N° 173 . Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, 68p. Buenos Aires.
- Holmstrom H. and Ohlander B. (2001). Layers rich in Fe and Mn oxihydroxides formed at the tailing pond water interface a possible trap for trace metals in flooded mine tailing. J. Geochem. Exploration 74:189.
- Holt, A. (2009): Estudio estadístico para la validación del muestreo geoquímico en perforaciones de producción, mina aurífera Arenal, minas de Corrales, Rivera, Uruguay. 22-23.
- Hudson, K.A., Schell, C., Macklin, M.G. (1999): Mineralogy and geochemistry of alluvium contaminated by metal mining in the Rio Tinto area, southwest Spain. Applied Geochemistry 14: 1015-1030 pp.
- Huffman, E. (1977): Performance of a new automatic carbon dioxide coulometer. Microchemical Journal 22(4):567-573.
- INEGI. (1993): Hermosillo, estado de Sonora. Cuaderno estadístico municipal. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI). México.
- INEGI. (2003): Estudio hidrológico del estado de Sonora. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI). México.
- Instituto de Geología, (2016): Informe diagnóstico de la situación ambiental asociada al derrame de la solución ácida ferrocuprífera de Buenavista del Cobre, Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- ITSON, (2005): Proyecto: CEA-ED-PR-EST-05-013. Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del río Sonora, Sonora: Comisión Estatal del Agua. Gobierno de Sonora.
- Jambor, J.L., Blowes, D.W. (1994): Shot course Handbook in Environmental Geochemistry of sulfide mine wastes, mineralogical association of Canada. Chapter 3, 4, 9 and 10, pp. 58-292.
- Jambor, J.L., Blowes, D.W. (1998): Theory and applications of mineralogy in environmental studies of sulfide-bearing mine wastes. Cabri, L.J., Vaughan, D.J. (eds): Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy. Mineralogical Association of Canada, vol. 27, pp. 367–401.
- Jaques, A.C.; García y B.C.; DeJong, K.A. ; Grajales, N.M.; López-M. and Layer, P.W. (1993): Age Constraints for Cretaceous-Early Tertiary thrusting and folding in northwest Sonora. III 13 simposio de la geología de Sonora y áreas adyacentes. Inst. de Geol. UNI-SON. p. 61-63.
- Jean-Soro, L., Bordas, F., Bollinger, J-C. (2012): Column leaching of chromium and nickel from a contaminated soil using EDTA and citric acid. Environmental Pollution; 164:175-181.
- Johnson R.H., Blowes, D.W., Robertson, W.D., and Jambor, J.L. (2000): The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailings impoundment, Sudbury, Ontario: J. Contam. Hydrol. 41 (1–2), 49–80.
- Jung, M.C. (2001): Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au–Ag mine, Korea: Appl. Geochem. 16 (11–12), 1369–1375.

- Kabata-Pendias, A. y H. Pendias. (1992): Trace elements in soils and plants. 2nd ed. CRC Press. Boca Ratón, pp. 23-88, 120-125, 187-198 y 271-274.
- Kabata-Pendias, A. (1995): Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils.
- Kabata-Pendias A. Pendias H. (2001): Trace elements in soils and plants. 4a ed., CRC Press, Inc., Boca Ratón, Florida.
- Kabata-Pendias, A. (2011): Trace Elements in Soils and Plants. (4a Ed.). CRC Press, Boca Raton, FL. United States.
- Kaiser, K.; Guggenberger, G. (2003): Mineral surfaces and soil organic matter. Eur. J. Soil Sci. 54: 219-236.
- Kanugo, S.B. J. (2000): Environ. Qual. 29, 188.
- Karathanasis, A.D., Harris, W.G., (1994): Quantitative thermal analysis of soil materials. In: Amonette, J.E., Zelazny, L.W. (Eds.), Quantitative Methods in Soil Mineralogy. Soil Science Society of America, Madison WI, pp. 360–411.
- Karathanasis, A.D. (2001): Mineral controls in colloid mediated transport of metals in sub surface environments. In: Proc. 6th International conference on biogeochemistry of trace elements Guelph.
- Keller, T., Lamandé, M., Peth, S., Berli, M., Delenne, J.Y., Baumgarten, W., Rabbel, W., Radjaï, F., Rajchenbach, J., Selvadurai, A.P.S., Or, D. (2013): An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. Soil Tillage Res. 128, 61-80.
- Kirpichtchikova, T.A., Manceau, A., Spadini, L., Panfili, F., Marcus M.A. and Jacquet, T. (2006): Speciation and solubility of heavy metals in contaminated soil using X-ray microfluorescence, EXAFS spectroscopy, chemical extraction, and thermodynamic modeling. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 70, no. 9, pp. 2163–2190.
- Kölling, M., (2000): Comparison of Different Methods for Redox Potential Determination in Natural Waters. Redox: Fundamentals, Processes and Applications (J. Schüring, H.D. Schulz, W.R. Fischer, J. Böttcher, & W.H.M. Duijnsveld, editors). Springer, Berlin, Germany.
- Konica Minolta. (2007): Precise color communication. Color control from perception to instrumentation.
- Kowalkowski, T., Tutu, H., Cozmuta, L.M., Sprynskyy, M., Cukrowska, E.M and Buszewski, B. (2010): Assessment of mobility of heavy metals in two soil types by use of column leaching experiments and chemometric evaluation of elution curves. Int. J. of Environmental Analytical Chemistry; 90: 10:797-811.
- Lamy, I., Bourgeois, S. and Bermond, A. (1993): Soil cadmium mobility as a consequence of sewage sludge disposal. J. Environ. Qual., 22, 731-737.
- Langmuir, D.(1997): Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice Hall, 600 pp.
- Levy, K.H. Curtis, W.H. Casey and P.A. Rock. (1997): A comparison of metal attenuation in mine residue and overburden material from an abandoned copper mine. Appl. Geochem. 12, 203.
- Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente (LGEEPA). Última reforma publicada DOF 04-06-2012.
- Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR). Última reforma publicada DOF 22-05-2006.
- Li, X., Lin, C.-L., Miller, J.D., Johnson, W.P. (2006): Pore-scale observation of microsphere deposition at grain-to-grain contacts over assemblage-scale porous media domains using X-ray microtomography. Environ. Sci. Technol. 40(12), 3762-3768.
- Lide, D.R., y Frederikse, H.P.R. (1993): CRC Handbook of chemistry and physics. Boca Raton, Florida, CRC Press.
- Lide, R, D. (1997): Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press. 78th edition. Boca Raton, FL, 2512 pp.
- Lin, Z. (1997): Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden. Sci. Total Environ. 198, 13–31.
- Lindsay, W.L. (1979): Chemical equilibria in soils. Ed. John Wiley and Sons. N.Y. ISBN: 0-471-02704-9.
- Lindsay, W.L. (1991): Micronutrients in agriculture. J.J. Mortvedt (Ed.). Soil Science Society of America. Madison. Pp.89-112.

- Loué, L. (1988): Los microelementos en la agricultura. Mundi-Prensa. España.
- Macías, F. (2000): Proceso de contaminación y recuperación de los suelos. Guías Puntex. Mantenimiento. Sumario. Nº 135-España.
- Martínez Rodríguez, L.A. (2002): Estudio de contaminación del río La Laja, Jalisco. Tesis de grado. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Cs. Biológicas y Agropecuarias. Guadalajara, Jalisco.
- Martín-Ortiz, D., Hernández-Apaolaza, L. and Gárate, A. (2010): Wheat (Triticum aestivum L.) Response to a Zinc Fertilizer Applied as Zinc Lignosulfonate Adhered to a NPK Fertilizer. J. Agric. Food Chem., 58 (13), 7886-7892.
- McLaren, R.G., Lawson, D. W. and Swiff, R.S. (1986): Sorption and desorption of cobalt by soils and soil components. Journal of Soil Science. 37: 413-426.
- McLean, J. E. and Bledsoe, B.E. (1992): Behavior of Metals in Soils. EPA Groundwater issue. Technology Innovation Office of Solid Waste and Emergency Response, US EPA, Washington, DC.
- Meinert, L.D. (1982): Skarn, manto, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea mining district, Sonora, Mexico. Economic Geology, 77, 919-949.
- Molina, J., Bea, F., Montero, P., Scarrow, J. (2015): Cuaderno de prácticas de geoquímica. Universidad de Granada, 41-42.
- Moncur, M.C., Ptacek, C.J., Blowes, D.W. and Jambor J.L. (2004): Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment: Appl. Geochem. 20, 639–659.
- Muller G. (1979): Heavy metals in the sediment of the Rhine – Changes seity. 1971. Umsch Wiss Tech 79: 778-783.
- NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites Permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial, México.
- NOM-127-SSA-2000. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que se debe someterse el agua para su potabilización.
- Nordberg, M., and Nordberg, U.F. (2002): Cadmium, in Sarkar, B., ed., Heavy Metals in the Environment, Marcel Dekker, Inc.
- Novotny, V. (1995): Diffuse sources of pollution by toxic metals and impact in receiving waters. In: Salomons, W., Forstner, U. and Mader, P. Heavy Metals. Problems and solutions. Springer. Germany. pp. 33-51.
- OCDE, (2000): Guideline for the testing of chemical, Adsorption-Desorption Using a Batch Equilibrium Method. Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, No. 106, 45 p.
- Ochoa-Landín, Lucas, y Echávarri, Ariel. (1978): Observaciones preliminares sobre la secuencia de las intrusiones hipabisales en el tajo Colorado-Veta del distrito minero de Cananea: Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v. 1, p. 57–60
- Ochoa-Landín, Lucas, y Navarro-Mayer, A. (1980): Historia geológica y tectónica del distrito de Cananea y alteración y mineralización de los tajos Colorado-Veta y Kino. Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v. 2, núm. 2, p. 150–184.
- Page A.L, Bingham F.T, Chang A.C. (1981): Cadmium in terrestrial plants. In: Lepp NW (ed) Effect of heavy metal pollution on plants, vol 1. Effects of trace metals on plant function. Applied Science, London, p77.
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V., Toro, L. (2004): Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: pollution detection and affinity series. Environmental Pollution, 132, pp. 189-201.
- Pérez, L. (2014): Modelado geo-químico en la gestión de polvo de acería. Tesis de licenciatura. Escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación universidad de cantabria.
- Petrovic, M., Kastelan-Makan, M. and Horvart, J. (1999): Interactive sorption of metal ions and humic acids on to mineral particles. Water, Air and Soil Pollution. 111 (1-4); 41-56.
- Polo Gómez, M.J., García Baquero, E. y Giráldez Cervera, J.V. (2003): Lixiviación de metales desde puntos con contaminación residual en la cuenca del guadiamar. Temas de Investigación en Zona no Saturada. Eds. J. J. López, M. Quemada.

- Porsch, K. (2010): In-Situ Magnetic Susceptibility Measurements As a Tool to Follow Geomicrobiological Transformation of Fe Minerals. Environmental Science & Technology, 44 (10), 3846-3852.
- Porta, C., López-Acevedo, R. y Roquero C. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-prensa, México.
- Prado, B., Duwig, C., Etchevers, J. and Gaudet, J.P. (2011): Nitrate fate in a Mexican Andosol: is it affected by preferential flow?, Agricultural Water Management, 98, 1441-1450.
- Prado, B., Gastelum, A., Huerta, E., Duwig, C., Zamora, O., Delmas, P. Casasola, D., Márquez, J. (2016): 2,4-D mobility in clay soils: impact of macrofauna abundance on soil porosity. Geoderma, 279, 87 – 96.
- Qu, X., He, P.-J., Shao, L.-M., Lee, D.-J. (2008): Heavy metals mobility in full-scale bioreactor landfill: Initial stage. Chemosphere, 70, 769–777.
- Rab, M.A., Haling, R.E., Aarons, S.R., Hannah, M., Young, I.M., Gibson, D., (2014): Evaluation of X-Ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. Geoderma 213, 460-470.
- Radulovich, R., Solorzano, E. and Sollins, P. (1989): Soil macropore size distribution from water break-through curves. Soil Sci. Soc. Am. J., 53: 556-559.
- Ramos, R. (2006): Contaminación por metales pesados, salinidad y sodicidad en suelos de chinampa de Xochimilco, San Luis Tlaxiátemanco, Tlahuac y Mixquic D.F. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ramos Pérez, D. (2017): Evaluación de la contaminación residual y del riesgo ambiental en suelos y sedimentos afectados en la cuenca del río Sonora. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Red Académica y de investigación nacional, (2002): Consultado en línea el día 5 de Mayo del 2017. <https://www.rediris.es/list/info/zonanosaturada.html>
- Romero, F.M., Gutiérrez, M. (2010): Comparative hazard study of mine tailings in two mining areas in Southern and Central Mexico. Bol. Soc. Geol. Mex vol.62 no.1.
- Romero, F. M., Núñez, A., Gutiérrez, M., Armienta, M., Cenicerós, A. (2011): Evaluation of the potential of indigenous calcareous shale for neutralization and removal of arsenic and heavy metals from acid mine drainage in the Taxco mining area. Archives of Environmental Contamination and Toxicology.
- Romero, F.M. "Procesos geoquímicos". Geoquímica ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. 19 de Noviembre de 2012.
- Rosas Rodríguez, H. (2001): Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Ruiz, B. (2013). Estudio del comportamiento ambiental de residuos metálicos estabilizados mediante un sistema integral de ensayos de lixiviación. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria.
- SAGARPA (2005). Programa estatal de mediano plazo: Aprovechamiento sustentable del agua 2004-2009. Hermosillo, Sonora. P. 40.
- Salomons, W. (1995): Long-term strategies for handling contaminated sites and large scale areas. In: Salomons, W. and Stigliani, W.M. Biogeochemistry of pollutants in soil and sediments. Springer. Berlin. Pp 1-30.
- Sánchez Bascones, M.I. (2003): Determinación de metales pesados en suelos de Mediana del Campo (Valladolid): contenidos extraíbles, niveles fondo y de referencia. Tesis de doctorado. Universidad de Valladolid.
- Sánchez-Marañón, M., Soriano, M., Melgosa, M., Delgado, G., Delgado, R., (2004): Quantifying the effects of aggregation, particle size and components on the colour of Mediterranean soils. Eur. J. Soil Sci. 55, 551–565.
- Sangiunsa, N., Punrattanasin, P., (2014): Adsorption behavior of heavy metals on various soils: Polish Journal of Environmental Studies, 23(3),853–865.
- Schulten H. R. (1991). Naturwiss. 78, 311.
- Secretaría de Salud, 1995. NOM-127-SSA-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano –límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse para su potabilización". Diario Oficial de la federación, 30 de noviembre 1995.

- Selim, H. M. and Amacher, M. C. (1997): Reactivity and Transport of Heavy Metals in Soils. CRC, Boca Raton.
- SEMARNAT, (1996): NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, 24 de Junio de 1996.
- SEMARNAT, (2007): NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario oficial de la federación, 2 de marzo, 2004.
- SEMARNAT, (2014): Derrame de sulfato de cobre en el río Bacanuchi (afluente del río Sonora). Sonora, Fideicomiso Río Sonora, 2-24.
- SGM, (1995-2000): Valores naturales de fondo en la cuenca del río Sonora.
- Shuman, L. M. (1991): Chemical forms of micronutrients in soils. In J. J. Mortvedt (ed.). Micronutrients in agriculture. Soil Soc. Soc. Amer. Book Series #4. Soil Sci. Soc. Amer., Inc., Madison, WI.
- Siebe, C., Jahn, R., Stahr, K. (2006): Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. 2da edición.
- Silver, L.T. and Anderson, T.H. (1974): Possible leftlateral Early to Middle Mesozoic disruption at the southwestern North América Craton margin. GSA. Abs. with Progr. V. 9. p. 95.
- Singer, D. A., Berger, V.I., Moring, B.C. (2005): Porphyry copper deposits of the world: database, map, and grade and tonnage models. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2005-1060.
- Smith, K. and Huyck, H. (1999): A review of abundance, relative mobility, bioavailability and human toxicity of metals. Society of Economic Geologists, Volumen 6A, pp. 29-70.
- Sollins, P. and Radulovich, R. (1988): Effects of soil physical structure on solute transport in a weathered tropical soil. Soil Sci. Sot. Am. J., 52: 1168-173.
- Soracco, C. G.; Lozano, L. A.; Filgueira, R. E.; Fournier, L. L.; Sarli, G. O. (2010): Funciones de transferencia edafológica adaptadas a suelos de La Plata, Argentina. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 42 (2): 111-115.
- Sposito, G. (1989): The chemistry of soils. Oxford Univ. Press.
- Stevenson F. J. (1992): Humus Chemistry, Genesis, Composition and Reactions. Wiley-Intersc. Publ. New York.
- Stoffers P, Glasby GP, Wilson CJ, Davies KR y Walter P. (1986): Heavy metal pollution in Wellington Harbour. New Zealand Journal of Marine Freshwater Research, 20: 495- 512.
- Stumm, W. y Morgan, J.J. (1996): Aquatic chemistry. 3ª edición. John Wiley & Sons. Nueva York, 1022 p.
- Tandy, S. (2004): Extraction of Heavy Metals from Soils Using Biodegradable Chelating Agents. Environmental Science & Technology, 38 (3), 937944.
- Tindall, J.A. and Vencillb, W.K. (1995): Transport of atrazine, 2,4-D, and dicamba through preferential flowpaths in an unsaturated claypan soil near Centralia, Missouri. Journal of hydrology, Volume 166, issues 1-2: 37-59.
- Trudgill, S.T., Pickles, A.M., Smettem, K.R.J. and Crabtree, R.W. (1983): Soil-water residence time and solute uptake. 1. Dye tracing and rainfall events. J. Hydrol., 60: 257-279.
- Uchimiya, M. (2010): Immobilization of Heavy Metal Ions (CuII, CdII, NiII, and PbII) by Broiler Litter-Derived Biochars in Water and Soil. J. Agric. Food Chem., 58 (9), 5538-5544.
- UNISON (Universidad de Sonora). (2005): Estudio geohidrológico de las Subcuencas de los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri-La Victoria y Cuenca Bacoachito: Hermosillo, Comisión Estatal del Agua, Informe final, 11-9 p.
- US-EPA. (2007): Method 6200 Field Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry for the determination of elemental concentration in soils and sediments. S.I: US Environmental Protection Agency.
- USDA, 2017. Natural Resources Conservation Service Soils. United States Department of Agriculture. Consultado en línea el 19-Mayo-2017.  
[https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/?cid=nrcs142p2\\_054286](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/?cid=nrcs142p2_054286)
- Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Noguez-Alcántara, B., Ruíz, J., Pérez-Segura, E. (2006): Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su

situación en el contexto mundial. Boletín de la sociedad geológica mexicana volumen conmemorativo del centenario revisión de algunas tipologías de depósitos minerales en México tomo lviii, núm. 1, p. 1-26.

- Van Bochove, E., Beauchemin, S., Thériault, G. (2002) : Continuous multiple measurement of soil redox potential using platinum microelectrodes. Soil Science Society of America Journal 66:1813-1820.
- Van Ommen, H.C., van Genuchten, M.Th., van der Molen, W.H., Disjksma, R. and Hulshof, J. (1989): Experimental and theoretical analysis of solute transport from a diffuse source of pollution. J. Hydrol., 105: 225-251.
- Vega-Granillo, E.L., Cirett-Galán, S., De la Parra-Velasco, M.L., y Zavala Juárez, R. (2011): Hidrogeología de Sonora, México, in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 8, p. 267–298, 12 figs., 2 tablas.
- Volke-Sepúlveda, T., Velasco-Trejo, J.A., De la Rosa-Pérez, D.A. (2005): Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. INE-SEMARNAT, México, pp. 31-37.
- Weber, J.B. (1991): Applied Plant Science.
- WHO. (1977): Lead. Environmental Health Criteria 3: Gineva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- WHO. (1988): Chromium. Environmental Health Criteria 61: Geneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- WHO. (2001): Arsenic and Arsenic compounds. Environmental Health Criteria 224: Geneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- Wodzicki, W.A. (2001): The Evolution of magmatism and mineralization in the Cananea district, Sonora, México. Society of Economic Geologists, Special Publication 8, 243-263.
- Wood, J.M. (1989): Transport, bioaccumulation and toxicity of elements in microorganisms under environmental stress. In Proc Int Conf Heavy Metals in the Environment, Geneve. P. Vernet (ed) CEP Consultants Ltd, Edingurgh, UK 1-12.
- Woodruff, L.G. and Cannon, W.F. (2010): Immediate and Long-Term Fire Effects on Total Mercury in Forests Soils of Northeastern Minnesota. Environmental Science & Technology, 44 (14), 5371-5376.
- Xu, N. and Saiers, J.E. (2010): Temperature and Hydrologic Controls on Dissolved Organic Matter Mobilization and Transport within a Forest Topsoil. En: Environmental Science & Technology, 44 (14), 5423-5429.
- Zhang, M. K., He, Z.L., Calvert, D.V., Stoffella, P.J., Yang, X.E. and Li, Y.C. (2003): Phosphorus and heavy metal attachment and release in sandy soil aggregate fractions. Soil Sci. Soc of Am. 67: 1158-1167.
- Zorrilla, M.F. (2011): Estado del arte sobre la presencia de metales pesados en tejidos y agallas de peces. Tesis de la Universidad autónoma de occidente. Facultad de ciencias básicas. Departamento de ciencias ambientales. Programa de administración del medio ambiente y de los recursos naturales, Santiago de Cali.



## ANEXOS

### ANEXO 1

#### Excavaciones sobre el cauce del arroyo Tinajas y el río Bacanuchi.

Se llevaron a cabo cuatro excavaciones sobre el lecho de los cauces del arroyo Tinajas y del río Bacanuchi para conocer la estratigrafía bajo el lecho del cauce y poder dilucidar la extensión vertical del volumen infiltrado de la solución ácida ferrocuprífera.

Utilizando una retroexcavadora se llevaron a cabo excavaciones sobre el cauce en sitios donde, de acuerdo a indicios de la vegetación y morfología del cauce, existiera la posibilidad de que el derrame de solución ácida hubiese pasado. Las excavaciones consistieron en una zanja transversal al cauce, de aproximadamente 1 m de ancho, longitud variable (entre 3 y 6 m) y entre 2 y 3 m de profundidad.

En cada excavación se definieron dos perfiles: uno cercano al centro del cauce y otro en el borde. En cada uno de estos perfiles se colectaron muestras de sedimento a cada 10 cm de profundidad para su análisis en laboratorio para determinar granulometría, pH, CE, y concentración total de elementos mayores por Fluorescencia de rayos X (FRX).

La descripción general de cada excavación se presenta a continuación:

a) Excavación al sur del represo Tinajas 1.

Esta excavación se ubica sobre el arroyo Tinajas, aproximadamente a 6.7 km aguas abajo del represo Tinajas donde ocurrió el derrame (Figura 143). En este sitio los sedimentos bajo el cauce son gruesos hasta la profundidad total de la excavación de casi 3 m. En toda la profundidad de la excavación se observaron precipitados amarillo-anaranjados, tanto en las arenas como en los clastos grandes y un fuerte olor a ácido sulfúrico.

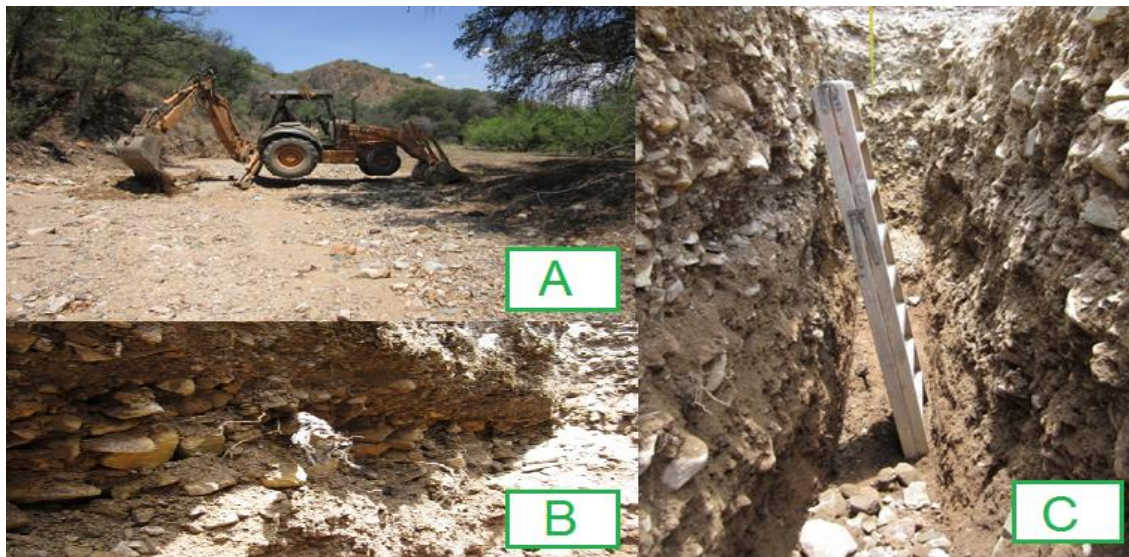


Figura 143. Imagen A. Excavación 6.7 km aguas abajo del represo Tinajas 1. Imagen B. Aspecto general de la excavación. Imagen C. Presencia de precipitados con coloraciones amarillas.

b) Excavación Rancho El Álamo.

Esta excavación se ubica sobre el arroyo Tinajas, en el rancho El Álamo, 14 km aguas abajo del represo Tinajas 1 donde ocurrió el derrame. En este sitio los sedimentos bajo el cauce son gruesos, sin embargo, a diferencia de la excavación anterior, se encontró un estrato de textura media a fina a 2.1 m de profundidad. También se observó un estrato continuo de precipitados amarillos a lo ancho del cauce entre 0.17 y 0.6 m de profundidad (Figura 144).



Figura 144. Excavación en el rancho El Álamo. Se observa una zona con precipitados de coloración amarilla entre 17 y 60 cm de profundidad, la cual se extiende a todo lo ancho del cauce.

c) Excavación Rancho Chilolo.

Esta excavación se ubica sobre el río Bacanuchi, aproximadamente a 24.5 km aguas abajo del represo Tinajas 1 donde ocurrió el derrame y aproximadamente 5.9 km aguas abajo de la confluencia del arroyo Tinajas con el río Bacanuchi. En este sitio se excavaron dos zanjas en el mismo cauce (A y B) a una distancia de aproximadamente 50 m entre ellas. En la excavación A se encontraron precipitados a aproximadamente 50 cm de profundidad (Figura 145 A), los cuales fueron erosionados después de que ocurrió el evento que originó los precipitados, dicha erosión es evidente por el contacto inclinado con los sedimentos más recientes, los estratos afectados por precipitados son subyacentes por un estrato arcilloso. Adicionalmente, en esta excavación se observó el control que la litología y las propiedades hidrogeológicas de cada estrato ejercen sobre la migración del agua y el transporte de solutos. Cuando los estratos tienen granulometría gruesa (presumiblemente alta conductividad hidráulica) el flujo tiende a ser vertical, tal como lo evidencia la presencia de precipitados. Al encontrar estratos de textura más fina, el movimiento de la solución es restringido en la vertical y tiende a ser lateral sobre los estratos de mayor conductividad hidráulica, todo esto inferido por la distribución de precipitados observada en esta excavación.

## ANEXO 1

En la excavación B se encontraron precipitados en la pared del cauce pero no en los sedimentos bajo el cauce (Figura 145 B). En general la litología en la pared del cauce es arcillosa, mientras que en el cauce es predominantemente arena y grava.

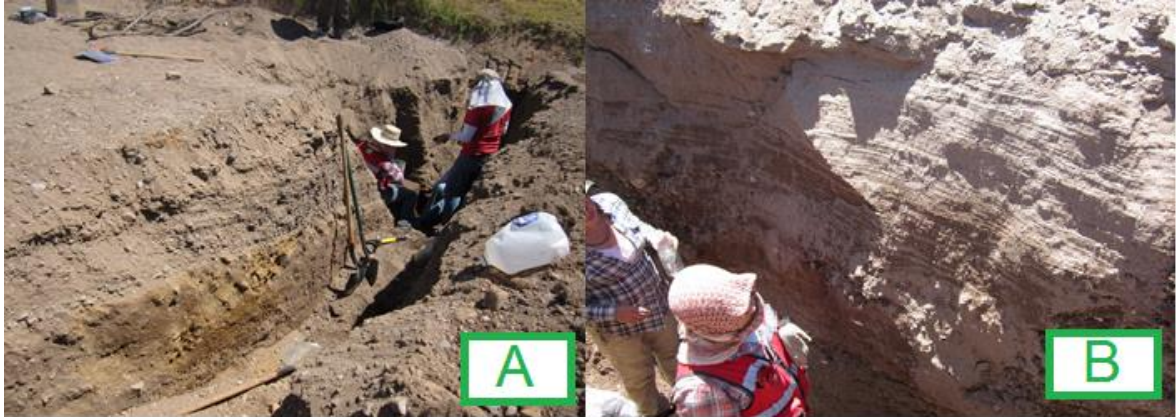


Figura 145. Excavaciones A y B en el rancho Chilolo, 24.5 km aguas abajo del represo Tinajas 1.

### d) Excavación Bacanuchi.

Esta excavación se ubica sobre el río Bacanuchi, aproximadamente a 40 km aguas abajo del represo Tinajas 1 donde ocurrió el derrame y aproximadamente 19.5 km aguas abajo de la confluencia del arroyo Tinajas con el río Bacanuchi. Se trata de la excavación con las capas de sedimento de tamaño de grano más fino. Estos sedimentos finos favorecen el almacenamiento de humedad, además de fungir como una barrera que promueve la acumulación de sales. En la profundidad de 150 cm se presenta una capa de acumulaciones de arcilla y limo.

## ANEXO 2

### Muestreo de columnas inalteradas en campo.

Se colectaron 8 columnas de suelos y sedimentos de aproximadamente 20 x 25 cm de diámetro y largo respectivamente, conservando la estructura natural de la muestra. Para la colecta de las columnas, el primer paso consistió en esculpir monolitos de aproximadamente 14.8 cm de diámetro. Se utilizó una cuchilla redonda de 14.5 cm de diámetro interior para cortar el excedente dejando la superficie de la pared de cada monolito homogénea, se colocó un tubo de acrílico transparente de 15 cm de diámetro en los monolitos quedando un espacio de aproximadamente 0.5 cm entre cada monolito y las paredes del tubo, el cual fue llenado con parafina líquida.

Una vez endurecida la parafina se cortó cada monolito por su base y se trasladó al laboratorio de *Física de suelos y cuarto de experimentación en columnas* del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La parafina tiene como objetivo conservar la estructura del monolito manteniéndolo fijo en el tubo de acero.



Figura 146. Columna de sedimento muestreada en campo y llevada al Instituto de Geología de la UNAM.

## ANEXO 3

### Análisis físicos realizados en muestras superficiales del arroyo Tinajas y el río Bacanuchi.

#### A. Color en húmedo y seco.

Para la determinación del color en seco y en húmedo fue usada la carta de Munsell. En ella se obtienen tres características: la primera característica corresponde al matiz o tinte, la segunda al brillo o pureza que indica la claridad del color (del oscuro al claro) y la tercera representa la intensidad, la cual indica la desviación al gris.

El procedimiento general para la determinación del color consistió de los siguientes pasos.

- Cada muestra se colocó en una placa de porcelana (Figura 147 A).
- El paso siguiente consistió en comparar las muestras con la carta de Munsell y buscar un color parecido de manera general. Más detalladamente se fue buscando la comparación más aproximada con las tablas estándar hasta obtener las tres propiedades del color de cada muestra: matiz, brillo e intensidad cromática.
- De la misma manera como fue descrito en el paso anterior, se tomaron muestras en húmedo (humedecidas previamente con unas gotas de agua) para ser comparadas con las tablas estándar y con la variación en los resultados obtenidos en las muestras secas (Figura 147 B).

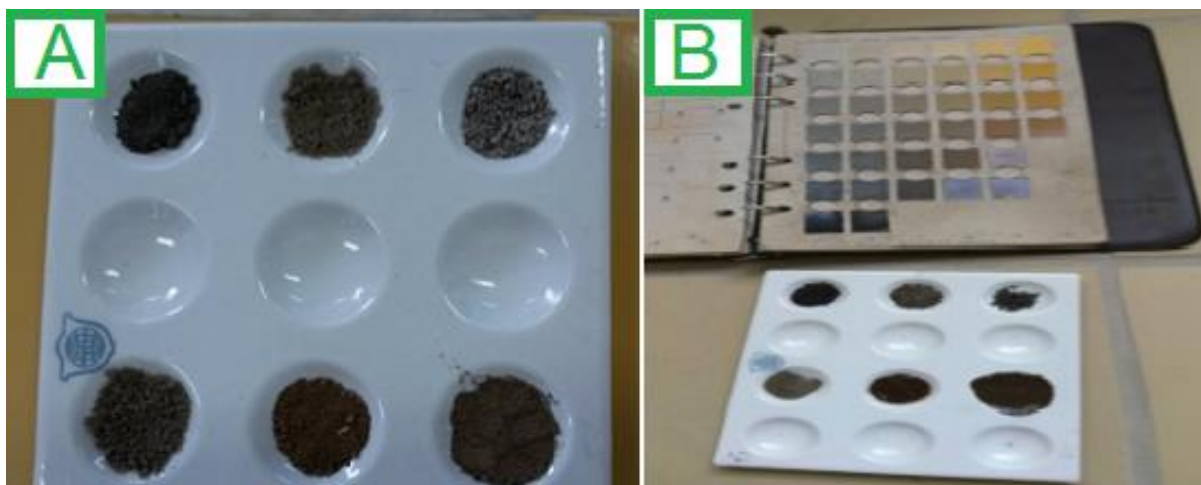


Figura 147. Imagen A. Determinación del color en seco. Imagen B. Determinación del color en húmedo comparando con la carta de Munsell.

## B. Textura.

La composición mecánica de un suelo; es decir la distribución de los tamaños de las partículas que lo constituyen se denomina textura. La textura indica la proporción de partículas fundamentales en el sitio: arcillas, limos y arenas.

Se utilizó el método del hidrómetro de Bouyoucos, el cual es una de las formas más rápidas para analizar el tamaño de las partículas de un suelo o sedimento. El método del hidrómetro implica dispersar las partículas de suelo con una sustancia tal como hexametáfosfato de sodio y después agitar la solución. La cantidad de arena, limo y arcilla en la muestra es determinada, después de la dispersión, por un hidrómetro, que mide las partículas en suspensión. La proporción de cada tipo de partícula es determinada utilizando la ley de Stokes, que determina la cantidad de cada tipo de partícula presente por la velocidad a la que cada tipo de ellas cae fuera de suspensión, en base a su tamaño.

Se pesaron 50g de suelo en un vaso de un agitador eléctrico (Figura 148 A), adicionando 250mL de agua destilada y 100mL de HMF (hexametáfosfato de sodio), se introdujo un blanco en las mediciones. La mezcla se agitó durante 5 minutos, transfiriendo la suspensión a una probeta de 1L (Figura 148 B) y adicionando agua destilada hasta la marca, procurando limpiar el vaso del agitador para no perder muestra.

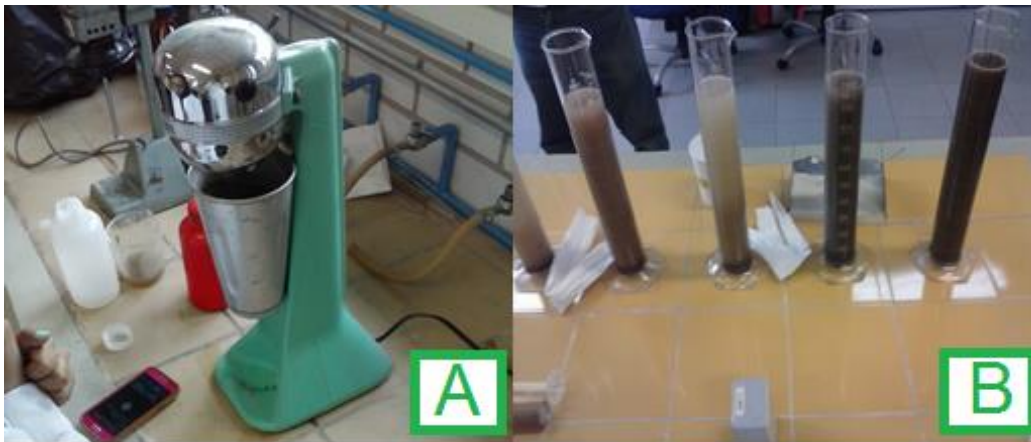


Figura 148. Imagen A. Agitador eléctrico. Imagen B. Suspensiones de las muestras.

Una vez que las suspensiones estuvieran en equilibrio, se introdujo un agitador manual a cada probeta y se mezclaron vigorosamente las suspensiones durante 1 minuto, sujetando las probetas de la parte baja para prevenir su caída. Se aseguró que las arenas de la parte inferior de las probetas se movieran al agitar la suspensión. Al término de la agitación se introdujo un hidrómetro en cada suspensión. Se repitió la medición con el hidrómetro exactamente después de 120 minutos, esta lectura corresponde a la fracción arcillosa.

### ANEXO 3

Se calculó la fracción arcillosa determinando la concentración del suelo en suspensión en g/L mediante la siguiente fórmula.

$$C = R - R_L \rightarrow \text{(Ecuación 15).}$$

Dónde R es la lectura del hidrómetro no corregida en g/L y  $R_L$  es la lectura del hidrómetro de la probeta que se usó como blanco.

Finalmente, para determinar el porcentaje (P) como la suma de los intervalos de tiempo, se usó la siguiente ecuación:

$$P = \left( \frac{C}{C_0} \right) * 100 \rightarrow \text{(Ecuación 16).}$$

Dónde  $C_0$  = Peso seco a 105° C de la muestra.

Después de haber tomado la lectura a las muestras, éstas se pasaron por un tamiz de malla 230 de 63  $\mu\text{m}$  de abertura, en la que, en la parte superior del tamiz se deposita la fracción arena. El material (limos y arcilla) que pasó a través del tamiz es descartado y colocado en una cubeta. La fracción arena es lavada con agua de la llave, y depositada en una cápsula de porcelana y secada a 105°C, después es colocada en un desecador y pesada para su cuantificación. Los limos son calculados de la siguiente manera:

$$\text{Limos} = 100 - (\text{arcilla} + \text{arenas}) \rightarrow \text{(Ecuación 17).}$$

Obtenidas las tres fracciones del suelo: arenas, limos y arcillas, se utiliza el triángulo de texturas donde se puede realizar la clasificación textural con los porcentajes obtenidos.

### C. Conductividad hidráulica.

Para la realización de este análisis se usaron los siguientes materiales:

- Cilindros de acero inoxidable
- Soporte para equipo de conductividad hidráulica
- Cilindros de plástico con entrada y salida de agua
- Embudos Buchner de plástico
- Papel filtro del No. 5
- Charolas de plástico
- Probetas graduadas de 100 mL.

### ANEXO 3

---

El procedimiento para determinar la conductividad hidráulica en las muestras se señala a continuación:

1. Se tomaron muestra inalterada de los suelos y sedimentos, utilizando los cilindros de acero inoxidable.
2. Se colocó un cilindro de plástico en la parte superior del cilindro de acero y en la parte inferior de éste, se colocó dentro de la parte superior de un embudo Buchner. Se puso una hoja de papel filtro en la parte inferior del cilindro de acero, sujeta por una liga, para detener la muestra.
3. Se llevó el conjunto de cilindros a una charola de plástico para saturar por capilaridad.
4. Se agregó poco a poco agua a la bandeja para humedecer la muestra. Posteriormente, se agregó suficiente agua y se dejó transcurrir 12 horas para una completa saturación. Se notó que las muestras estaban saturadas cuando la superficie se observó brillante.
5. Una vez saturado el suelo, se colocó el conjunto de cilindros en el soporte de medición. Por debajo se colocó una probeta graduada de 50 mL y la parte inferior del embudo Buchner (Figura 149).
6. Se conectó la manguera de hule que venía de la llave de agua de corriente al tubo de entrada del cilindro de plástico. Y se conectó otra manguera de hule del mismo diámetro en el tubo de salida de agua del mismo cilindro, después, se abrió la llave de agua lentamente.
7. Cuando el nivel de agua se estableció, se colectó el agua que pasa por la columna en la probeta de 100 mL, registrando el tiempo en que inicia el paso de agua a la probeta.
8. Se esperó a coleccionar los 100 mL de agua. Se registró el volumen exacto y el tiempo requerido para ello a 20, 40, 60, 80 y 100 mL.
9. Se cerró la llave de agua, se desconectaron las mangueras y se desocupó el material.

Durante todo el proceso se tomaron precauciones para que la superficie superior e inferior del cilindro no se alterara, ya que en muestras con poca estabilidad estructural, dichas superficies se sellan con gran facilidad alterando los resultados.





Figura 149. Análisis de conductividad hidráulica en muestras de suelo y sedimento.

#### D. Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente se utilizó el método de la probeta (Figura 150). El método de la probeta utiliza la muestra seca al aire, molida y tamizada con malla de 2 mm, posteriormente se coloca una masa de suelo/sedimento conocida en una probeta de 100 cm<sup>3</sup> y luego de una serie de golpes se vuelve a pesar. Todas estas determinaciones corrigen la masa del suelo/sedimento según la humedad de la muestra.



Figura 150. Método de la probeta.

Para determinar la masa seca de todas las muestras se pesó aproximadamente 1g de cada una y se dejó secar en una estufa a 105°C hasta que el peso se mantuviera constante (aproximadamente 5 días después de meter las muestras al horno), con esto se obtuvo la relación del suelo/sedimento seco. Los cálculos para obtener la densidad aparente se pueden observar en la siguiente ecuación.

$$\text{Densidad aparente } \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{\text{Suelo húmedo (g)} * \text{W S seco (g)}}{\text{W S húmedo (g)} * \text{Volumen (cm}^3)} \rightarrow \text{(Ecuación 18).}$$

Dónde: W S seco: Peso del suelo/sedimento seco en gramos

W S húmedo: Peso del suelo/sedimento húmedo en gramos

### E. Densidad real y porosidad.

La determinación más común para la densidad real de los suelos utiliza el método del picnómetro o matraz volumétrico (Figura 151). Un picnómetro es un pequeño recipiente de vidrio con tapa. Esta tapa presenta un capilar que sirve para desalojar el exceso de agua. Algunas veces, los picnómetros presentan un termómetro en la tapa como parte integral y, en el cual, el mercurio siempre está en contacto con el agua del matraz.

Para la determinación de la densidad real en las muestras superficiales de suelos y sedimentos muestreados de la parte alta de la cuenca del río Sonora, se pesaron 9 picnómetros limpios y secos (se hizo el método por duplicado, más un blanco). Posteriormente, se llenaron los picnómetros con agua destilada, pesando cada uno de ellos dos veces hasta obtener un promedio de pesos. Finalmente, se adicionaron 2.5 gramos de cada muestra a los 9 picnómetros, obteniendo un peso final del picnómetro con aire más suelo/sedimento y otro del picnómetro con agua más suelo/sedimento.

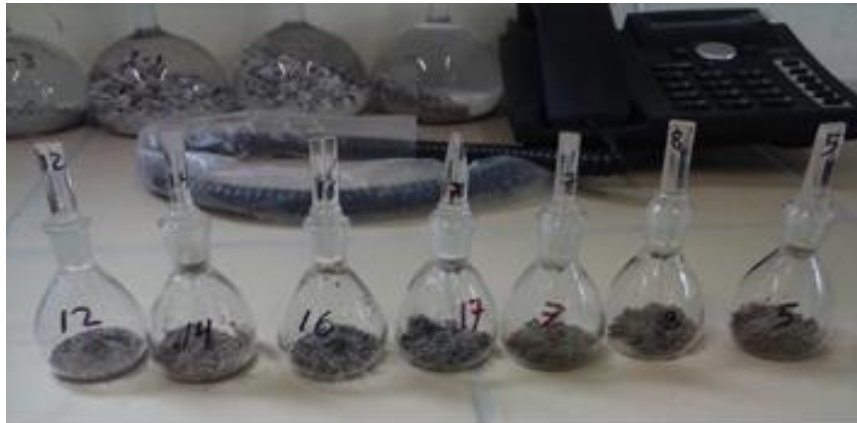


Figura 151. Método del picnómetro.

### ANEXO 3

Para el cálculo de la densidad real se utilizó la siguiente fórmula (tomado del Manual de Laboratorio de Física de Suelos; Flores Delgadillo y Alcalá Martínez, 2010):

$$\rho_p \text{ (Mgm}^{-3}\text{)} = \rho_w \text{ (Ws - Wa)} / \text{[(Ws-Wa) - (Wsw - Ww)]} \rightarrow \text{(Ecuación 19).}$$

Donde:

$\rho_w$  = Densidad del agua en gramos por centímetro cúbico a la temperatura observada

Ws = Peso del picnómetro con la muestra corregida a 105°C

Wa = Peso del picnómetro con aire

Wsw = Peso del picnómetro llenado con suelo/sedimento y agua

Ww = Peso del picnómetro llenado con agua a la temperatura observada

Una vez determinada la densidad aparente y la densidad real de las muestras fue posible conocer su porosidad, recordando que el espacio poroso de un material es la parte del mismo que en su estado natural está ocupado por aire y/o agua. El volumen de este espacio poroso depende mucho de la disposición de las partículas sólidas.

La porosidad se obtuvo haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\text{Porosidad (\%)} = (1 - (d_a / d_r)) * 100 \rightarrow \text{(Ecuación 20).}$$

Dónde:  $d_a$ : Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

$d_r$ : Densidad real (Mg/m<sup>3</sup>).

### F. Superficie específica (Área superficial específica).

La superficie específica es una propiedad de los sólidos que se define como la relación entre el área superficial expuesta y la masa del sólido (m<sup>2</sup>/g). Esta propiedad varía con la distribución del tamaño de las partículas inorgánicas, la composición mineralógica y con el contenido de los componentes orgánicos. Su estimación es importante porque influye de manera importante en las propiedades físico-químicas del suelo (Di Ciocco et al., 2014; Soracco et al., 2010) entre ellas la sorción de compuestos. El método más aceptado para la determinación de la superficie específica de un sólido, se basa en la interpretación de las isotermas de adsorción de N<sub>2</sub> a bajas temperaturas (78 K) mediante el modelo de Brunauer-Emmett - Teller (BET) (Carter et al., 1986; Kaiser, 2003).

Para este trabajo se determinó el área superficial específica mediante el método Brunauer-Emmett-Teller (BET) en un absorciómetro Quantachrome Autosorb 1 en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México.

## ANEXO 4

---

### **Protocolo para la realización de experimentos de movilidad de elementos potencialmente tóxicos en columnas inalteradas de suelo y sedimento.**

#### **A) Montaje de las columnas.**

Las columnas muestreadas en campo fueron desempacadas, cuidando siempre mantenerlas en posición vertical. Posteriormente se retiró de su superficie la cantidad de suelo o sedimento necesaria para permitir el establecimiento de la lámina de riego (aproximadamente 4 cm); paralelamente se eliminó con un cuchillo el suelo o sedimento excedente en la base de cada columna, cuidando no dejar huecos ni sellar su superficie. Antes de continuar con el montaje de las columnas se registró su peso, altura y diámetro. Posteriormente se preparó la base de plástico en la que se asentaron las columnas; ésta consta de un embudo de teflón, sobre el que se asienta una rejilla de 5mm de apertura de poro del mismo material y un anillo que contiene un empaque y permite la sujeción de la columna a la base. Entre la base y el extremo inferior de las columnas se colocó un filtro de nitrocelulosa con un diámetro de poro de 0.5  $\mu\text{m}$  y enseguida una capa de arena fina, químicamente pura. El filtro cumple la doble función de evitar la pérdida de material en la base de las columnas y definir el tamaño de los coloides en suspensión que se obtuvieron en los lixiviados una vez que las columnas fueron regadas; por su parte, la arena tiene el papel de asegurar un buen contacto entre el suelo/sedimento y la base de la columna. Una vez preparada la base, se asentó cada columna sobre ella y se selló la comisura entre ambas con silicón frío.

#### **B) Instrumentación de las columnas.**

Habiéndose montado cada columna se procedió a instalar sobre sus paredes 5 electrodos para medir el potencial redox y 4 microlisímetros de succión para extraer la solución del suelo durante el riego. Los electrodos y lisímetros se colocaron a diferentes profundidades de cada columna. La instalación de estos dispositivos consistió en perforar con un taladro las paredes de cada columna de acrílico, teniendo cuidado en no alterar la estructura y porosidad naturales. Paralelamente se preparó una mezcla de lodo con el suelo/sedimento retirado en la parte superior de cada columna y agua destilada. Los electrodos y microlisímetros se recubrieron con lodo y posteriormente se introdujeron cuidadosamente por los orificios. Finalmente, los orificios se sellaron con silicón frío para evitar la pérdida de lixiviado durante el riego.

Una vez instrumentadas, las columnas se pesaron nuevamente y fueron regadas con  $\text{CaCl}_2$  0.01 M hasta observar la salida de lixiviado en su base. Este primer riego se realizó con el doble propósito de favorecer el reacomodo de las partículas de suelo/sedimento alrededor de los lisímetros y electrodos, y de verificar que no hubiese fugas en las columnas.

### C) Riego con solución ácida ferrocuprífera.

Un episodio de riego consistió en verter en la parte superior de las columnas un volumen de solución ácida equivalente a un volumen de poro de cada columna, esto con el propósito de lograr que todos los poros del suelo o sedimento fuesen visitados por la solución. Un volumen de poro se estimó multiplicando el volumen de cada columna por su porosidad total. La solución ácida suministrada se dejó pasar por gravedad a través de las columnas y el lixiviado se recuperó en la parte inferior de las columnas, discretizado en tubos de centrifuga de 50 ml.

Durante los riegos se monitorearon los siguientes parámetros:

- Velocidad del flujo de lixiviado a la salida de la columna: Para cada uno de los tubos de lixiviado colectados a lo largo del riego, se registró el tiempo de inicio y término de llenado. El flujo se estimó dividiendo el volumen total de la fracción de lixiviado entre el tiempo que tardó en llenarse.
- Potencial redox: Se midió con un voltímetro a intervalos regulares de tiempo.

Como se mencionó con anterioridad, el volumen de solución aplicada en cada riego está relacionado con las características de cada columna, propiamente con el volumen de poro, en la tabla 84 se pueden observar las dimensiones de cada columna y el volumen de poro usado para el cálculo del volumen aplicado en los experimentos.

**Tabla 84. Dimensiones y volumen de poro en las columnas inalteradas utilizadas en los experimentos de movilidad de elementos potencialmente tóxicos.**

Columna	Altura	Diámetro	Área de la base	Volumen	Volumen de poro
	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
<b>Tinajas</b>	20.5	14.5	165.1	3385.2	1980
<b>El Álamo</b>	21	15.3	183.8	3860.9	2123.5
<b>Rancho Chilolo</b>	22.3	14.2	158.3	3531.6	1765.8
<b>Bacanuchi</b>	21.5	14.5	165.1	3550.3	2197.1

## ANEXO 5

### Determinación de la exactitud y precisión del análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

#### A) Exactitud

Para valorar este parámetro se determinó la concentración de los elementos estudiados en muestras internacionales certificadas: 2710 a Montana Soil y Till 4.

El valor de exactitud fue determinado a través de las siguientes ecuaciones:

$$\%Error = \frac{\text{Valor certificado} - \text{Valor determinado}}{\text{Valor certificado}} \times 100 \rightarrow \text{(Ecuación 21)}.$$

$$\% \text{ Exactitud} = 100 - \% \text{ Error} \rightarrow \text{(Ecuación 22)}.$$

Los resultados de exactitud obtenidos por medio del uso de los materiales de referencia Till-4 y Montana 2710a se muestran a continuación:

**Tabla 85. Exactitud de los análisis con Till-4 como material de referencia. <LD: Debajo del límite de detección instrumental. NA: No Aplica.**

	As	Cd	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	S
<b>Till-4</b>	110.6	<LD	7507.9	36.8	256.4	33807.5	443.8	40.5	32.8	<LD
	94.6	<LD	7625.8	<LD	229.6	33210.1	487.9	45.2	60.6	<LD
	101.6	<LD	7972.4	<LD	251.5	33930.4	409.2	39.9	<LD	<LD
	96.7	<LD	7310.0	<LD	286.2	33807.0	325.8	55.3	57.5	<LD
	97.3	<LD	7373.9	38.2	288.7	33646.7	469.5	46.7	63.2	<LD
	106.6	<LD	9508.4	56.0	202.3	33448.4	424.4	50.7	74.2	<LD
	102.1	<LD	7552.8	69.1	191.2	30988.8	375.5	47.6	66.8	<LD
	103.8	<LD	7722.5	75.3	194.9	31246.7	379.3	46.3	66.6	<LD
	102.1	<LD	7862.8	68.8	199.0	31084.9	369.2	49.1	67.9	<LD
	99.2	<LD	7801.0	68.5	189.6	30834.7	362.9	47.6	60.8	<LD
	104.8	<LD	7966.9	73.9	193.4	31004.8	402.6	46.3	65.0	<LD
	104.1	<LD	7924.8	68.4	186.3	30965.3	384.9	45.6	70.8	<LD
<b>Promedio valor determinado (mg/kg)</b>	102.0	NA	7844.1	46.3	222.4	32331.3	402.9	46.7	57.2	NA
<b>Valor certificado (mg/kg)</b>	111	0	8900	53	237	39700	490	50	70	800
<b>Error (%)</b>	8.1	NA	11.9	12.6	6.1	18.6	17.8	6.5	18.3	NA
<b>Exactitud (%)</b>	91.9	NA	88.1	87.4	93.9	81.4	82.2	93.5	81.7	NA

**ANEXO 5**

**Tabla 86. Exactitud de los análisis con Montana 2710 a como material de referencia. <LD: Debajo del límite de detección instrumental. NA: No Aplica. ND: No Disponible.**

	As	Cd	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	S
<b>Montana 2710 a</b>	1471.9	<LD	8445.8	<LD	3533.5	43192.3	2036.9	5427.1	4326.0	10783.4
	1503.6	<LD	8334.8	<LD	3523.3	43548.2	2010.5	5423.7	4318.0	9013.5
	1564.4	<LD	8328.9	<LD	3543.0	43270.2	1776.4	5282.3	4122.9	8123.1
	1460.5	<LD	7695.2	<LD	3578.2	43001.1	2171.7	5439.5	4294.6	10094.4
	1485.8	<LD	8313.2	<LD	3496.4	44706.9	2134.2	5518.6	4451.7	9106.3
	1664.2	<LD	8204.3	55.1	3039.8	41379.4	1904.7	5366.5	4267.3	2774.1
	1654.8	<LD	10023.3	42.5	3073.8	43305.0	2069.2	5433.8	4336.8	7000.9
	2275.0	<LD	7374.0	65.1	3736.0	51866.1	2393.1	5166.0	5089.7	3109.9
	1632.0	<LD	8230.8	53.8	2993.4	40871.4	1915.6	5323.1	4204.2	2731.9
	1598.4	<LD	8143.1	58.6	2939.3	40130.4	1931.5	5273.8	4086.5	2633.1
	1592.1	<LD	8360.3	50.3	2948.2	40277.6	1890.0	5269.9	4097.3	2531.0
<b>Promedio valor determinado (mg/kg)</b>	1627.5	NA	8314.0	29.6	3309.5	43231.7	2021.3	5356.8	4326.8	6172.9
<b>Valor certificado (mg/kg)</b>	1540.0	12.3	9640.0	23.0	3420.0	43200.0	2140.0	5220.0	4180.0	ND
<b>Error (%)</b>	5.7	NA	13.8	28.6	3.2	0.07	5.5	2.6	3.5	NA
<b>Exactitud (%)</b>	<b>94.3</b>	<b>NA</b>	<b>86.2</b>	<b>71.4</b>	<b>96.8</b>	<b>99.9</b>	<b>94.5</b>	<b>97.4</b>	<b>96.5</b>	<b>NA</b>

Los resultados del cálculo de la exactitud presentan valores que se encuentran dentro de un rango de  $\pm 20$  por ciento, por lo que son aceptables según el método estandarizado USEPA 6200, con excepción del Cd y S para ambos materiales de referencia, donde todas las muestras de referencia leídas se encontraron por debajo del límite de detección (para el caso del cadmio) o bien el valor certificado no está disponible (para el caso del azufre). De igual forma para el cromo, en donde la exactitud es de 71.4 en el material de referencia Montana 2710 a.

**B) Precisión**

Para valorar la precisión de los análisis, al total de las muestras se les determinó la concentración total de elementos por quintuplicado y se calculó el Coeficiente de Variación (CV) a través de la siguiente fórmula:

$$\%CV = \frac{\text{Desviación Estándar}}{\text{Media}} \times 100 \rightarrow (\text{Ecuación 23}).$$

En las siguientes tablas se muestran los resultados para cada columna.

**ANEXO 5**

**Tabla 87. Precisión en los análisis de FRX para la columna de suelo Tinajas.**  
**M: Media de la concentración (mg/kg), SD: Desviación estándar, CV: Coeficiente de Variación (%),**  
**<LD: Por debajo del límite de detección instrumental, NA: No Aplica.**

Muestra	As			Cd			Ca			Cr			Cu		
	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV
Tinajas sin riego (0-2 cm)	21	2	10	<LD	<LD	NA	6604	76	1	52	7	13	168	1	1
Tinajas sin riego (2-4cm)	29	5	18	<LD	<LD	NA	5790	159	3	43	4	9	191	20	10
Tinajas sin riego (4-6 cm)	26	5	18	<LD	<LD	NA	6331	120	2	48	10	21	186	17	9
Tinajas después de 4to riego (0-2 cm)	26	4	14	<LD	<LD	NA	7863	33	0	43	5	11	629	11	2
Tinajas después de 4to riego (2-4 cm)	28	1	4	<LD	<LD	NA	7381	165	2	43	7	16	586	17	3
Tinajas después de 4to riego (4-6 cm)	29	5	17	<LD	<LD	NA	6597	103	2	45	7	16	581	26	4
Muestra	Fe			Mn			Pb			Zn			S		
	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV
Tinajas sin riego (0-2 cm)	35422	371	1	1297	30	2	88	12	13	152	2	1	<LD	<LD	NA
Tinajas sin riego (2-4cm)	31223	248	1	1178	30	3	75	5	6	154	10	7	<LD	<LD	NA
Tinajas sin riego (4-6 cm)	35188	741	2	1106	88	8	80	2	3	148	5	4	<LD	<LD	NA
Tinajas después de 4to riego (0-2 cm)	37589	256	1	1523	39	3	70	1	2	362	3	1	9545	731	8
Tinajas después de 4to riego (2-4 cm)	35327	524	1	1460	85	6	64	1	2	315	4	1	8233	1628	20
Tinajas después de 4to riego (4-6 cm)	34164	211	1	1488	111	7	65	1	2	350	25	7	7324	479	7



**ANEXO 5**

**Tabla 88. Precisión en los análisis de FRX para la columna de sedimento El Álamo. M: Media de la concentración (mg/kg), SD: Desviación estándar, CV: Coeficiente de Variación (%), <LD: Por debajo del límite de detección instrumental, NA: No Aplica.**

Muestra	As			Cd			Ca			Cr			Cu		
	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV
El Álamo sin riego (0-2 cm)	29	5	19	<LD	<LD	NA	16675	140	1	41	0	0	181	8	5
El Álamo sin riego (2-4 cm)	27	1	5	<LD	<LD	NA	17020	847	5	36	4	12	200	8	4
El Álamo sin riego (4-6 cm)	25	4	16	<LD	<LD	NA	16810	280	2	<LD	<LD	NA	187	5	3
El Álamo después del 4to riego (0-2 cm)	28	1	2	<LD	<LD	NA	10245	237	2	39	6	15	315	5	2
El Álamo después del 4to riego (2-4 cm)	22	2	9	<LD	<LD	NA	9865	209	2	46	5	11	306	38	12
El Álamo después del 4to riego (4-6 cm)	23	5	20	<LD	<LD	NA	11544	342	3	30	0	0	308	18	6
Muestra	Fe			Mn			Pb			Zn			S		
	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV
El Álamo sin riego (0-2 cm)	31724	470	1	1194	18	2	89	8	9	163	7	4	<LD	<LD	NA
El Álamo sin riego (2-4 cm)	32062	344	1	1161	22	2	84	12	14	181	6	3	<LD	<LD	NA
El Álamo sin riego (4-6 cm)	31074	262	1	1257	145	12	78	3	4	198	17	8	<LD	<LD	NA
El Álamo después del 4to riego (0-2 cm)	28364	179	1	1073	38	4	77	1	1	208	20	10	4393	542	12
El Álamo después del 4to riego (2-4 cm)	25492	491	2	681	52	8	55	5	9	212	1	1	3986	484	12
El Álamo después del 4to riego (4-6 cm)	27264	108	0	949	63	7	56	3	5	210	21	10	4580	847	18

**ANEXO 5**

**Tabla 89. Precisión en los análisis de FRX para la columna de sedimento Chilolo. M: Media de la concentración (mg/kg), SD: Desviación estándar, CV: Coeficiente de Variación (%), <LD: Por debajo del límite de detección instrumental, NA: No Aplica.**

Muestra	As			Cd			Ca			Cr			Cu		
	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV
Chilolo sin riego (0-2 cm)	17	3	20	<LD	<LD	NA	13521	67	0	43	8	18	70	14	20
Chilolo sin riego (2-4 cm)	23	0	0	<LD	<LD	NA	12961	258	2	33	4	12	61	12	19
Chilolo sin riego (4-6 cm)	23	4	18	<LD	<LD	NA	13742	99	1	53	5	10	57	10	18
Chilolo después del 2do riego (0-2 cm)	17	3	19	<LD	<LD	NA	17212	198	1	48	7	14	218	27	12
Chilolo después del 2do riego (2-4 cm)	24	1	2	<LD	<LD	NA	16187	323	2	50	8	17	237	19	8
Chilolo después del 2do riego (4-6 cm)	17	3	18	<LD	<LD	NA	16040	448	3	36	4	12	228	25	11
Muestra	Fe			Mn			Pb			Zn			S		
	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV
Chilolo sin riego (0-2 cm)	30667	186	1	799	137	17	47	7	15	145	18	12	<LD	<LD	NA
Chilolo sin riego (2-4 cm)	30497	411	1	902	9	1	39	0	1	155	14	9	<LD	<LD	NA
Chilolo sin riego (4-6 cm)	30003	160	1	864	109	13	45	9	20	143	1	1	<LD	<LD	NA
Chilolo después del 2do riego (0-2 cm)	31429	88	0	608	21	4	61	3	6	132	2	1	5124	1010	20
Chilolo después del 2do riego (2-4 cm)	29836	99	0	659	31	5	51	2	4	143	2	1	4811	508	11
Chilolo después del 2do riego (4-6 cm)	30168	68	0	658	7	1	95	7	7	133	1	1	4650	931	20

**ANEXO 5**

**Tabla 90. Precisión en los análisis de FRX para la columna de suelo Bacanuchi. M: Media de la concentración (mg/kg), SD: Desviación estándar, CV: Coeficiente de Variación (%), <LD: Por debajo del límite de detección instrumental, NA: No Aplica.**

Muestra	As			Cd			Ca			Cr			Cu		
	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV
Bacanuchi sin riego (0-2 cm)	23	4	16	<LD	<LD	NA	25689	206	1	41	6	15	104	19	18
Bacanuchi sin riego (2-4 cm)	26	3	12	<LD	<LD	NA	25377	37	0	49	6	11	103	17	16
Bacanuchi sin riego (4-6 cm)	23	4	20	<LD	<LD	NA	26013	79	0	69	13	18	120	13	11
Bacanuchi después del 3er riego (0-2 cm)	26	4	17	<LD	<LD	NA	25533	360	1	41	1	1	812	40	5
Bacanuchi después del 3er riego (2-4 cm)	25	1	4	<LD	<LD	NA	24088	991	4	83	5	6	820	14	2
Bacanuchi después del 3er riego (4-6 cm)	22	3	14	<LD	<LD	NA	24881	213	1	80	3	4	887	23	3
Muestra	Fe			Mn			Pb			Zn			S		
	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV	M	SD	%CV
Bacanuchi sin riego (0-2 cm)	37435	388	1	836	73	9	45	0	1	100	0	0	<LD	<LD	NA
Bacanuchi sin riego (2-4 cm)	34061	531	2	665	70	10	35	5	15	103	17	16	<LD	<LD	NA
Bacanuchi sin riego (4-6 cm)	33783	373	1	748	62	8	44	7	17	98	16	17	<LD	<LD	NA
Bacanuchi después del 3er riego (0-2 cm)	44685	167	0	1099	33	3	38	5	14	218	19	9	19690	93	0
Bacanuchi después del 3er riego (2-4 cm)	44382	158	0	959	13	1	40	5	14	231	23	10	18896	2932	16
Bacanuchi después del 3er riego (4-6 cm)	45982	816	2	885	139	16	49	4	8	218	1	1	18221	1117	6

Tomando en cuenta que el mayor coeficiente de variación fue de 21% en la muestra de la columna Tinajas sin riego (de 4 a 6 cm) para el cromo, prácticamente todas las muestras presentan un CV menor a 20%, por lo que, con base en el método estandarizado USEPA 6200, se considera que la precisión del método es adecuada.

## ANEXO 6

### Resultados químicos de los experimentos en columnas de suelo/sedimento.

Los resultados de la columna de suelo Tinajas para cada riego se pueden ver en las tablas 91-94.

**Tabla 91. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Tinajas durante el primer riego.**

	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			mg/L										
			mS/cm										
<b>Riego 1 columna Tinajas</b>	1	2.57	13.43	2226.04	0.64	2.78	0.73	529.99	1705.53	590.67	0.15	205.20	20811
	2	2.56	13.88	2331.93	0.72	2.89	0.76	565.51	1838.39	622.30	0.17	219.61	24754
	3	2.57	13.98	2409.86	0.77	3.00	0.79	599.66	1977.18	639.43	0.16	227.78	22961
	4	2.56	14.28	2474.52	0.89	3.34	0.90	603.49	2102.91	657.27	0.17	232.54	21474
	5	2.56	14.37	2530.35	0.91	3.31	0.89	636.56	2113.42	674.48	0.17	240.43	24196
	6	2.56	14.30	2620.44	0.97	3.52	0.95	667.40	2315.53	703.53	0.19	254.33	24975
	7	2.57	14.39	2669.71	0.98	3.47	0.94	660.94	2312.27	712.93	0.19	252.89	25494
	8	2.55	14.60	2772.15	0.99	3.53	0.95	679.08	2327.63	738.73	0.20	255.06	22611
	9	2.59	12.43	1809.88	0.45	2.59	0.69	428.28	1185.71	507.99	0.35	184.94	17492
	10	2.58	14.15	2432.74	0.83	3.21	0.86	607.44	1846.28	652.41	0.20	233.84	19740
	11	2.58	14.11	2299.84	0.78	3.16	0.86	576.19	1800.97	620.77	0.19	224.85	23341
	12	3.01	10.75	1142.16	0.15	1.76	0.42	266.34	286.51	356.62	4.02	127.66	21096

**ANEXO 6**

**Tabla 92. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Tinajas durante el segundo riego. <LD: Debajo del límite de detección instrumental.**

Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
		mS/cm	mg/L									
1	3.18	4.44	166.08	<LD	0.30	<LD	22.63	2.66	63.05	0.11	17.62	1987
2	3.20	4.44	171.57	<LD	0.30	<LD	21.52	3.36	67.13	0.10	18.24	2076
3	3.22	4.41	162.65	<LD	0.32	<LD	21.14	3.16	67.10	0.24	18.20	2157
4	3.21	4.33	157.41	<LD	0.31	<LD	21.08	3.00	66.30	0.28	17.49	2358
5	3.25	4.40	154.40	<LD	0.31	<LD	20.44	2.94	62.63	0.20	16.94	2109
6	3.26	4.36	154.40	<LD	0.31	<LD	21.27	2.69	64.60	0.12	17.51	2458
7	3.24	4.37	157.05	<LD	0.31	<LD	21.38	2.89	65.67	0.11	17.70	2007
8	3.24	4.38	159.27	<LD	0.32	<LD	21.80	2.86	67.22	0.11	18.05	2152
9	3.25	4.34	154.79	<LD	0.31	<LD	21.31	2.79	66.14	0.12	17.73	2077
10	3.25	4.37	152.16	<LD	0.30	<LD	20.90	2.65	64.31	0.14	17.29	2568
11	3.27	4.41	144.31	<LD	0.29	<LD	19.93	2.37	61.86	0.12	16.53	2379
12	3.28	4.27	134.12	<LD	0.28	<LD	18.64	2.14	57.24	0.13	15.23	2209
13	3.30	4.16	110.21	<LD	0.22	<LD	15.06	1.71	46.40	0.11	12.13	2197
14	3.30	4.00	150.52	<LD	0.33	<LD	23.32	2.00	72.16	0.13	19.65	2245
15	2.28	4.30	134.48	<LD	0.37	<LD	21.40	1.15	85.85	0.62	22.58	2147
16	3.30	4.65	137.22	<LD	0.33	<LD	21.79	1.30	68.86	0.15	18.38	2207
17	3.27	4.58	137.80	<LD	0.32	<LD	21.53	1.58	67.16	0.11	17.77	2345
18	3.25	4.55	134.68	<LD	0.31	<LD	20.14	1.52	62.87	0.10	16.64	2073
19	3.25	4.46	124.31	<LD	0.28	<LD	19.10	1.50	58.00	0.09	15.37	2158
20	3.25	4.36	122.89	<LD	0.27	<LD	18.80	1.54	55.64	0.09	14.81	2247
21	3.27	4.25	118.20	<LD	0.25	<LD	17.67	1.47	52.15	0.08	13.63	2367
22	3.27	4.29	115.05	<LD	0.24	<LD	17.54	1.44	49.58	0.09	13.21	2224
23	3.28	4.27	112.53	<LD	0.23	<LD	17.07	1.39	49.48	0.10	12.89	2157
24	3.28	4.12	107.05	<LD	0.22	<LD	17.05	1.34	47.67	0.09	12.64	2097
25	3.28	4.11	103.43	<LD	0.21	<LD	15.98	1.25	44.39	0.10	11.92	2457
26	3.32	4.45	81.79	<LD	0.17	<LD	13.02	0.99	34.31	0.09	9.89	2214
27	3.28	3.45	69.31	<LD	0.15	<LD	11.48	0.84	29.65	0.07	8.30	2457
28	3.29	3.42	61.40	<LD	0.13	<LD	10.23	0.76	25.57	0.06	7.38	2157
29	3.29	3.30	55.47	<LD	0.12	<LD	9.61	0.70	23.69	0.07	6.73	2463
30	3.28	3.49	70.40	<LD	0.16	<LD	12.40	0.78	30.89	0.08	8.77	2149
31	3.41	4.53	94.87	<LD	0.31	<LD	15.49	0.65	63.57	0.48	18.04	2462

**Riego 2  
columna  
Tinajas**

**ANEXO 6**

**Tabla 93. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Tinajas durante el tercer riego.**

	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			mS/cm	mg/L									
Riego 3 columna Tinajas	1	2.53	15.43	2446.80	0.39	2.93	0.68	509.13	1263.61	478.81	0.18	155.26	28226
	2	2.51	15.74	2629.03	0.42	3.10	0.73	555.22	1432.90	507.68	0.23	166.49	12258
	3	2.49	16.03	2706.45	0.43	3.22	0.77	578.62	1539.59	511.20	0.23	167.17	28147
	4	2.52	15.24	2450.95	0.36	2.89	0.68	541.88	1323.74	475.61	0.22	155.27	25752
	5	2.46	16.07	2711.44	0.47	3.21	0.77	600.82	1571.69	507.88	0.27	166.94	28331
	6	2.48	15.81	2606.03	0.44	3.03	0.73	560.22	1492.00	496.55	0.26	161.62	27674
	7	2.44	16.22	2720.13	0.44	3.22	0.78	587.09	1599.83	505.96	0.27	173.12	28855
	8	2.48	16.15	2728.10	0.47	3.18	0.77	590.08	1608.57	510.40	0.26	171.45	28625
	9	2.46	15.89	2611.35	0.42	3.11	0.75	562.25	1511.51	496.08	0.28	159.75	28050
	10	2.51	15.54	2481.33	0.42	3.03	0.75	552.52	1375.44	475.97	0.36	157.54	26536
	11	2.57	14.02	2075.73	0.31	2.51	0.58	455.80	976.82	422.76	0.35	138.48	22544
	12	2.69	12.70	1663.98	0.23	2.14	0.47	335.38	601.74	375.77	0.54	112.47	17541

**Tabla 94. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Tinajas durante el cuarto riego.**

	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			mS/cm	mg/L									
Riego 4 columna Tinajas	1	2.53	16.85	2997.10	0.48	3.36	0.77	616.81	1346.81	565.34	0.17	183.61	31742
	2	2.51	16.98	3091.85	0.47	3.34	0.80	647.72	1455.65	574.51	0.18	187.16	32186
	3	2.5	16.36	2929.98	0.46	3.25	0.81	627.52	1529.71	548.82	0.26	179.94	30985
	4	2.5	16.05	2854.49	0.41	3.12	0.76	610.88	1502.39	535.47	0.30	176.64	30996
	5	2.49	15.78	2806.95	0.45	3.10	0.75	605.10	1530.13	527.64	0.27	172.72	30893
	6	2.47	15.94	2796.76	0.44	3.17	0.78	621.44	1550.12	524.21	0.27	173.00	30111
	7	2.48	15.87	2772.17	0.44	3.18	0.78	599.14	1530.19	519.15	0.28	172.24	30128
	8	2.49	15.67	2816.43	0.42	3.06	0.74	598.07	1464.10	538.99	0.32	173.19	31132
	9	2.63	14.34	2270.31	0.29	2.61	0.57	469.19	792.23	475.52	0.40	149.02	23843
	10	2.62	13.52	2165.88	0.23	2.38	0.49	418.93	569.37	468.21	0.79	140.43	21273

**ANEXO 6**

Los resultados de la columna de sedimento El Álamo para cada riego se pueden ver en las tablas 95-98.

**Tabla 95. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna El Álamo durante el primer riego.**

	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			mS/cm	mg/L									
Riego 1 columna El Álamo	1	3.03	3.09	122.64	<LD	0.27	0.04	36.37	15.65	38.99	0.21	14.83	2119
	2	2.69	7.43	607.32	0.09	1.23	0.25	177.71	205.82	152.66	0.18	72.60	17543
	3	2.51	10.83	1254.00	0.19	2.23	0.47	334.31	538.75	228.10	0.19	126.08	19021
	4	2.45	12.81	1966.45	0.37	2.78	0.62	533.13	1128.38	564.31	0.22	209.08	21457
	5	2.43	13.93	2328.17	0.52	3.11	0.72	613.44	1433.98	652.16	0.25	231.27	22590
	6	2.41	14.77	2579.66	0.63	3.53	0.87	669.73	1705.20	717.07	0.28	254.57	24225
	7	2.41	14.91	2480.62	0.67	3.59	0.90	668.62	1685.20	683.80	0.30	246.49	24574
	8	2.41	15.14	2707.35	0.76	3.62	0.92	709.31	1901.93	740.06	0.31	266.91	25717
	9	2.41	15.06	2714.37	0.79	3.78	0.98	715.43	1922.07	742.38	0.39	262.14	24572
	10	2.45	14.61	2668.28	0.74	3.51	0.91	697.29	1712.17	731.54	0.98	257.47	24672

ANEXO 6

Tabla 96. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna El Álamo durante el segundo riego. <LD: Debajo del límite de detección instrumental.

Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
		mS/cm	mg/L									
1	3.04	6.42	372.04	<LD	1.21	<LD	137.31	4.47	210.77	1.01	75.01	2542
2	3.11	6.06	303.95	<LD	1.07	<LD	114.48	3.16	180.25	0.44	61.38	1765
3	3.15	5.73	252.69	<LD	0.90	<LD	100.03	2.42	160.29	0.25	54.45	1987
4	3.18	5.45	216.74	<LD	0.84	<LD	89.83	1.77	145.59	0.22	49.53	2074
5	3.21	5.30	183.11	<LD	0.69	<LD	77.90	1.41	128.24	0.18	43.36	2143
6	3.07	5.13	169.30	<LD	0.68	<LD	70.70	1.19	116.43	0.18	39.51	2024
7	3.11	5.04	156.88	<LD	0.61	<LD	66.74	1.07	110.45	0.17	37.45	1543
8	3.13	4.94	145.09	<LD	0.56	<LD	62.94	0.96	104.50	0.17	35.22	1766
9	3.15	4.84	129.15	<LD	0.51	<LD	55.71	0.85	92.92	0.17	31.33	2011
10	3.17	4.77	119.28	<LD	0.47	<LD	53.05	0.78	88.17	0.17	29.64	2149
11	3.21	4.52	102.64	<LD	0.38	<LD	42.09	0.64	69.27	0.16	23.43	2143
12	3.25	4.47	93.81	<LD	0.33	<LD	37.97	0.97	63.12	0.16	21.17	2078
13	3.26	4.32	77.24	<LD	0.29	<LD	30.56	0.43	50.54	0.15	17.06	2321
14	3.28	4.20	70.10	<LD	0.25	<LD	27.18	0.40	44.75	0.12	15.05	2247
15	3.30	4.10	68.30	<LD	0.23	<LD	25.14	0.47	42.06	0.12	14.07	2154
16	3.31	4.01	57.09	<LD	0.18	<LD	22.47	0.37	36.94	0.10	12.35	2268
17	3.34	3.94	54.89	<LD	0.17	<LD	20.62	0.38	34.11	0.10	11.39	2101
18	3.36	3.90	51.21	<LD	0.15	<LD	18.16	0.32	29.47	0.10	9.86	1981
19	3.37	3.86	50.08	<LD	0.14	<LD	17.73	0.31	29.18	0.11	10.29	2050
20	3.38	3.76	44.26	<LD	0.13	<LD	15.49	0.28	24.96	0.10	9.23	2311
21	3.38	3.73	42.49	<LD	0.11	<LD	14.45	0.26	23.05	0.11	8.08	2267
22	3.38	3.66	38.71	<LD	0.10	<LD	12.80	0.23	20.05	0.10	7.28	2098
23	3.39	3.69	35.56	<LD	0.09	<LD	11.98	0.22	18.66	0.10	6.96	1959
24	3.39	3.68	39.34	<LD	0.10	<LD	12.87	0.25	20.02	0.15	7.11	2049
25	3.29	3.90	49.37	<LD	0.13	<LD	16.45	0.40	25.07	0.32	9.09	2150

Riego 2  
columna  
El Álamo



**ANEXO 6**

**Tabla 97. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna El Álamo durante el tercer riego.**

	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			mS/cm	mg/L									
Riego 3 columna El Álamo	1	2.88	6.70	419.29	0.09	0.83	0.13	113.77	111.84	129.47	0.17	41.11	5663
	2	2.82	8.35	743.52	0.12	1.18	0.20	188.49	286.53	196.20	0.11	63.29	8236
	3	2.76	9.56	929.42	0.15	1.41	0.26	228.24	402.53	226.28	0.11	73.15	10653
	4	2.60	13.26	1811.89	0.34	2.27	0.48	413.80	946.62	377.12	0.16	121.99	12604
	5	2.52	14.97	2243.73	0.43	2.64	0.60	512.89	1236.50	433.72	0.18	144.30	24461
	6	2.48	15.68	2491.14	0.45	2.91	0.68	547.58	1401.94	464.02	0.19	157.00	27210
	7	2.46	16.17	2650.45	0.48	3.07	0.73	579.07	1544.84	485.11	0.19	163.27	29268
	8	2.43	16.43	2683.24	0.53	3.07	0.74	585.54	1585.47	486.80	0.20	169.85	30379
	9	2.44	16.18	2680.53	0.59	3.02	0.74	580.41	1506.81	485.66	0.31	166.42	29267

**Tabla 98. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna El Álamo durante el cuarto riego.**

	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			mS/cm	mg/L									
Riego 4 columna El Álamo	1	2.63	14.60	2754.78	0.35	2.96	0.57	610.38	763.66	508.97	0.16	178.27	27401
	2	2.56	15.60	2832.89	0.42	3.05	0.58	601.83	934.25	524.85	0.16	183.88	29208
	3	2.55	15.83	2834.51	0.44	3.09	0.61	602.40	985.30	519.64	0.16	181.99	29576
	4	2.47	16.02	2943.09	0.46	3.17	0.69	633.21	1325.33	533.91	0.19	182.42	30789
	5	2.46	16.38	2943.92	0.47	3.23	0.75	637.85	1455.02	532.85	0.20	183.62	30769
	6	2.44	15.87	2919.00	0.46	3.19	0.73	631.41	1470.79	527.41	0.19	182.67	30926
	7	2.43	16.07	3022.46	0.49	3.27	0.78	798.26	1685.35	573.75	0.18	181.86	30128
	8	2.42	16.28	3086.16	0.49	3.27	0.80	810.78	1803.47	585.27	0.19	183.97	31257
	9	2.41	16.18	2993.11	0.49	3.26	0.81	799.76	1785.55	571.66	0.20	182.24	31022
	10	2.43	16.24	3137.35	0.51	3.16	0.80	798.21	1788.76	592.15	0.27	189.94	31379

Los resultados de la columna de sedimento Chilolo para cada riego se pueden ver en las tablas 99 y 100.

**ANEXO 6**

**Tabla 99. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Chilolo durante el primer riego.**

	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			mS/cm	mg/L									
Riego 1 columna Chilolo	1	5.45	4.59	117.82	0.03	0.56	0.01	61.87	5.26	124.04	0.48	31.76	9975
	2	5.23	4.67	233.49	0.04	0.97	0.01	113.87	15.77	234.86	0.33	51.36	9764
	3	5.20	4.71	349.41	0.05	1.25	0.01	157.45	30.13	295.06	0.25	76.30	10054
	4	5.10	4.70	459.30	0.07	1.53	0.01	196.80	47.71	368.05	0.27	97.75	10976
	5	5.05	4.89	579.84	0.09	1.80	0.01	234.43	66.90	418.38	0.30	110.60	11459
	6	4.98	5.01	637.14	0.08	1.88	0.01	273.69	84.06	473.29	0.37	128.47	11421
	7	4.87	5.14	647.47	0.09	1.98	0.01	264.50	80.38	459.26	0.50	122.81	11791
	8	4.77	5.19	559.74	0.07	1.67	0.01	239.27	69.23	414.93	0.51	111.81	11995
	9	4.70	5.17	252.90	0.05	1.01	0.01	123.78	19.24	239.64	0.75	68.12	12076
	10	4.42	5.25	106.65	0.03	0.63	0.01	76.20	3.84	159.52	0.39	40.66	12460
	11	4.41	5.40	22.09	0.01	0.36	0.01	39.15	0.91	89.22	0.32	22.02	12122
	12	4.35	5.37	16.67	0.001	0.34	0.09	35.96	0.29	93.76	0.32	21.81	12147
	13	4.27	5.47	0.01	0.001	0.24	0.01	4.11	0.07	54.63	0.03	13.86	12456
	14	4.25	5.55	0.12	0.001	0.22	0.02	7.50	0.06	59.00	0.04	12.80	12420
	15	4.14	5.54	1.57	0.001	0.27	0.01	7.99	1.67	62.83	0.06	16.09	12103

**Tabla 100. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Chilolo durante el segundo riego. <LD: Debajo del límite de detección instrumental.**

	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			mS/cm	mg/L									
Riego 2 columna Chilolo	1	5.40	4.65	<LD	<LD	0.12	<LD	1.39	<LD	33.32	0.08	5.32	4215
	2	5.75	4.40	<LD	<LD	0.11	<LD	0.86	<LD	32.12	0.05	5.06	4193
	3	5.79	4.37	<LD	<LD	0.11	<LD	0.54	<LD	30.89	0.04	4.59	6076
	4	5.87	4.32	<LD	<LD	0.10	<LD	0.58	<LD	30.43	0.03	4.41	6521
	5	5.91	4.30	<LD	<LD	0.11	<LD	0.71	<LD	32.02	0.03	3.00	7553
	6	5.99	4.31	<LD	<LD	0.09	<LD	0.44	<LD	26.93	0.02	3.50	7249
	7	6.10	4.29	<LD	<LD	0.03	<LD	0.12	<LD	11.53	0.01	3.25	7124
	8	6.25	4.25	<LD	<LD	0.11	<LD	0.42	<LD	30.87	0.02	3.14	7083
	9	6.40	4.20	<LD	<LD	0.10	<LD	0.44	<LD	27.98	0.02	4.03	5422
	10	6.35	4.22	<LD	<LD	0.09	<LD	0.39	<LD	27.35	0.01	3.37	4011
	11	6.57	4.14	<LD	<LD	0.04	<LD	0.28	<LD	14.25	0.03	1.26	1864

**ANEXO 6**

Los resultados de la columna de suelo Bacanuchi para cada riego se pueden ver en las tablas 101-103.

**Tabla 101. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Bacanuchi durante el primer riego. <LD: Debajo del límite de detección instrumental.**

	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>
			mg/L											
			mS/cm											
	1	7.04	0.70	<LD	<LD	<LD	<LD	0.13	0.017	0.01	<LD	0.02	94	172
	2	7.29	0.68	<LD	<LD	<LD	<LD	0.09	0.005	<LD	<LD	0.01	95	225
	3	7.38	0.67	0.01	<LD	<LD	<LD	0.10	0.004	<LD	<LD	0.02	97	209
	4	7.41	0.66	0.01	<LD	<LD	<LD	0.09	0.004	<LD	<LD	0.02	97	179
	5	7.35	0.70	0.01	<LD	<LD	<LD	0.08	<LD	<LD	<LD	0.02	97	169
	6	7.40	0.81	0.01	<LD	<LD	<LD	0.08	0.005	<LD	<LD	0.02	406	190
	7	7.41	1.21	0.02	<LD	<LD	<LD	0.08	0.01	<LD	<LD	0.03	712	220
	8	7.53	1.81	0.02	<LD	<LD	<LD	0.08	0.004	<LD	<LD	0.05	915	246
	9	7.51	2.21	0.02	<LD	<LD	<LD	0.08	0.01	0.01	<LD	0.07	1119	265
	10	7.47	4.13	0.03	<LD	<LD	<LD	0.11	0.01	0.02	<LD	0.12	1449	442
	11	7.20	4.51	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	0.01	0.04	<LD	0.03	1703	678
	12	7.04	4.37	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	0.01	0.04	<LD	0.04	1835	866
	13	6.94	4.31	<LD	<LD	<LD	<LD	0.08	0.01	0.04	<LD	0.04	1942	850
	14	6.81	4.33	<LD	<LD	<LD	<LD	0.08	0.01	0.05	<LD	0.04	1977	820
	15	6.73	4.20	<LD	<LD	<LD	<LD	0.09	0.01	0.06	<LD	0.04	2011	814
	16	6.64	4.20	<LD	<LD	<LD	<LD	0.09	0.01	0.05	<LD	0.04	2065	811
	17	6.54	4.21	<LD	<LD	<LD	<LD	0.09	0.01	0.14	<LD	0.04	2101	750
	18	6.50	4.35	<LD	<LD	<LD	<LD	0.11	0.03	2.57	<LD	0.06	2460	660
	19	6.48	4.56	<LD	<LD	<LD	<LD	0.11	0.01	12.73	<LD	0.06	2509	640

ANEXO 6

Tabla 102. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Bacanuchi durante el segundo riego. <LD: Debajo del límite de detección instrumental.

Riego 2 columna Bacanuchi	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sup>3-</sup>
			mS/cm	mg/L										
	1	7.36	4.89	0.33	<LD	<LD	<LD	0.13	0.11	0.03	<LD	0.47	2670	2090
2	7.17	4.65	0.23	<LD	<LD	<LD	0.08	0.08	0.01	<LD	0.01	2504	1693	
3	6.90	4.63	0.17	<LD	<LD	<LD	0.08	<LD	0.01	<LD	0.01	2519	1639	
4	7.14	6.52	0.25	<LD	<LD	<LD	0.13	0.04	7.77	<LD	0.13	4281	100	
5	7.07	6.65	0.38	<LD	<LD	<LD	0.18	0.35	18.26	<LD	0.29	5207	152	
6	7.13	7.67	0.30	<LD	<LD	<LD	0.17	0.52	29.30	0.01	0.73	5676	312	
7	7.06	7.08	0.38	<LD	0.02	<LD	0.21	0.78	87.37	0.02	9.46	5168	658	
8	6.96	6.88	0.37	<LD	0.02	<LD	0.18	<LD	107.98	0.02	13.17	5385	675	
9	6.91	8.07	0.55	<LD	0.04	<LD	0.25	0.20	125.60	0.03	17.88	5618	641	
10	6.98	6.69	0.49	<LD	0.08	<LD	0.24	<LD	170.36	0.04	28.30	6065	593	

Tabla 103. Resultados de los análisis químicos en los lixiviados colectados en la columna Bacanuchi durante el tercer riego. <LD: Debajo del límite de detección instrumental.

Riego 3 columna Bacanuchi	Lixiviado	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sup>3-</sup>
			mS/cm	mg/L										
	1	6.97	8.31	0.47	<LD	0.03	<LD	0.33	0.29	133.06	0.06	18.66	5088	115.3
2	6.78	7.68	0.91	<LD	0.18	<LD	0.51	<LD	141.99	0.05	33.14	4815	39.4	
3	6.51	7.66	1.83	<LD	0.29	<LD	3.93	0.13	161.97	0.05	41.80	4853	<LD	
4	6.28	8.05	2.70	<LD	0.32	<LD	7.69	<LD	194.14	0.05	46.08	5266	<LD	
5	6.14	9.11	6.41	<LD	0.45	<LD	9.39	0.16	272.81	0.08	64.15	6266	<LD	
6	6.02	11.21	7.26	<LD	0.87	<LD	10.50	<LD	409.23	0.09	101.07	8165	<LD	
7	5.56	14.33	29.55	<LD	2.18	<LD	45.25	<LD	600.35	0.17	199.65	10210	<LD	
8	4.92	15.00	34.05	<LD	3.13	<LD	109.69	<LD	660.65	0.25	258.51	11276	<LD	
9	4.57	14.90	121.89	<LD	4.62	<LD	199.93	<LD	698.27	0.33	304.89	11280	<LD	
10	4.38	13.83	257.54	<LD	6.47	<LD	353.69	<LD	705.23	0.42	343.06	11729	<LD	

ANEXO 6

La tabla 104 resume los resultados para cada columna tomando en cuenta la retención para cada EPT utilizando los balances de masa de los lixiviados.

**Tabla 104. % retenido de los EPT en cada columna usando balance de masas. NSR: No se retuvo.**

Columna	# de Riego	% Retenido tomando en cuenta el balance de masa de cada EPT									
		Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO4 <sup>2-</sup>
Tinajas	1	51.25	36.9	32.28	39.69	35	52.30	12.91	NSR	47.14	32.14
	2 (% liberado)	4.47	0.19	15.79	0	5.17	0.09	52.35	NSR	6.59	17.6
	3	47.54	66.64	34.15	47.52	38.74	64.37	32.86	NSR	62.52	24.25
	4	51.64	71.65	43.4	55.06	44.59	70.97	38.53	NSR	65.99	27.69
El Álamo	1	67.77	68.82	51.70	60.94	53.65	74.73	42.29	NSR	63.59	51.02
	2 (% liberado)	2.38	0	11.63	0	6.44	0.02	16.18	NSR	6.29	7.99
	3	70.71	77.96	62.24	71.77	64.27	80.27	61.74	31.94	78.12	56.49
	4	48.19	68.32	41.4	55.79	34.02	69.39	36.27	20.79	63.6	24.20
Chilolo	1	94.69	96.76	79.35	98.82	86.74	99.30	68.71	NSR	86.05	67.07
	2 (% liberado)	0	0	1.77	0	0.05	0	3.82	NSR	0.72	17.99
Bacanuchi	1	100	100	100	100	100	100	99.82	100	100	94.62
	2	100	100	100	100	100	100	93.63	99.14	98.6	88.77
	3	99.19	100	65.65	100	92.94	100	53.67	35.02	71.95	80.27

Los balances de masa realizados para cada EPT en todas las columnas durante los diferentes riegos se realizaron con la intención de determinar la masa retenida de cada elemento en relación a la masa añadida presente en la solución ácida ferrocuprífera.

En la tabla 104 se puede observar que existen diferentes porcentajes de retención para cada EPT. En el segundo riego de las columnas Tinajas, El Álamo y Chilolo (colores amarillos en la tabla 104) se reporta el porcentaje liberado de cada elemento después del paso de la solución de CaCl<sub>2</sub> en relación a la masa retenida durante el primer riego. Dichos resultados permiten decir que en el segundo riego no existe liberación de As, Cr y Fe en ninguna columna, por lo que no se liberan tras el paso de la solución lixiviada de cloruro de calcio.

## ANEXO 7

### Resumen estadístico.

Tabla 105. Resumen estadístico en la columna de suelo Tinajas. <LD: Por debajo del límite de detección de la técnica utilizada.

Columna Tinajas	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Riego 1		mS/cm	mg/L									
Número de datos	45	45	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Media	2.58	13.85	2258.02	0.69	3.00	0.79	553.44	1643.32	613.31	0.24	218.26	22290.26
Mediana	2.57	14.13	2421.30	0.80	3.18	0.86	601.57	1911.73	645.92	0.19	230.16	22786.00
Desviación estándar	0.04	0.87	424.42	0.24	0.48	0.14	112.33	555.63	99.23	1.06	34.50	2281.52
Valor mínimo	2.55	10.30	1142.16	0.15	1.76	0.42	266.34	286.51	356.62	0.15	127.66	17491.97
Valor máximo	3.01	14.60	2772.15	0.99	3.53	0.95	679.08	2327.63	738.73	4.02	255.06	25494.43
Columna Tinajas	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Riego 2		mS/cm	mg/L									
Número de datos	59	59	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Media	3.26	4.04	121.08	<LD	0.26	<LD	17.95	1.66	53.79	0.12	14.55	2232.44
Mediana	3.28	4.26	134.48	<LD	0.30	<LD	19.93	1.54	62.63	0.11	16.64	2207.00
Desviación estándar	0.13	0.45	39.31	<LD	0.08	<LD	4.97	0.89	17.70	0.12	4.67	423.21
Valor mínimo	2.28	3.23	55.47	<LD	0.12	<LD	9.61	0.65	23.69	0.06	6.73	1987.00
Valor máximo	3.41	4.94	171.57	<LD	0.37	<LD	23.32	3.36	85.85	0.62	22.58	2568.00
Columna Tinajas	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Riego 3		mS/cm	mg/L									
Número de datos	34	34	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Media	2.49	15.69	2463.97	0.39	2.94	0.70	529.96	1316.93	478.58	0.28	156.18	24544.56
Mediana	2.49	15.90	2608.69	0.42	3.07	0.74	557.72	1462.45	496.32	0.27	160.68	27861.95
Desviación estándar	0.05	0.68	753.59	0.13	0.88	0.22	164.79	472.34	139.00	0.12	46.47	8607.27
Valor mínimo	2.44	12.70	1663.98	0.23	2.14	0.47	335.38	601.74	375.77	0.18	112.47	12257.50
Valor máximo	2.69	16.22	2728.10	0.47	3.22	0.78	600.82	1608.57	511.20	0.54	173.12	28855.10
Columna Tinajas	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Riego 4		mS/cm	mg/L									
Número de datos	28	28	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	2.50	15.96	2734.29	0.40	3.04	0.72	576.52	1268.65	526.75	0.30	170.18	29091.90
Mediana	2.50	16.14	2811.69	0.44	3.14	0.76	607.99	1483.25	531.55	0.28	173.10	30938.85
Desviación estándar	0.04	0.68	298.67	0.08	0.32	0.11	74.83	349.59	34.30	0.17	14.77	3673.40
Valor mínimo	2.47	13.52	2165.88	0.23	2.38	0.49	418.93	569.37	468.21	0.17	140.43	21273.30
Valor máximo	2.63	16.98	3091.85	0.48	3.36	0.81	647.72	1550.12	574.51	0.79	187.16	32186.20

**ANEXO 7**

**Tabla 106. Resumen estadístico en la columna de sedimento El Álamo. <LD: Por debajo del límite de detección de la técnica utilizada.**

Columna El Álamo	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Riego 1		mS/cm	mg/L									
Número de datos	39	39	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	2.49	12.10	1489.23	0.47	2.29	0.52	402.63	741.87	397.49	0.29	153.82	17793.23
Mediana	2.43	14.23	2404.40	0.57	3.31	0.80	641.03	1559.59	667.98	0.27	238.88	23407.70
Desviación estándar	0.14	3.34	949.91	0.29	1.18	0.32	245.90	718.72	274.67	0.24	90.36	7035.98
Valor mínimo	2.40	3.09	122.64	0.00	0.27	0.04	36.37	15.65	38.99	0.18	14.83	2118.84
Valor máximo	3.03	15.95	2714.37	0.79	3.78	0.98	715.43	1922.07	742.38	0.98	266.91	25717.11
Columna El Álamo	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Riego 2		mS/cm	mg/L									
Número de datos	57	57	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Media	3.29	4.21	91.08	<LD	0.30	<LD	34.81	0.65	56.42	0.16	19.43	2077.41
Mediana	3.30	4.08	77.24	<LD	0.29	<LD	30.56	0.47	50.54	0.16	17.06	2097.50
Desviación estándar	0.09	0.63	90.22	<LD	0.33	<LD	35.59	1.03	56.24	0.19	19.36	201.56
Valor mínimo	3.04	3.60	35.56	<LD	0.09	<LD	11.98	0.22	18.66	0.10	6.96	1542.70
Valor máximo	3.40	6.42	372.04	<LD	1.21	<LD	137.31	4.47	210.77	1.01	75.01	2542.20
Columna El Álamo	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Riego 3		mS/cm	mg/L									
Número de datos	38	38	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Media	2.53	14.32	1563.84	0.29	2.06	0.43	363.91	753.31	332.77	0.17	110.35	16832.19
Mediana	2.49	15.71	2243.73	0.43	2.64	0.60	512.89	1236.50	433.72	0.18	144.30	24460.54
Desviación estándar	0.11	2.40	915.90	0.19	0.89	0.25	189.55	588.60	142.17	0.06	50.08	10227.48
Valor mínimo	2.43	6.70	419.29	0.09	0.83	0.13	113.77	111.84	129.47	0.11	41.11	5663.23
Valor máximo	2.88	16.45	2683.24	0.59	3.07	0.74	585.54	1585.47	486.80	0.31	169.85	30378.87
Columna El Álamo	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Riego 4		mS/cm	mg/L									
Número de datos	35	35	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Media	2.47	16.03	2944.57	0.45	3.16	0.71	686.70	1344.87	546.30	0.19	183.07	30222.10
Mediana	2.44	16.15	2943.50	0.47	3.18	0.74	635.53	1462.91	533.38	0.19	182.55	30778.66
Desviación estándar	0.06	0.35	118.72	0.05	0.10	0.09	94.97	387.50	30.31	0.03	2.91	1228.04
Valor mínimo	2.41	14.60	2754.78	0.35	2.96	0.57	601.83	763.66	508.97	0.16	178.27	27400.55
Valor máximo	2.63	16.38	3137.35	0.51	3.27	0.81	810.78	1803.47	592.15	0.27	189.94	31378.73

**ANEXO 7**

**Tabla 107. Resumen estadístico en la columna de sedimento Chilolo. <LD: Por debajo del límite de detección de la técnica utilizada.**

<b>Columna Chilolo</b>	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>
<b>Riego 1</b>		<b>mS/cm</b>	<b>mg/L</b>									
<b>Número de datos</b>	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
<b>Media</b>	4.73	5.10	47.68	0.02	0.75	0.01	67.74	6.03	181.64	0.24	46.10	11510.80
<b>Mediana</b>	4.77	5.17	233.49	0.04	0.97	0.01	113.87	15.77	234.86	0.32	51.36	11995.40
<b>Desviación estándar</b>	0.42	0.33	252.69	0.03	0.66	0.02	98.78	32.26	157.38	0.19	43.11	933.08
<b>Valor mínimo</b>	4.14	4.59	0.01	0.001	0.22	0.01	4.11	0.06	54.63	0.03	12.80	9764.40
<b>Valor máximo</b>	5.45	5.55	647.47	0.09	1.98	0.09	273.69	84.06	473.29	0.75	128.47	12459.50
<b>Columna Chilolo</b>	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>
<b>Riego 2</b>		<b>mS/cm</b>	<b>mg/L</b>									
<b>Número de datos</b>	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
<b>Media</b>	6.03	4.31	<LD	<LD	0.08	<LD	0.47	<LD	25.80	0.03	3.51	5219.98
<b>Mediana</b>	5.99	4.30	<LD	<LD	0.10	<LD	0.44	<LD	30.43	0.03	3.50	6075.90
<b>Desviación estándar</b>	0.34	0.13	<LD	<LD	0.03	<LD	0.34	<LD	7.32	0.02	1.14	1803.88
<b>Valor mínimo</b>	5.40	4.14	<LD	<LD	0.03	<LD	0.12	<LD	11.53	0.01	1.26	1864.02
<b>Valor máximo</b>	6.57	4.65	<LD	<LD	0.12	<LD	1.39	<LD	33.32	0.08	5.32	7552.95



**ANEXO 7**

**Tabla 108. Resumen estadístico en la columna de suelo Bacanuchi. <LD: Por debajo del límite de detección de la técnica utilizada.**

Columna Bacanuchi	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>Riego 1</b>		mS/cm	mg/L										
<b>Número de datos</b>	39	39	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
<b>Media</b>	7.10	2.24	0.010	<LD	<LD	<LD	0.09	0.010	0.020	<LD	0.036	398.213	725.55
<b>Mediana</b>	7.26	4.15	0.010	<LD	<LD	<LD	0.09	0.007	0.022	<LD	0.040	441.500	1449.20
<b>Desviación estándar</b>	0.36	1.78	0.010	<LD	<LD	<LD	0.02	0.006	2.939	<LD	0.025	285.410	894.40
<b>Valor mínimo</b>	6.47	0.66	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	<LD	0.013	168.765	93.55
<b>Valor máximo</b>	7.53	6.13	0.028	<LD	<LD	<LD	0.13	0.026	12.727	<LD	0.123	866.004	2508.92
Columna Bacanuchi	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>Riego 2</b>		mS/cm	mg/L										
<b>Número de datos</b>	34	34	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Media</b>	7.17	5.56	0.327	<LD	0.004	<LD	0.15	0.200	4.298	0.005	0.803	584.335	4271.09
<b>Mediana</b>	7.18	5.25	0.346	<LD	0.004	<LD	0.17	0.096	23.781	0.005	0.600	649.636	5187.06
<b>Desviación estándar</b>	0.11	1.01	0.115	<LD	0.026	<LD	0.06	0.264	62.767	0.014	9.933	698.158	1418.66
<b>Valor mínimo</b>	6.90	4.57	0.174	<LD	0.000	<LD	0.08	<LD	0.008	<LD	0.011	100.195	2503.72
<b>Valor máximo</b>	7.36	8.07	0.547	<LD	0.080	<LD	0.25	0.782	170.359	0.040	28.303	2089.856	6065.04
Columna Bacanuchi	pH	CE	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>Riego 3</b>		mS/cm	mg/L										
<b>Número de datos</b>	31	31	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Media</b>	5.73	10.68	8.900	<LD	0.732	<LD	13.31	0.050	324.521	0.113	91.622	15.940	7393.37
<b>Mediana</b>	6.06	10.38	6.837	<LD	0.661	<LD	9.94	0.050	341.019	0.088	82.612	15.900	7215.81
<b>Desviación estándar</b>	0.85	3.10	82.948	<LD	2.226	<LD	117.63	0.102	245.691	0.134	123.778	37.194	2966.53
<b>Valor mínimo</b>	4.38	7.60	0.471	<LD	0.033	<LD	0.33	<LD	133.065	0.048	18.657	<LD	4815.11
<b>Valor máximo</b>	6.97	15.12	257.545	<LD	6.476	<LD	353.69	0.294	705.227	0.420	343.059	115.289	11729.28

ANEXO 7

En las siguientes figuras se resumen los resultados del comportamiento de las medias aritméticas de cada variable química analizada durante los diferentes riegos en las columnas de suelo y sedimento.

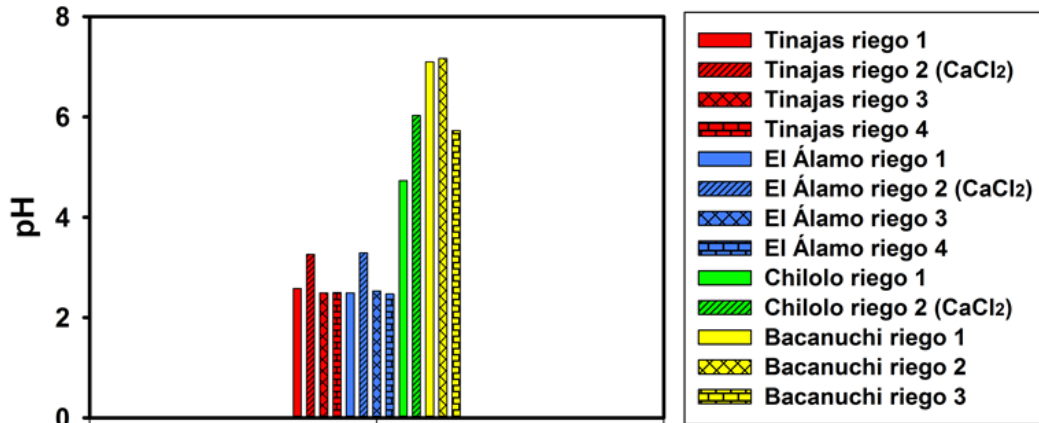


Figura 152. Media del pH en los diferentes riegos.

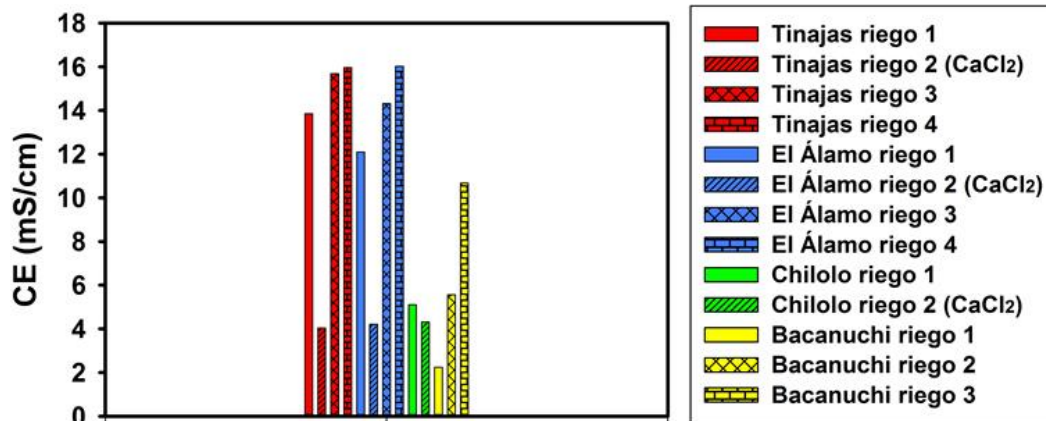


Figura 153. Media de la Conductividad Eléctrica (CE) en los diferentes riegos.

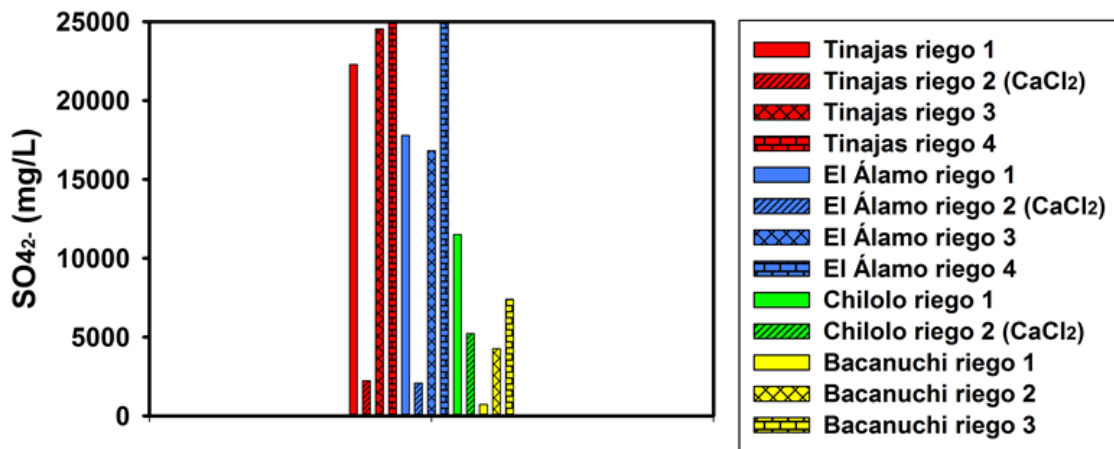


Figura 154. Media de sulfatos en los diferentes riegos.

ANEXO 7

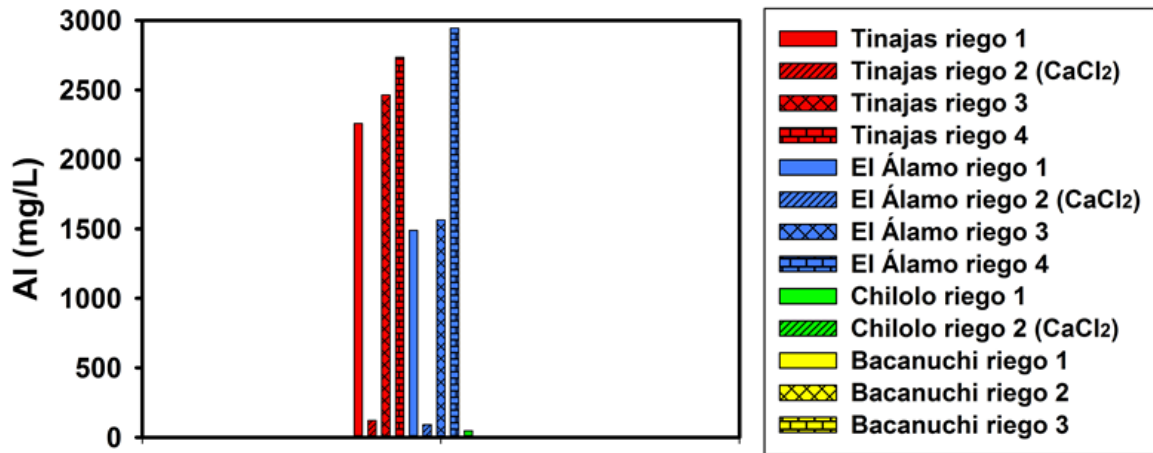


Figura 155. Media de Al en los diferentes riegos.

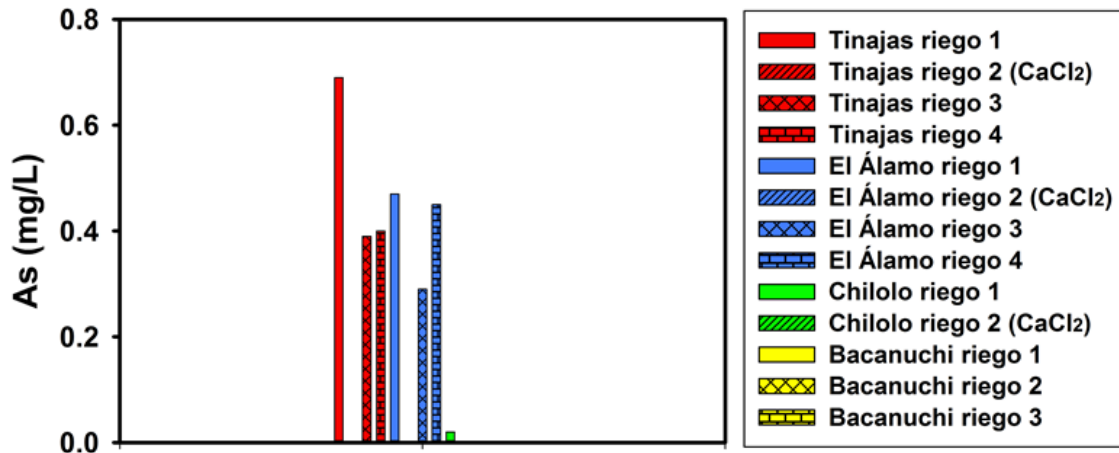


Figura 156. Media de As en los diferentes riegos.

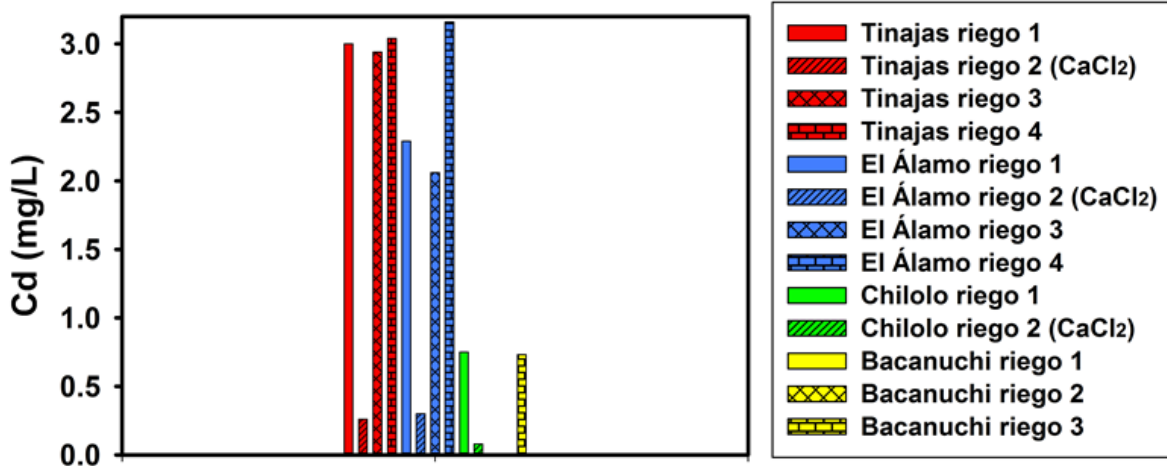


Figura 157. Media de Cd en los diferentes riegos.

ANEXO 7

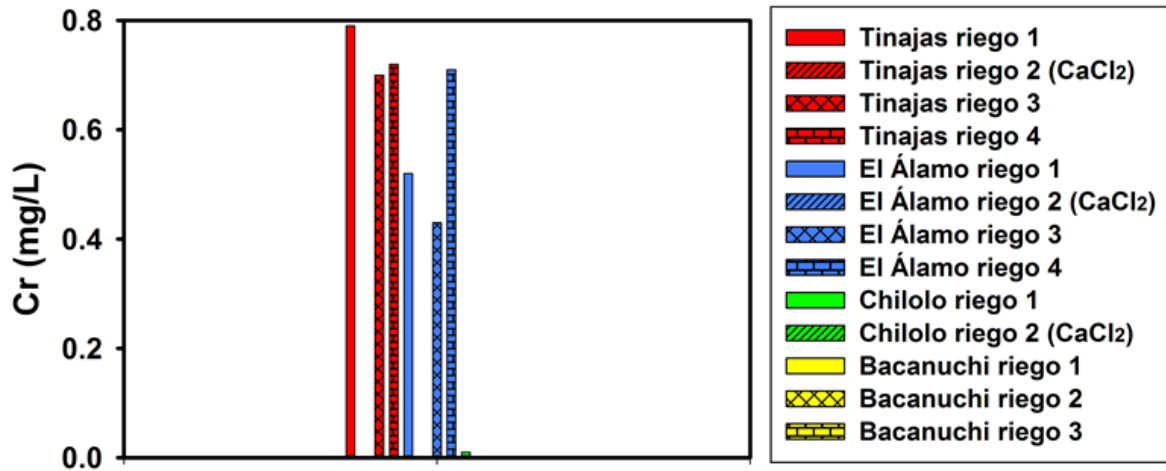


Figura 158. Media de Cr en los diferentes riegos.

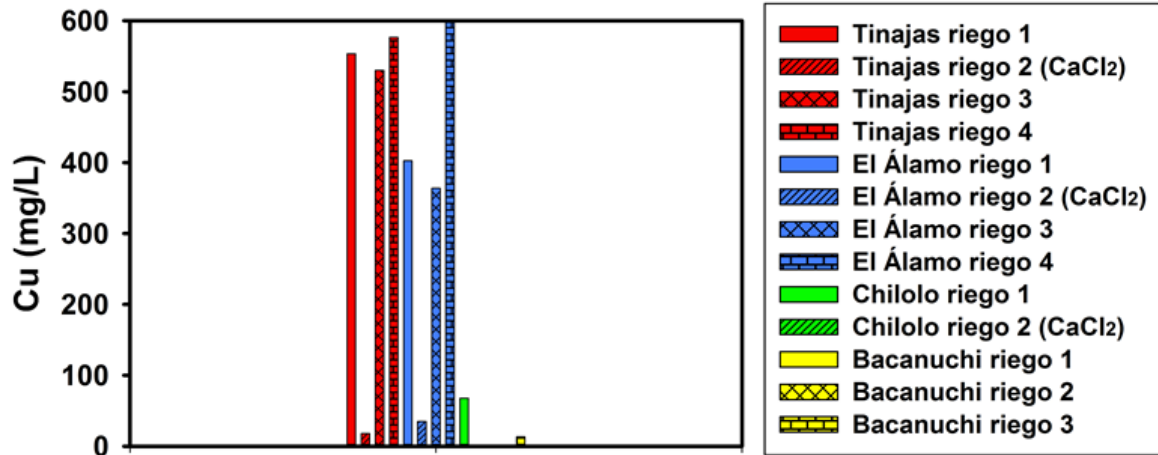


Figura 159. Media de Cu en los diferentes riegos.

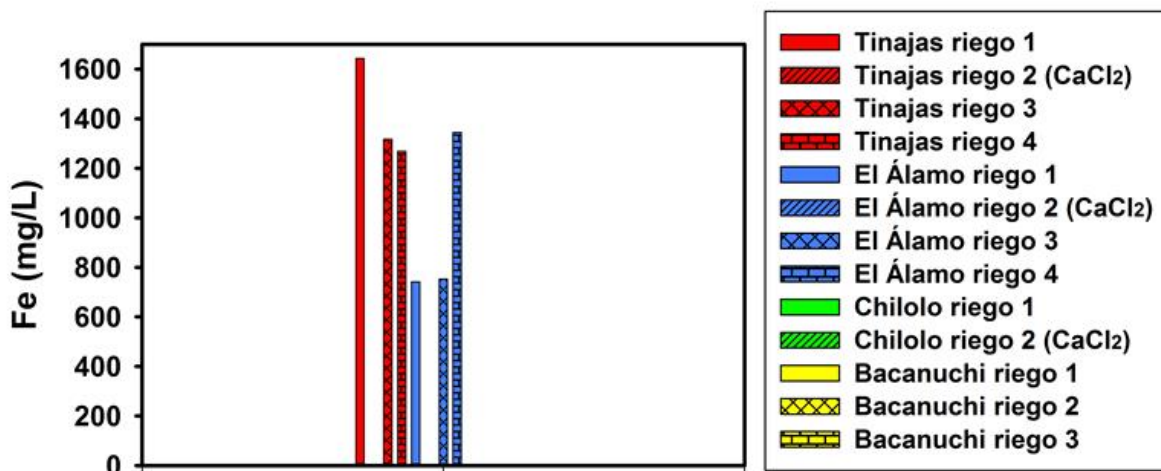


Figura 160. Media de Fe en los diferentes riegos.

ANEXO 7

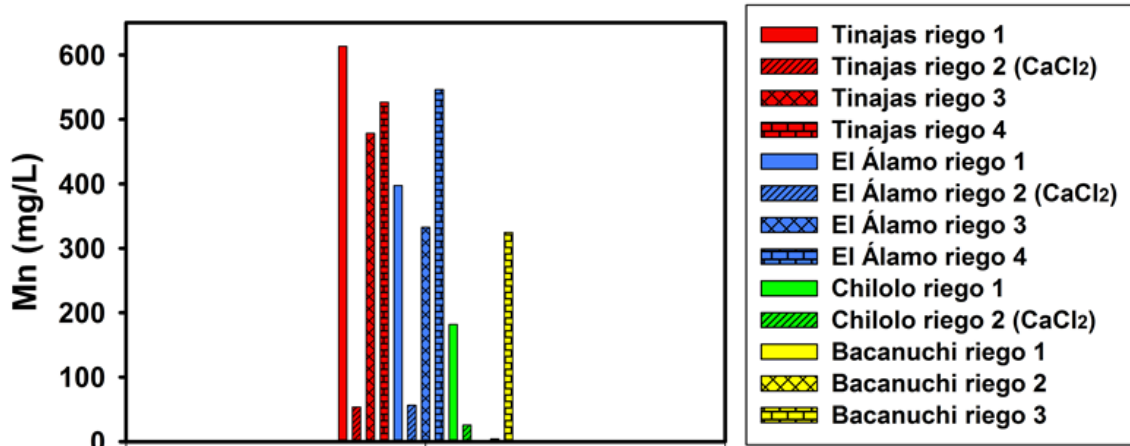


Figura 161. Media de Mn en los diferentes riegos.

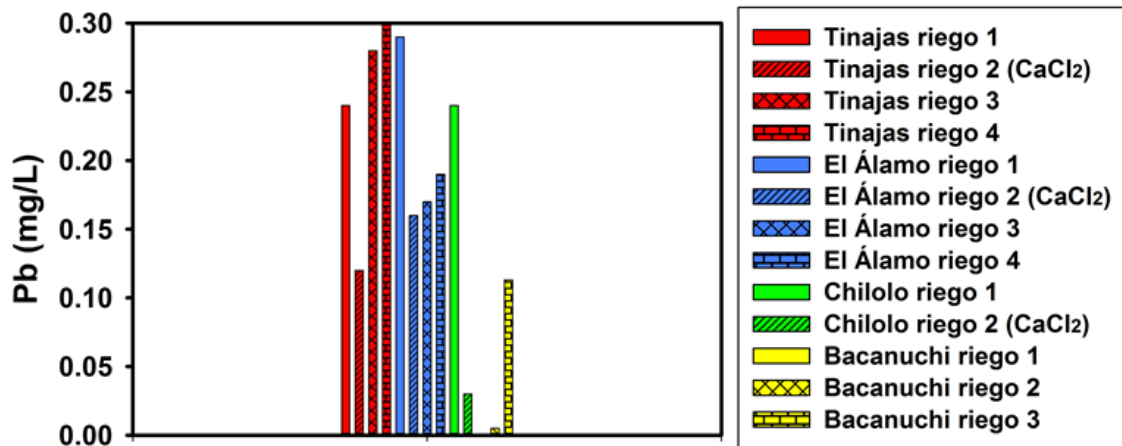


Figura 162. Media de Pb en los diferentes riegos.

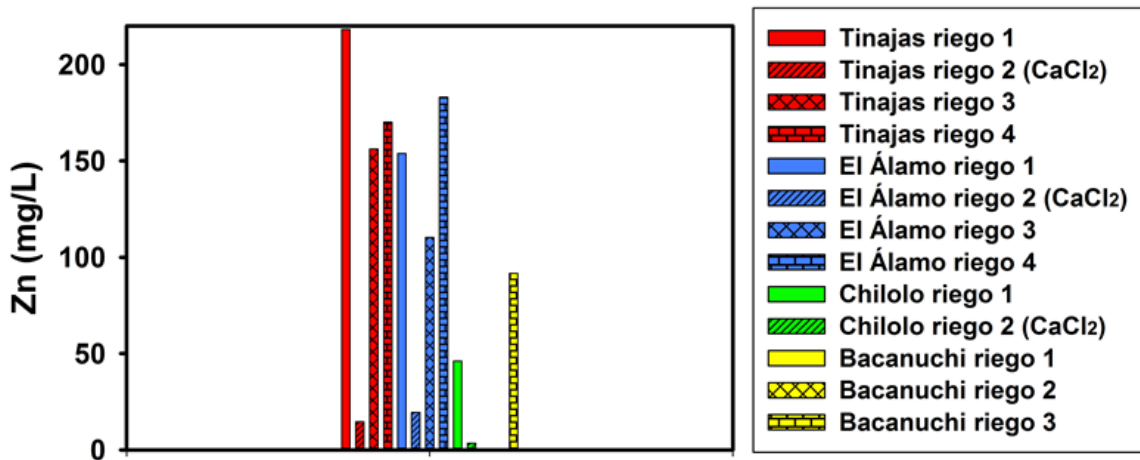


Figura 163. Media de Zn en los diferentes riegos.

## ANEXO 8

### Balance catiónico-aniónico de los lixiviados usados en la modelación geoquímica.

Tabla 109. Balance catiónico-aniónico en la columna de suelo Tinajas

Riego 1	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ca	K	Mg	Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Balance
Vo	mg/L														%
0.0	2038.8	0.4	1.3	0.5	257.1	1724.6	53.3	0.0	172.1	581.7	61.2	558.0	28.5	14905.6	7.3
0.7	1492.7	0.1	0.5	0.3	108.1	1102.5	0.0	0.0	122.2	646.9	42.2	687.0	30.9	12910.1	1.6
0.9	3122.7	0.9	2.3	0.8	520.8	3143.6	287.3	0.0	249.6	628.2	226.7	588.0	38.7	21925.3	5.7
Riego 2	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ca	K	Mg	Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Balance
Vo	mg/L														%
0.1	1335.3	0.1	0.2	0.3	87.0	1099.5	0.0	0.0	104.7	412.8	63.4	75.8	22.4	9212.4	4.8
0.6	1382.5	0.1	0.3	0.3	93.0	1100.7	0.0	0.0	110.1	383.9	50.5	58.2	20.1	9214.1	3.4
0.7	1358.2	0.1	0.2	0.3	86.7	1101.3	0.0	0.0	99.6	496.3	120.0	162.5	24.3	9264.5	4.9
Riego 3	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ca	K	Mg	Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Balance
Vo	mg/L														%
0.2 (11 cm)	3069.7	0.9	2.5	0.9	552.1	3257.6	260.7	0.1	282.5	542.1	75.4	421.8	250.0	21763.5	3.4
0.7 (16 cm)	1587.4	0.7	1.0	0.4	86.7	1743.1	122.6	0.0	212.9	490.5	69.4	651.2	72.5	12794.0	6.7

Tabla 110. Balance catiónico-aniónico en la columna de sedimento El Álamo.

Riego 1	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ca	K	Mg	Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Balance
Vo	mg/L														%
0.0	4142.2	1.1	3.8	1.2	750.8	3414.4	604.9	0.0	362.5	407.7	5.2	74.4	22.3	26702.2	2.5
0.5	1685.2	0.4	0.5	0.3	117.4	1724.9	0.0	0.0	122.7	717.3	21.4	712.0	39.2	14196.0	3.0
0.9	1596.6	0.3	0.5	0.3	89.9	1717.9	0.0	0.0	119.8	586.2	18.8	703.6	36.1	12945.5	6.4
Riego 2	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ca	K	Mg	Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Balance
Vo	mg/L														%
0.07	1343.9	0.3	0.0	0.3	0.0	1715.5	0.0	0.0	65.4	536.9	10.7	249.1	33.8	9361.2	5.0
0.38	1502.7	0.3	0.2	0.3	51.9	1717.0	0.0	0.0	98.6	573.1	10.4	111.2	20.7	9979.6	2.9
0.94	1557.2	0.3	0.4	0.3	77.0	1717.7	0.0	0.0	112.7	577.9	7.8	37.5	13.9	9747.6	6.9
Riego 3	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ca	K	Mg	Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Balance
Vo	mg/L														%
0.45 (16 cm)	2296.5	0.9	2.5	0.9	263.8	2194.1	238.0	0.1	252.2	494.1	22.3	496.5	43.0	16535.8	4.8

## ANEXO 8

Tabla 111. Balance catiónico-aniónico en la columna de sedimento Chilolo.

Riego 1	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ca	K	Mg	Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Balance
<b>Vo</b>	<b>mg/L</b>														<b>%</b>
0.03	3805.5	1.0	2.5	1.2	590.3	3382.4	275.9	0.0	279.5	836.1	29.3	461.8	29.9	27045.1	6.2
0.08	3705.1	1.0	2.4	1.2	547.9	3360.9	229.0	0.0	265.5	867.1	27.5	458.1	28.1	25065.5	1.0
0.30	4263.3	1.1	3.8	1.2	779.2	3428.4	581.1	0.0	361.2	644.4	9.3	146.4	17.1	26918.1	4.5
0.17 (2.5 cm)	2029.4	0.7	1.7	0.7	101.5	1728.7	0.0	0.1	135.3	797.1	18.4	483.6	24.7	14542.2	5.7
0.25 (5 cm)	1972.0	0.5	0.4	0.4	94.7	1680.0	0.0	0.0	133.3	664.5	20.9	732.2	34.6	15174.0	2.7
Riego 2	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ca	K	Mg	Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Balance
<b>Vo</b>	<b>mg/L</b>														<b>%</b>
0.02	4263.3	1.1	3.7	1.2	778.3	3428.4	549.0	0.0	356.1	675.4	10.1	113.3	19.0	25775.2	7.1
0.06	4263.3	1.1	3.7	1.2	778.7	3428.4	550.2	0.0	358.1	689.1	12.1	141.2	23.4	25952.1	7.0
0.10	4263.3	1.1	3.7	1.2	778.9	3428.4	566.8	0.0	359.9	627.5	9.6	111.0	21.8	26054.3	5.1
0.07 (2.5 cm)	4169.3	1.1	3.4	1.2	727.8	3427.4	480.9	0.0	329.1	553.2	14.1	138.7	19.2	25421.5	5.8

Tabla 112. Balance catiónico-aniónico en la columna de suelo Bacanuchi.

Riego 1	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ca	K	Mg	Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Balance
<b>Vo</b>	<b>mg/L</b>														<b>%</b>
0.11	4264.8	1.1	4.0	1.2	787.0	3430.1	643.9	0.2	377.3	101.6	43.9	6.5	10.4	25924.5	11.2
0.52	4264.8	1.1	4.1	1.2	787.1	3430.1	643.9	0.2	377.3	210.8	44.2	11.4	10.8	27319.8	7.7
0.89	4264.8	1.1	4.1	1.2	787.0	3430.1	631.2	0.2	377.2	1053.8	83.7	67.6	23.2	27512.1	4.5
0.44 (10 cm)	4264.8	1.1	4.1	1.2	787.1	3430.1	643.9	0.1	377.1	565.0	47.8	6.9	18.2	27602.4	3.0
Riego 2	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ca	K	Mg	Na	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Balance
<b>Vo</b>	<b>mg/L</b>														<b>%</b>
0.25	4264.6	1.1	4.1	1.2	786.9	3430.0	631.2	0.2	377.2	427.3	104.8	202.1	12.6	25008.4	7.8
0.59	4264.5	1.1	4.1	1.2	786.9	3429.7	612.9	0.2	376.9	1187.6	252.1	683.5	22.0	29777.1	7.0
0.77	4264.3	1.1	4.0	1.2	786.8	3430.1	460.8	0.1	348.9	629.9	334.2	1214.8	30.3	30048.0	8.5
0.49 (12.5 cm)	1954.7	0.8	0.0	1.2	153.5	3382.2	0.0	0.0	52.6	594.2	296.8	1023.6	25.9	15758.9	7.9

## ANEXO 9

### Análisis químicos por medio de MEB-EDS

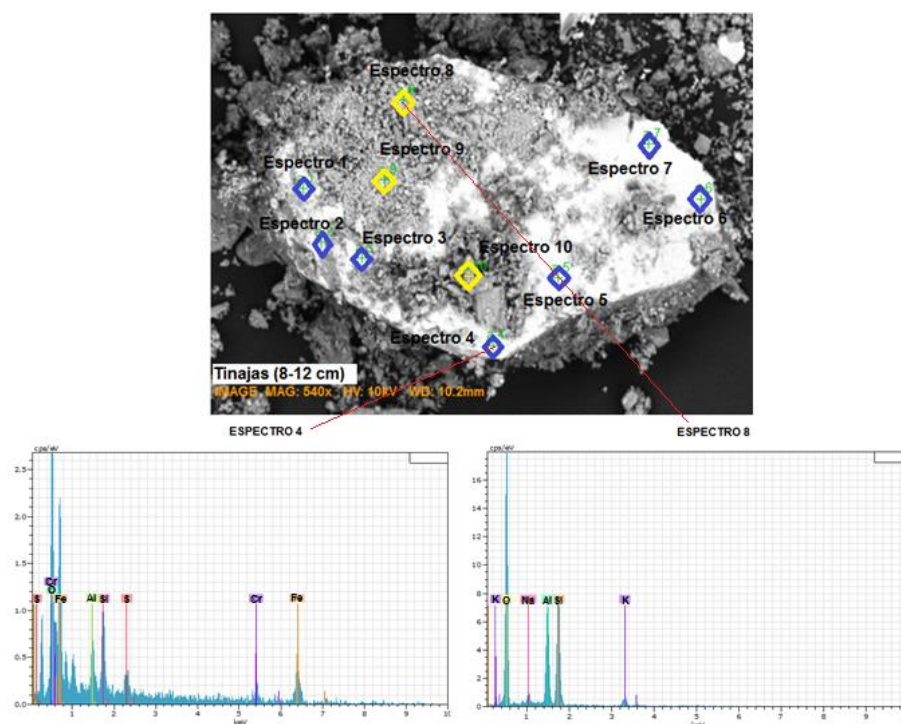


Figura 164. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 8-12 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 113. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 8-12 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)									Total
		Si	O	Fe	Al	As	Cu	Cr	K	Na	
Tinajas (8-12cm)	Espectro 1	1.73	24.05	72.42	1.36	0.44	ND	ND	ND	ND	100
	Espectro 2	2.24	24.57	70.17	3.02	ND	ND	ND	ND	ND	100
	Espectro 3	2.49	24.14	70.71	1.94	ND	0.72	ND	ND	ND	100
	Espectro 4	2.06	2.01	93.25	2.22	ND	ND	0.46	ND	ND	100
	Espectro 5	0.44	49.86	49.02	0.26	ND	ND	0.42	ND	ND	100
	Espectro 6	0.65	22.86	76.15	0.34	ND	ND	ND	ND	ND	100
	Espectro 7	2.05	29.71	65.21	2.49	0.54	ND	ND	ND	ND	100
	Espectro 8	28.41	48.61	ND	16.45	ND	ND	ND	4.6	1.93	100
	Espectro 9	25.05	42.84	18.59	9.05	ND	ND	ND	4.47	ND	100
	Espectro 10	37.01	49.41	ND	8.41	ND	ND	ND	1.72	3.45	100



ANEXO 9

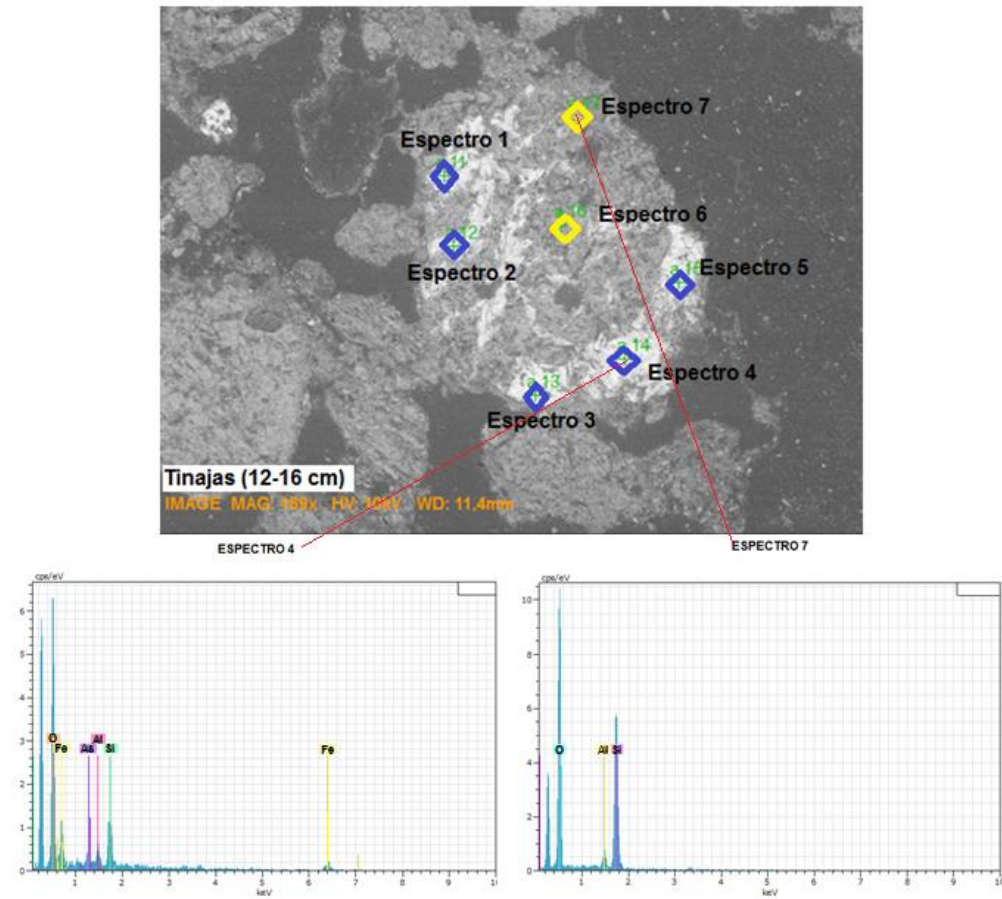


Figura 165. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 12-16 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 114. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 12-16 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)						Total
		Si	O	Fe	Al	As	Cu	
Tinajas (12-16cm)	Espectro 1	8.85	28.96	57.57	3.71	ND	0.91	100
	Espectro 2	9.99	30.82	54.31	4.11	ND	0.77	100
	Espectro 3	9.67	31.78	52.41	5.69	0.45	ND	100
	Espectro 4	7.47	27.95	60.42	3.67	0.49	ND	100
	Espectro 5	7.57	29.25	59.21	3.42	ND	0.55	100
	Espectro 6	40.09	49.51	ND	10.4	ND	ND	100
	Espectro 7	43.92	45.88	ND	10.2	ND	ND	100

ANEXO 9

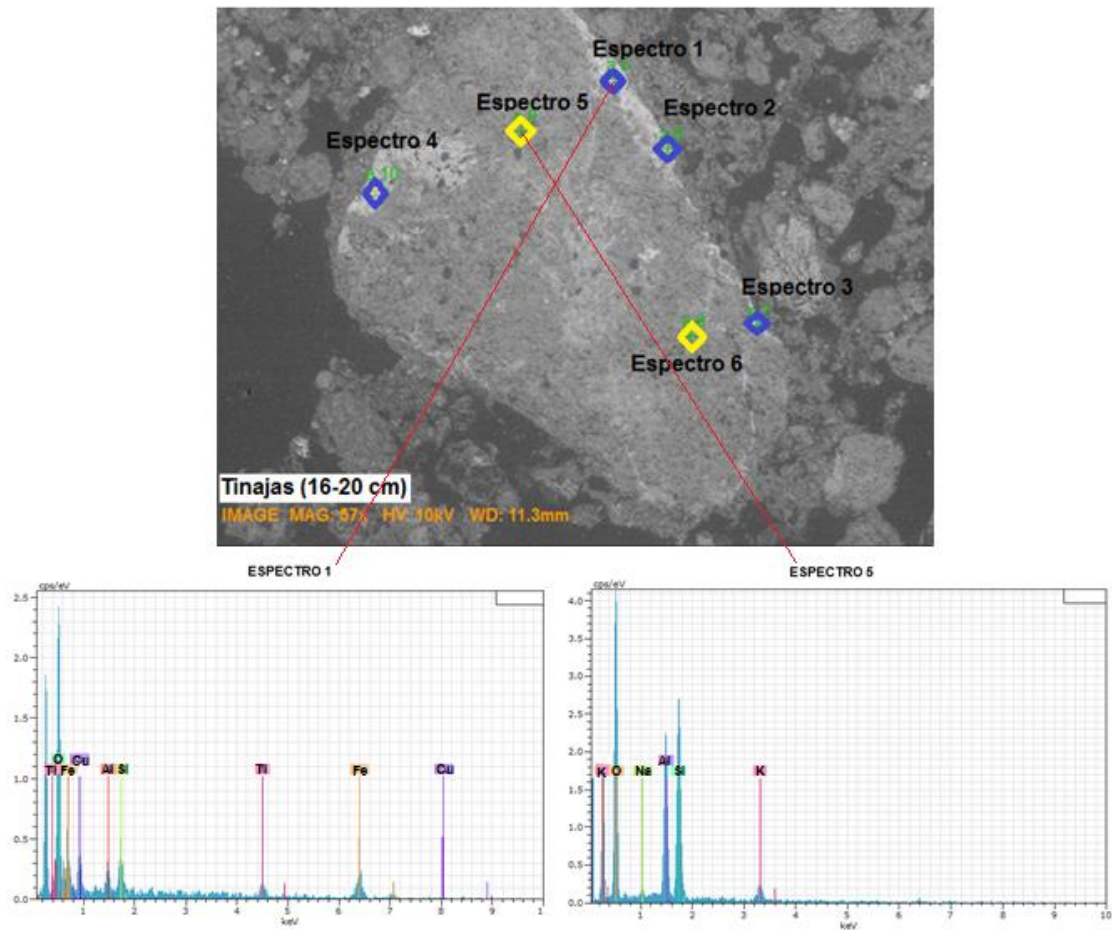


Figura 166. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 16-20 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 115. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Tinajas correspondiente a la profundidad de 16-20 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)										Total
		Si	O	Fe	Al	As	Cu	Na	K	Ti	S	
Tinajas (16-20cm)	Espectro 1	9.01	31.22	52.98	4.74	ND	0.91	ND	ND	1.14	ND	100
	Espectro 2	14.76	34.67	41.68	7.14	ND	0.71	ND	ND	1.04	ND	100
	Espectro 3	10.54	31.99	49.86	5.45	ND	0.75	ND	ND	1.41	ND	100
	Espectro 4	9.07	32.51	50.91	4.93	0.55	ND	ND	ND	ND	2.03	100
	Espectro 5	29.19	48.68	ND	15.76	ND	ND	0.69	5.68	ND	ND	100
	Espectro 6	35.74	49.65	ND	9.94	ND	ND	0.51	4.16	ND	ND	100

ANEXO 9

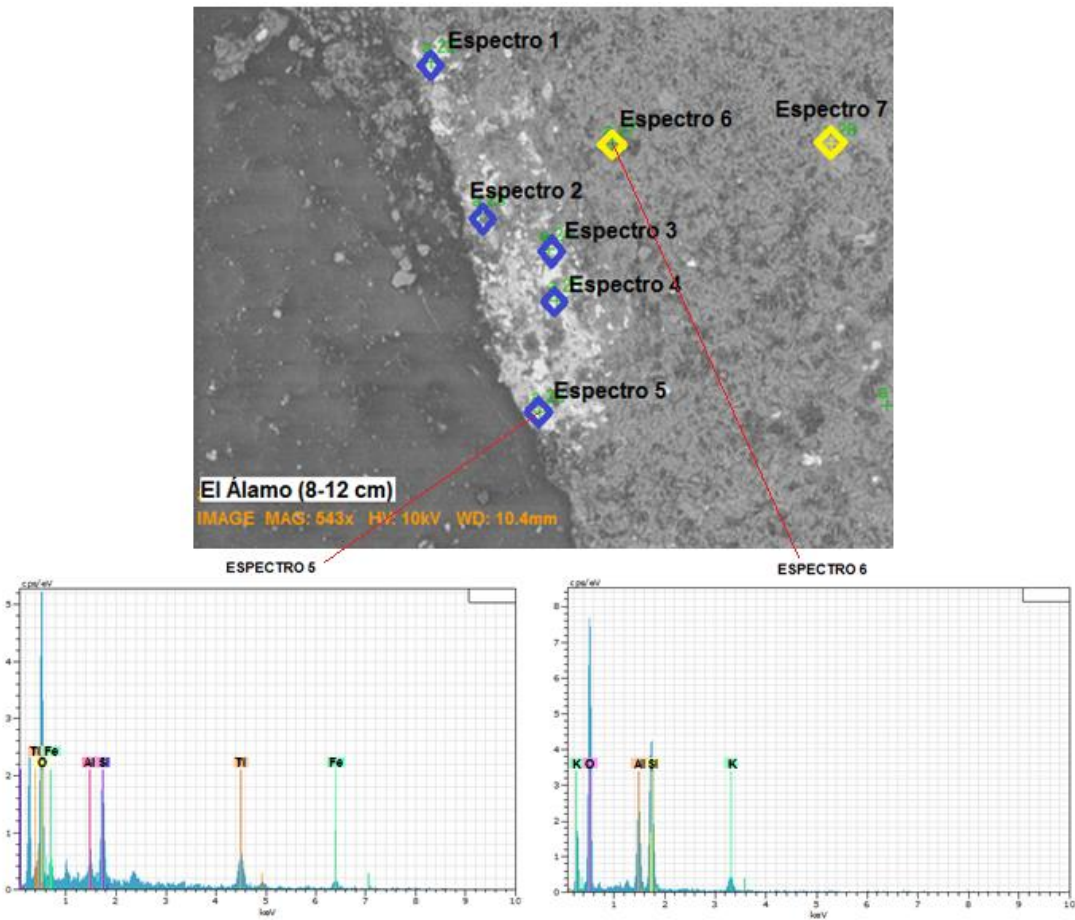


Figura 167. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 8-12 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 116. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 8-12 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)						Total
		Si	O	Fe	Al	Ti	K	
El Álamo (8-12 cm)	Espectro 1	14.41	44.5	14.56	2.53	24	ND	100
	Espectro 2	10.2	39.04	18.31	2.55	29.9	ND	100
	Espectro 3	11.98	39.07	20.57	2.58	25.8	ND	100
	Espectro 4	10.55	38.69	20.39	2.43	27.9	ND	100
	Espectro 5	9.87	39.26	16.85	2.12	31.9	ND	100
	Espectro 6	32.13	48.87	ND	12.23	ND	6.77	100
	Espectro 7	35.67	49	ND	7.63	ND	7.7	100

ANEXO 9

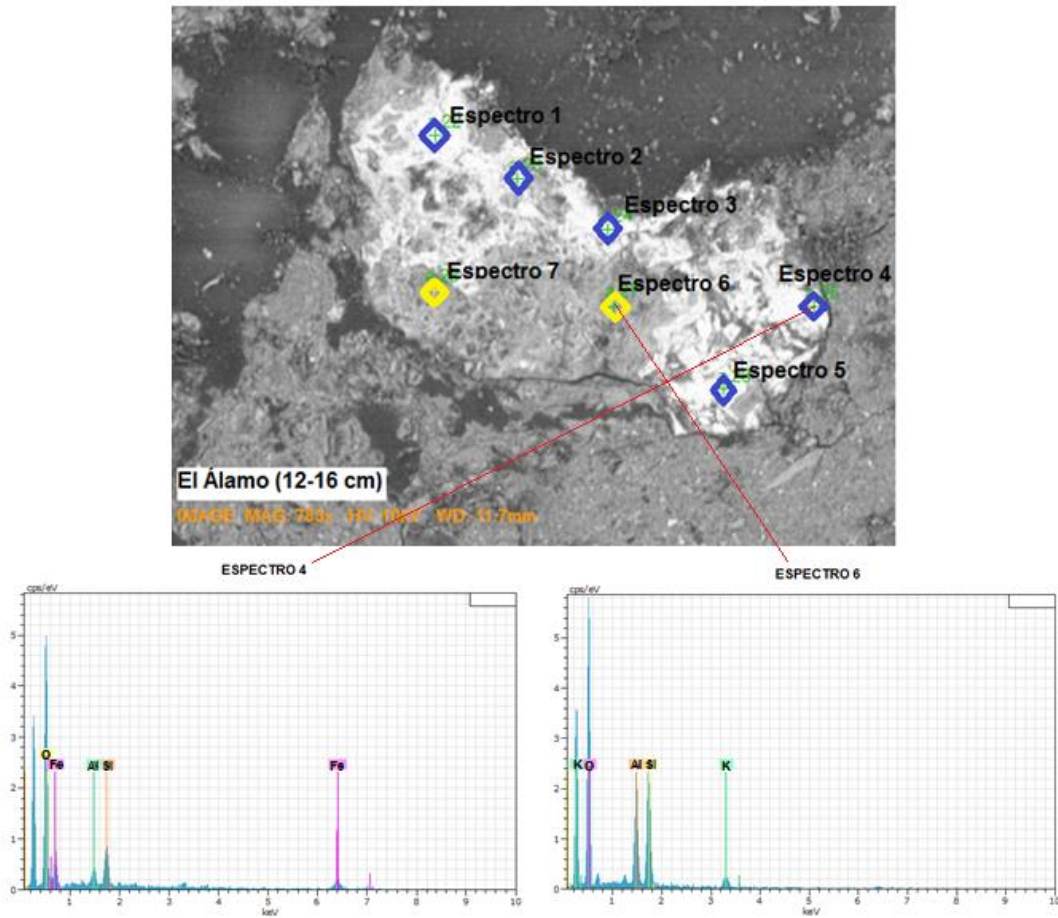


Figura 168. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 12-16 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 117. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 12-16 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)					Total
		Si	O	Fe	Al	K	
El Álamo (12-16 cm)	Espectro 1	7.62	28.67	60.82	2.89	ND	100
	Espectro 2	8.38	29.65	58.07	3.9	ND	100
	Espectro 3	8.96	29.79	57.89	3.36	ND	100
	Espectro 4	8.17	29.24	59.29	3.3	ND	100
	Espectro 5	9.52	30.34	56.4	3.74	ND	100
	Espectro 6	29.62	49.02	ND	15.91	5.45	100
	Espectro 7	29.41	52.14	ND	14.44	4.01	100

ANEXO 9

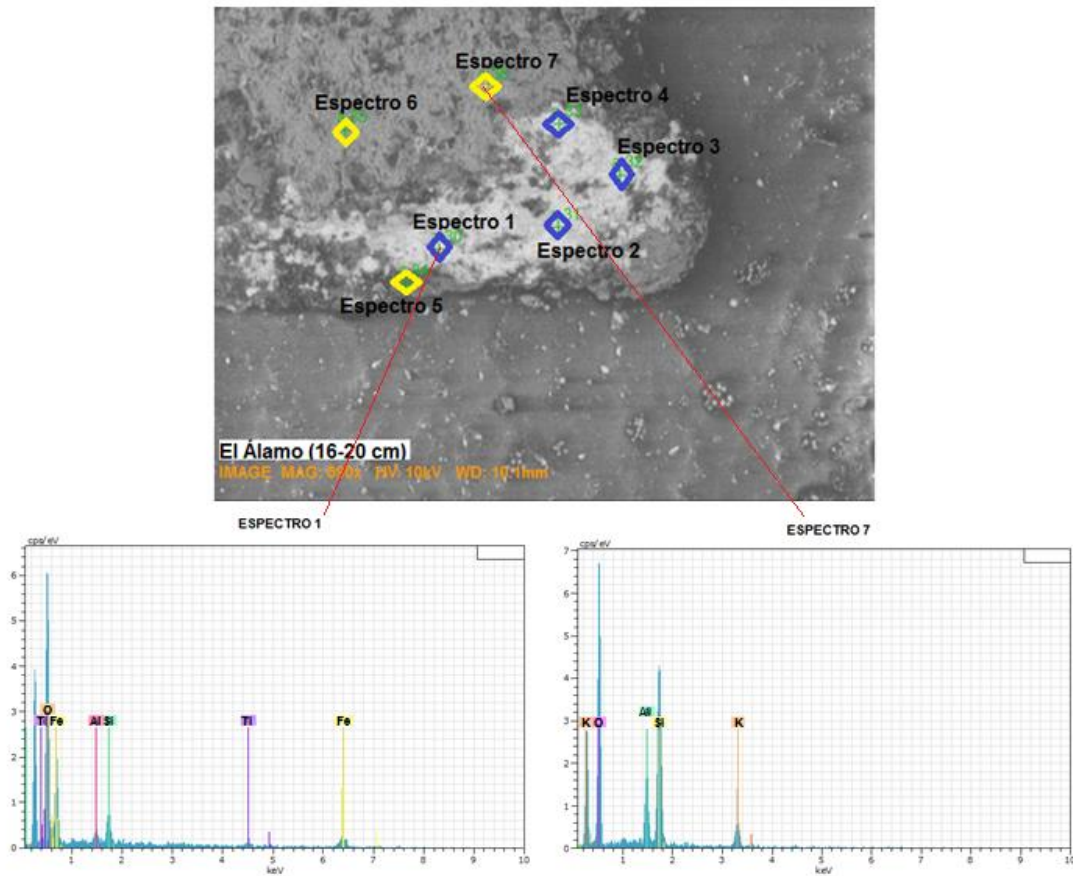


Figura 169. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 16-20 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 118. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento El Álamo correspondiente a la profundidad de 16-20 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)							Total
		Si	O	Fe	Al	Ti	K	Na	
El Álamo (16-20 cm)	Espectro 1	6.06	28.79	57.7	1.7	5.75	ND	ND	100
	Espectro 2	6.04	28.16	60.34	1.55	3.91	ND	ND	100
	Espectro 3	5.03	28.08	59.57	1.76	5.56	ND	ND	100
	Espectro 4	7.97	30.92	51.21	2.47	7.43	ND	ND	100
	Espectro 5	34.5	50.99	ND	12.27	ND	ND	2.24	100
	Espectro 6	34.35	47.04	ND	9.19	ND	9.42	ND	100
	Espectro 7	7.97	30.92	51.21	2.47	7.43	ND	ND	100

ANEXO 9

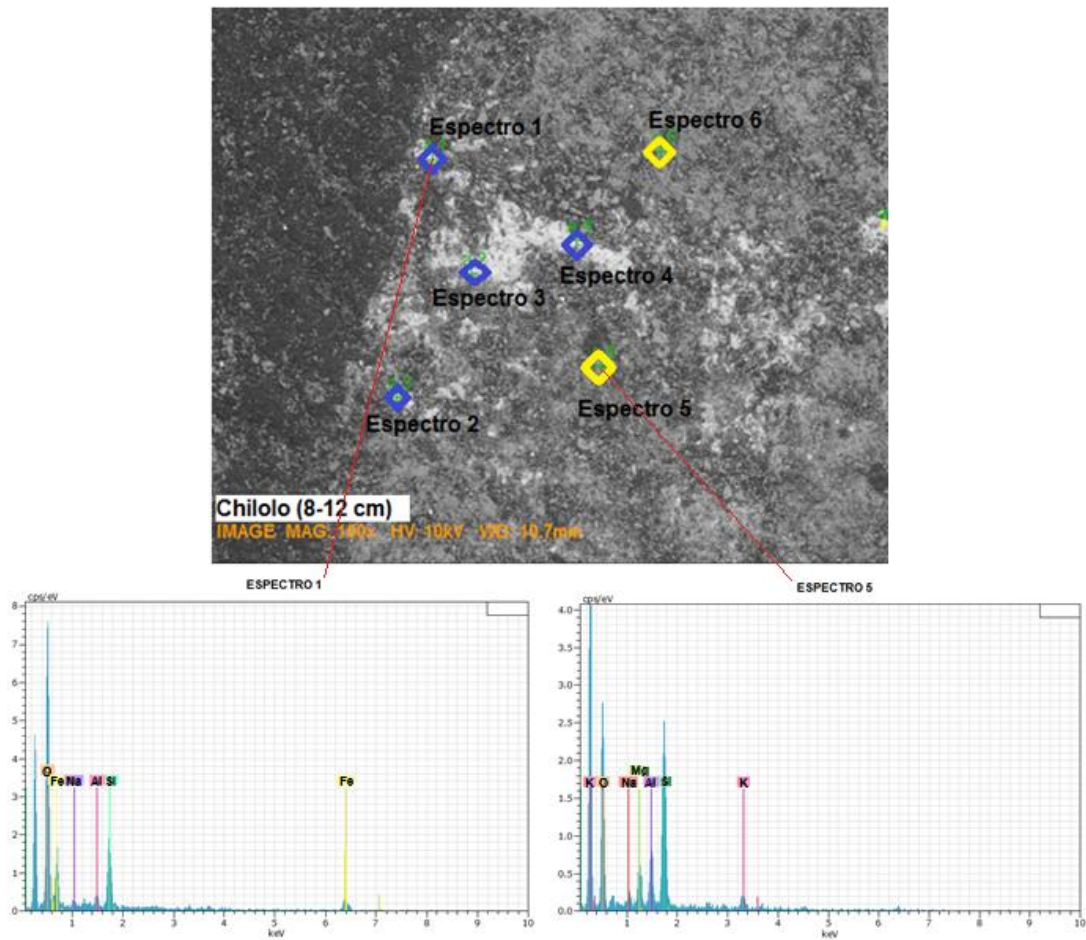


Figura 170. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 8-12 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 119. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 8-12 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)							Total
		Si	O	Fe	Al	Na	K	Mg	
Chilolo (8-12 cm)	Espectro 1	12.14	29.7	54.49	2.97	0.7	ND	ND	100
	Espectro 2	11.72	30.1	54.79	2.01	1.38	ND	ND	100
	Espectro 3	15.27	32.35	47.94	2.97	1.47	ND	ND	100
	Espectro 4	12.9	31.62	52.75	1.59	1.14	ND	ND	100
	Espectro 5	32.11	48.56	ND	7.85	1.42	5.22	4.84	100
	Espectro 6	29.1	49.17	ND	9.5	2.25	5.77	4.21	100

ANEXO 9

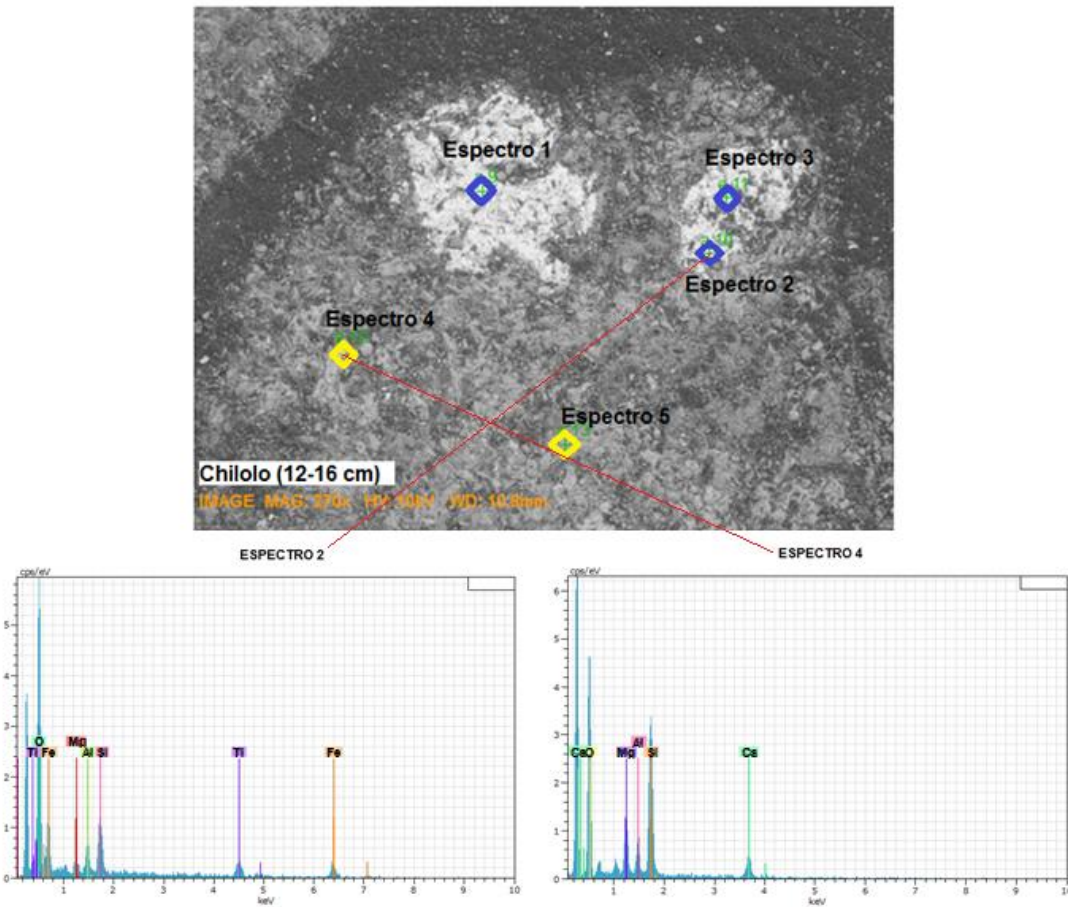


Figura 171. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 12-16 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 120. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 12-16 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)								Total
		Si	O	Fe	Al	Ti	Na	Ca	Mg	
Chilolo (12-16 cm)	Espectro 1	7.77	31	50.51	2.47	5.53	ND	ND	2.72	100
	Espectro 2	9.21	31.14	52.01	2.95	2.97	ND	ND	1.72	100
	Espectro 3	7.99	32.48	44.53	2.74	11	ND	ND	1.29	100
	Espectro 4	29.9	47.01	ND	2.84	ND	1.01	12.15	7.09	100
	Espectro 5	29.7	47.77	ND	11.91	ND	2.74	4.91	2.97	100

ANEXO 9

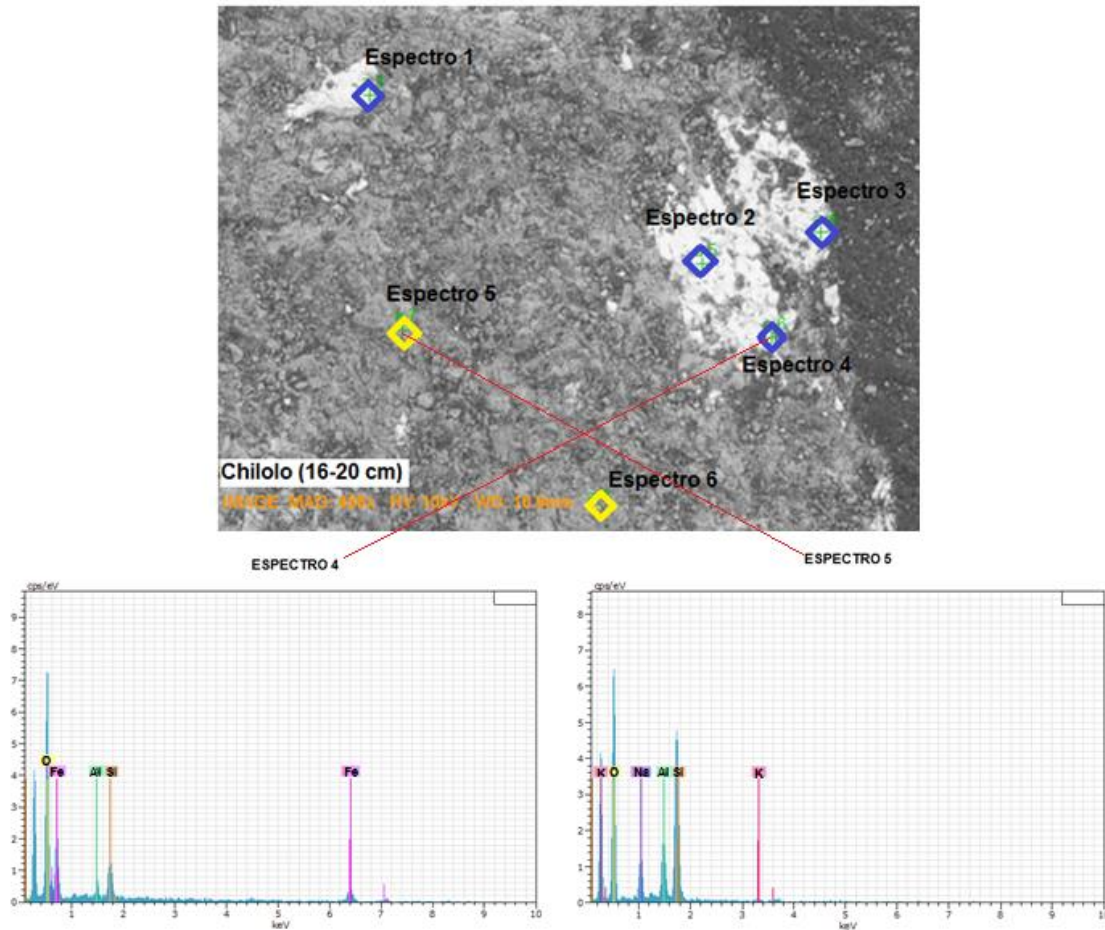


Figura 172. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 16-20 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 121. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del sedimento Chilolo correspondiente a la profundidad de 16-20 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)						Total
		Si	O	Fe	Al	Na	K	
Chilolo (16-20 cm)	Espectro 1	11.02	30.67	55	2.27	1.04	ND	100
	Espectro 2	7.42	27.77	59.95	2.79	2.07	ND	100
	Espectro 3	9.62	27.64	61.29	1.45	ND	ND	100
	Espectro 4	10.77	29.71	57.45	2.07	ND	ND	100
	Espectro 5	34.07	49.09	ND	7.7	6.94	2.2	100
	Espectro 6	34.75	47.49	ND	7.67	2.4	7.69	100



ANEXO 9

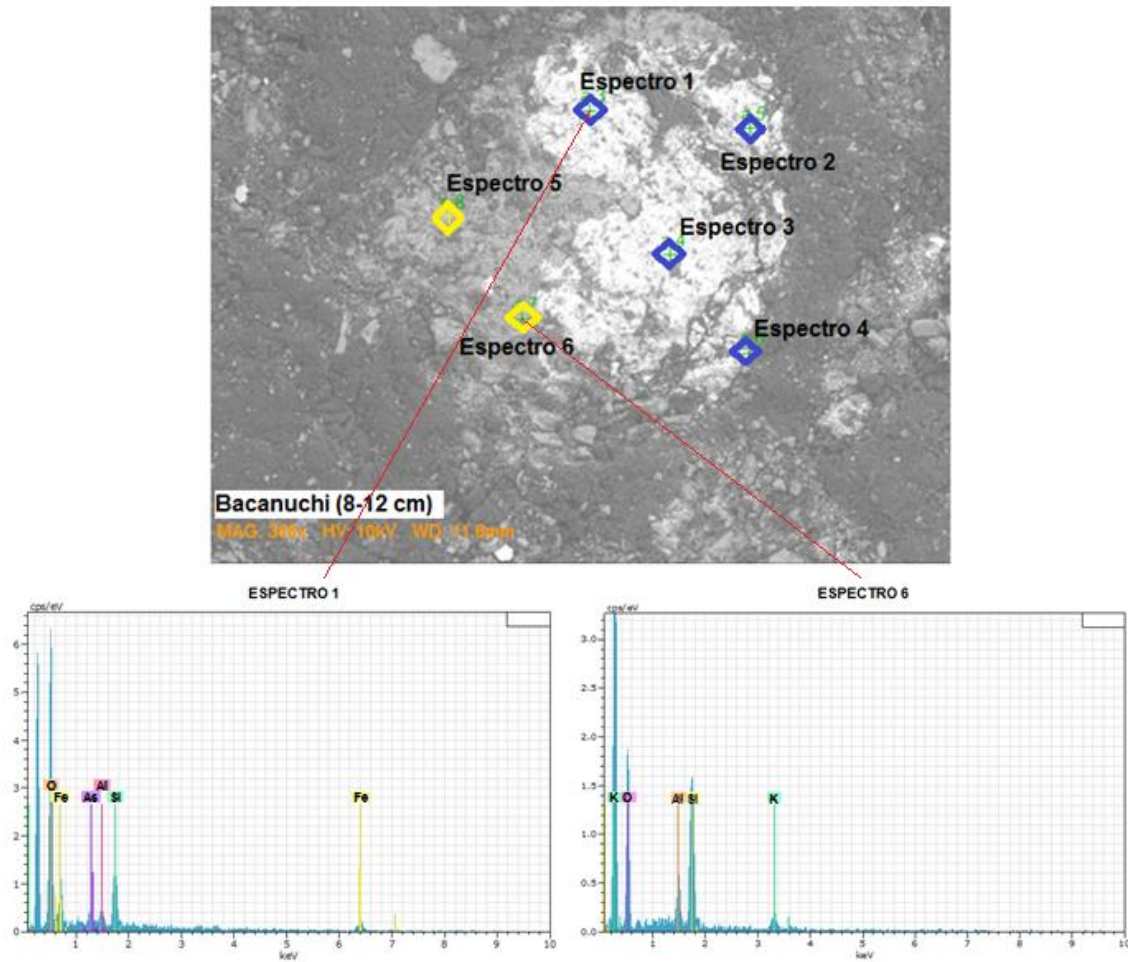


Figura 173. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 8-12 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 122. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 8-12 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)							Total
		Si	O	Fe	Al	Cu	As	K	
Bacanuchi (8-12 cm)	Espectro 1	9.4	29.12	59.59	1.57	ND	0.32	ND	100
	Espectro 2	6.96	27.6	63.9	1.54	ND	ND	ND	100
	Espectro 3	7.37	27.99	62.24	1.7	0.41	0.29	ND	100
	Espectro 4	10.19	30.11	57.05	2.29	ND	0.36	ND	100
	Espectro 5	37.29	47.62	ND	9.12	ND	ND	5.97	100
	Espectro 6	36.29	49.62	ND	7.87	ND	ND	6.22	100

ANEXO 9

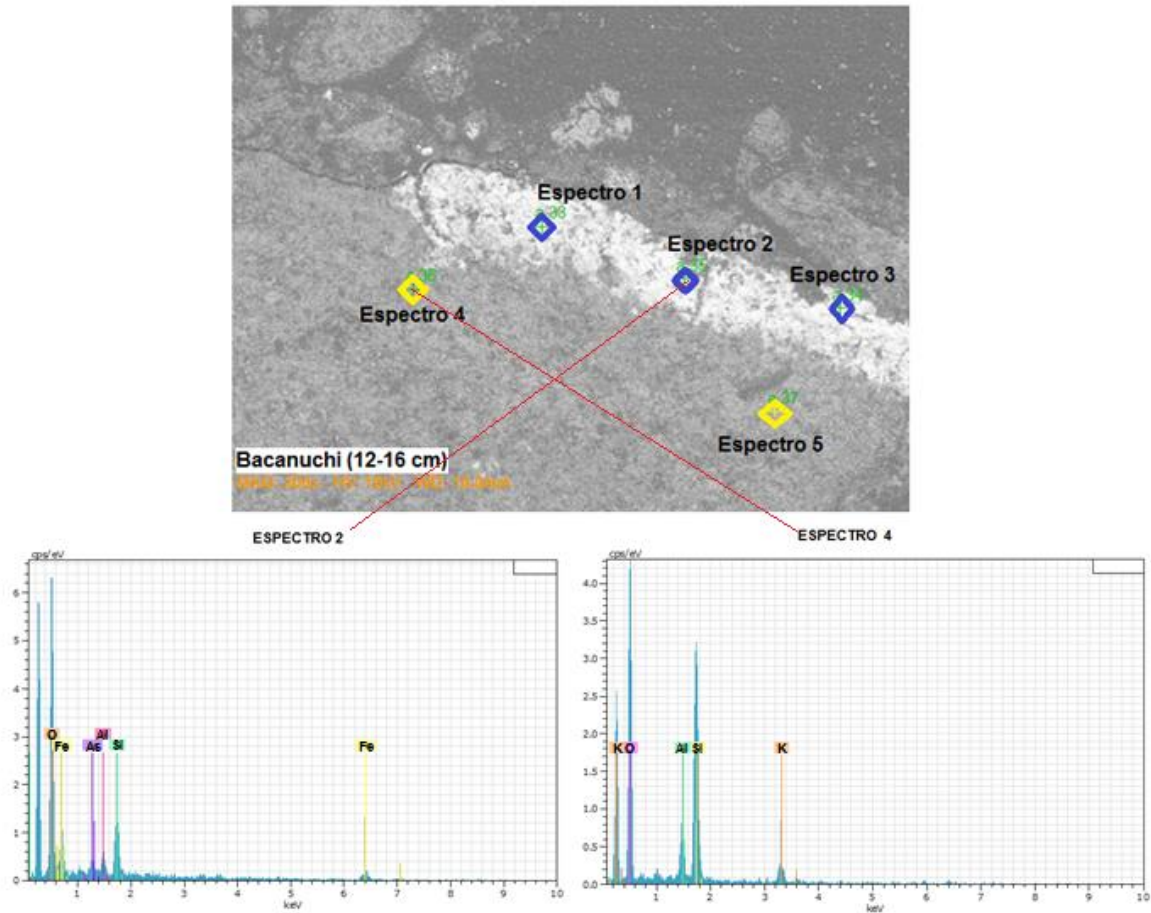


Figura 174. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 12-16 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 123. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 12-16 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)						Total
		Si	O	Fe	Al	As	K	
Bacanuchi (12-16 cm)	Espectro 1	11.43	31.2	54.12	2.88	0.37	ND	100
	Espectro 2	10.31	30.19	56.54	2.61	0.35	ND	100
	Espectro 3	9.9	30	57.04	2.65	0.41	ND	100
	Espectro 4	34.74	48.85	ND	9	ND	7.41	100
	Espectro 5	37.24	49.61	ND	6.54	ND	6.61	100

ANEXO 9

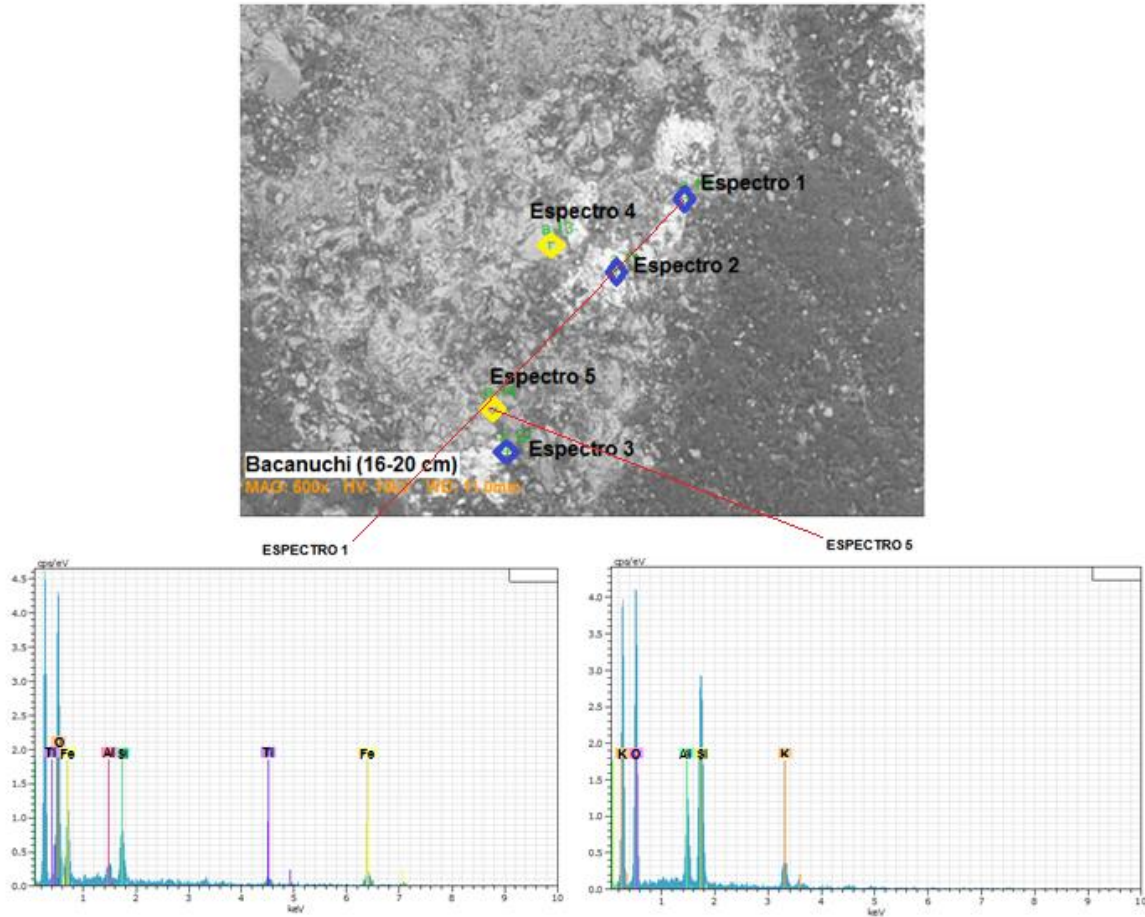


Figura 175. Microfotografía y espectros de emisión de electrones de la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 16-20 cm. En rombos azules se muestran los puntos analizados correspondientes a los precipitados rojizos identificados en la sección 5.3.10. Los rombos amarillos representan los puntos analizados correspondientes a los cristales en donde se presentan los precipitados rojizos.

Tabla 124. Análisis químico por medio de MEB-EDS en la sección delgada del suelo Bacanuchi correspondiente a la profundidad de 16-20 cm. ND: No Detectado.

	# de espectro	Elementos (%)						Total
		Si	O	Fe	Al	Ti	K	
Bacanuchi (16-20 cm)	Espectro 1	15.27	29.47	49.52	4.52	1.22	ND	100
	Espectro 2	16.41	27.9	50.01	4.69	0.99	ND	100
	Espectro 3	15.93	27.94	51.1	4.11	0.92	ND	100
	Espectro 4	33.61	47.84	ND	8.4	ND	10.2	100
	Espectro 5	32.75	47.16	ND	7.9	ND	12.2	100

## ANEXO 10

### MAPEO ELEMENTAL MEDIANTE MICROSONDA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

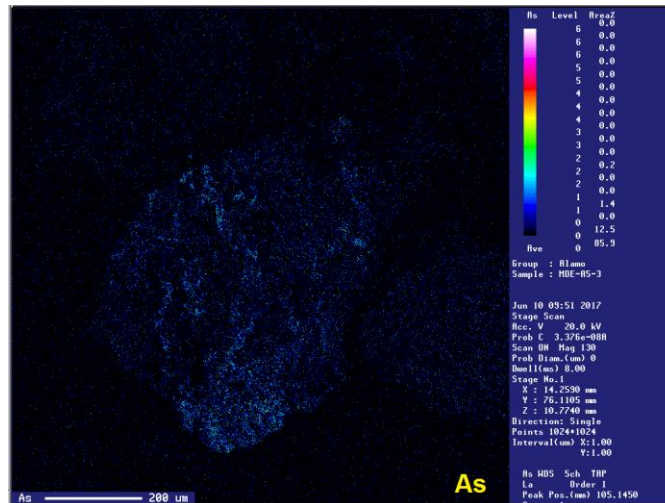


Figura 176. Mapeo elemental de As en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.

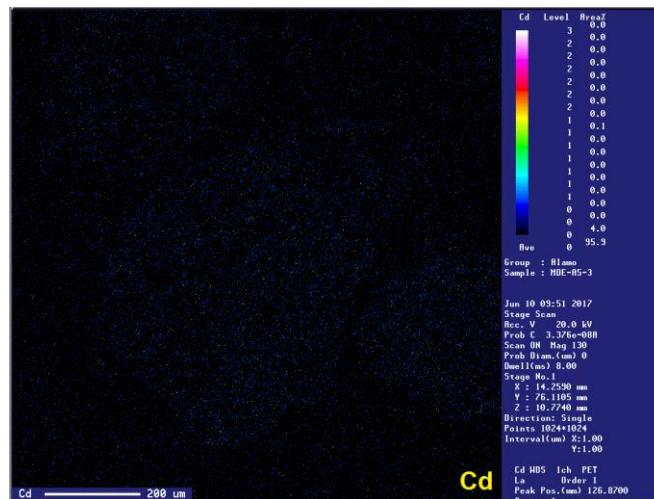


Figura 177. Mapeo elemental de Cd en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.

ANEXO 10

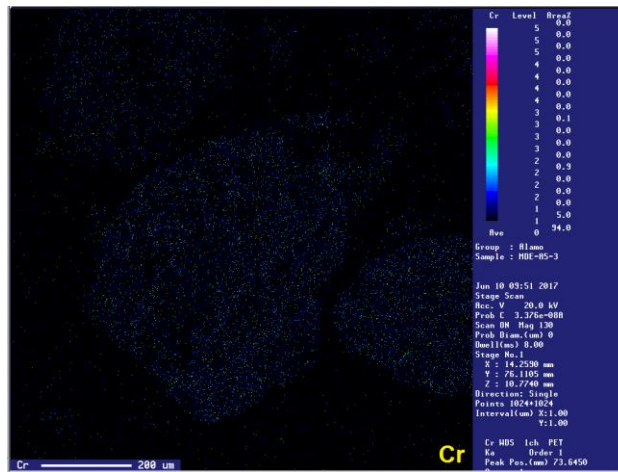


Figura 178. Mapeo elemental de Cr en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.

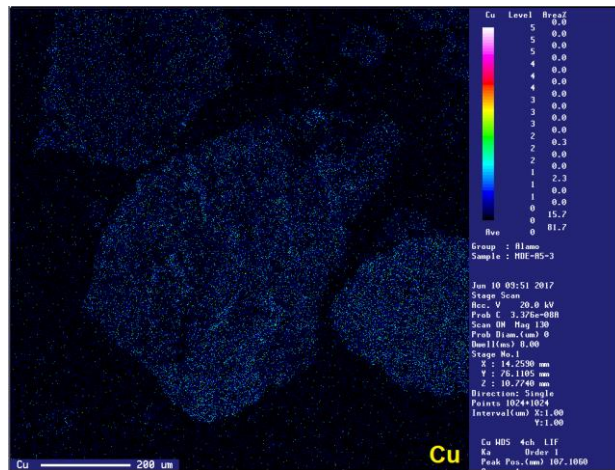


Figura 179. Mapeo elemental de Cu en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.

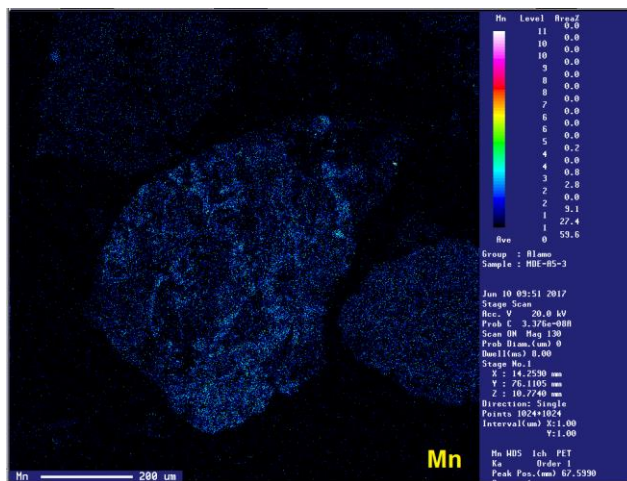


Figura 180. Mapeo elemental de Mn en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.

ANEXO 10

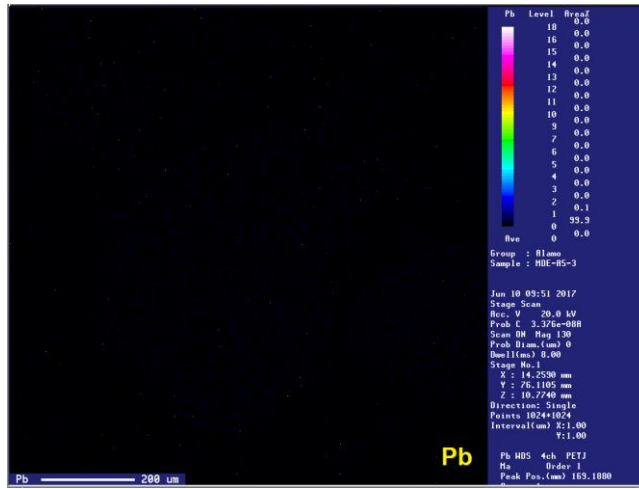


Figura 181. Mapeo elemental de Pb en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.

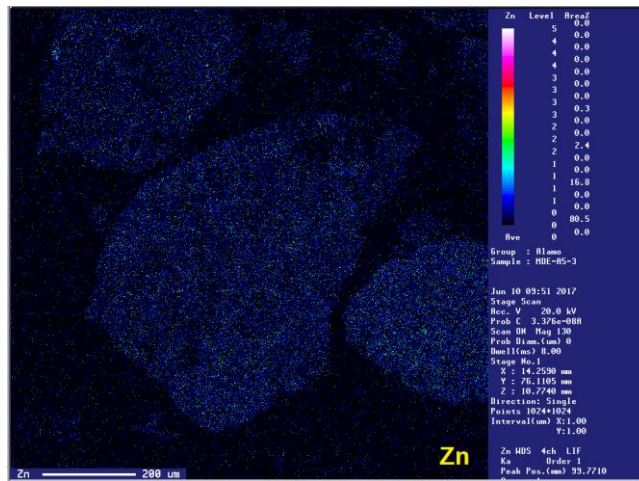


Figura 182. Mapeo elemental de Zn en la sección de sedimento El Álamo en el intervalo 4-8 cm.

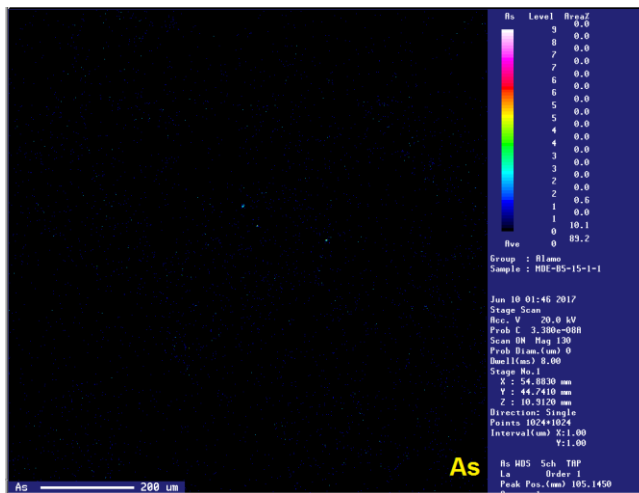


Figura 183. Mapeo elemental de As en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.

ANEXO 10

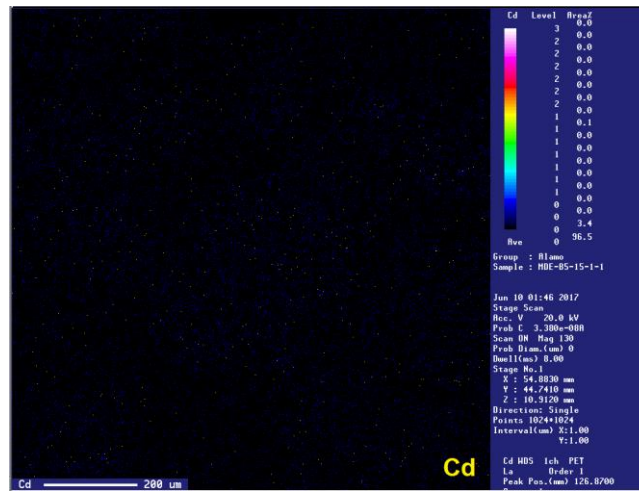


Figura 184. Mapeo elemental de Cd en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.

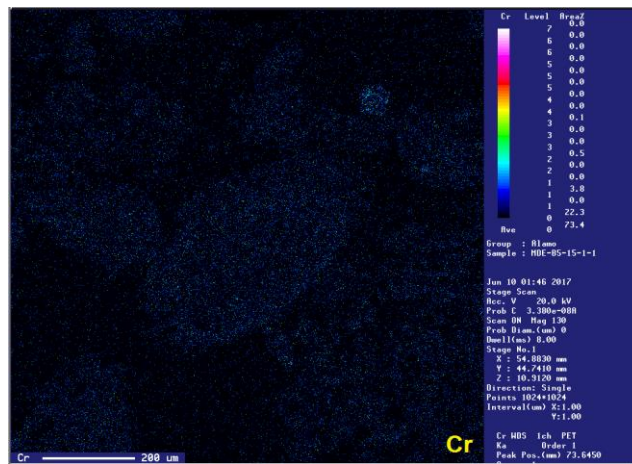


Figura 185. Mapeo elemental de Cr en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.

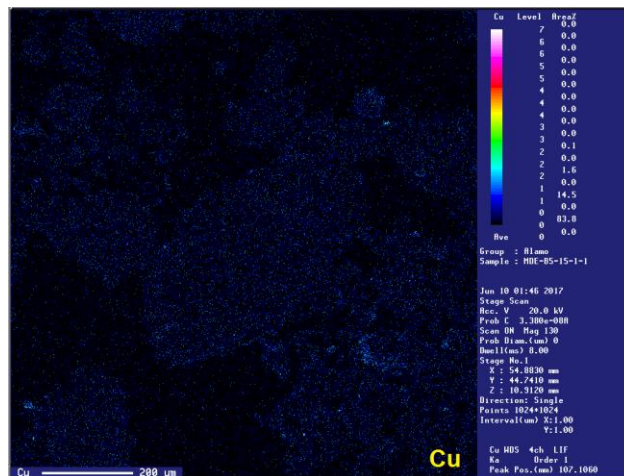


Figura 186. Mapeo elemental de Cu en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.

ANEXO 10

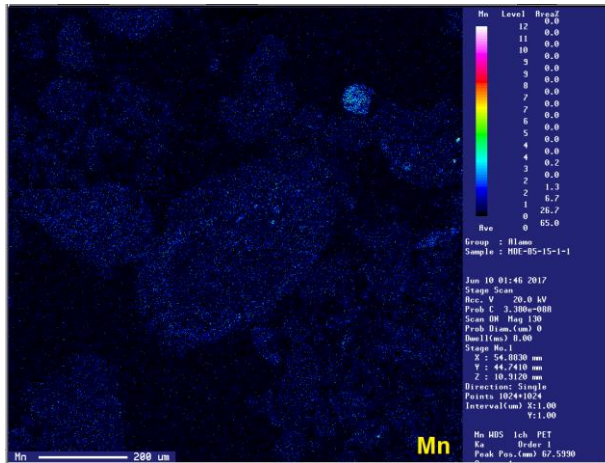


Figura 187. Mapeo elemental de Mn en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.

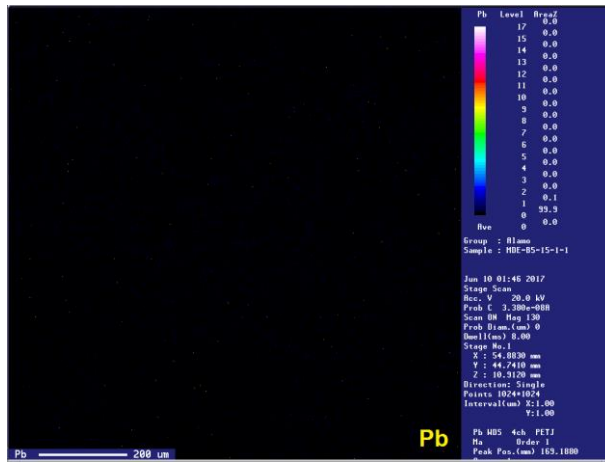


Figura 188. Mapeo elemental de Pb en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.

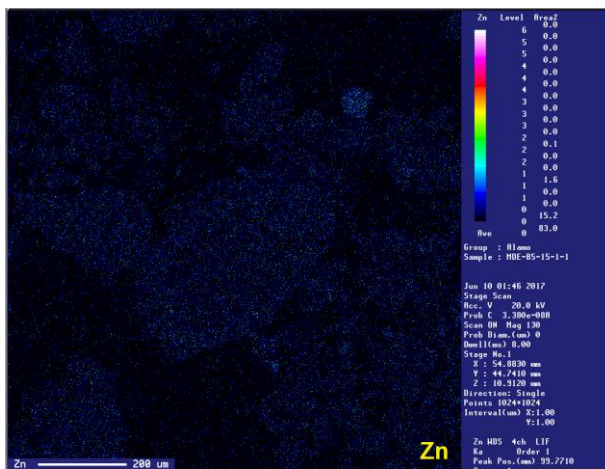


Figura 189. Mapeo elemental de Zn en la sección de suelo Bacanuchi en el intervalo 12-16 cm.