

ANÁLISIS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA Y DIFRACCIÓN DE RAYOS-X DE LOS LODOS GENERADOS EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA DURANTE SU TRATAMIENTO

Martín Piña Soberanis, Luciano Sandoval Yoal, Laura O. Sánchez Guzmán y Leticia Montellano Palacios

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, 62550 Jiutepec, Mor.
Tel (7) 319 42-99, 319-40-00 ext. 411, Fax: (7) 319-43-81
E-mail: mpina@chac.imta.mx

RESUMEN

La reducción del volumen del lodo generado en las plantas potabilizadoras, se logra mediante tratamientos de espesamiento por gravedad, acondicionamiento con polímero y acidificación.

Se utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y la difracción de rayos-X para estudiar posibles cambios morfológicos y de composición de los lodos durante su tratamiento, además se determinó el método más apropiado de secado del lodo previo a su análisis.

El análisis elemental obtenido por el MEB mostró variaciones en el porcentaje en peso de los constituyentes del lodo por la adición del polímero y el ácido sulfúrico empleados en su acondicionamiento.

Por medio de micrografías se observaron variaciones en la morfología del lodo al ser acondicionados con los polímeros.

En el estudio de difracción por rayos-X, se encontró que los lodos están constituidos principalmente por arcilla tipo *halloysita* y su estructura no se altera por los tratamientos empleados.

1. INTRODUCCIÓN

Los lodos que se generan por la remoción de los sólidos suspendidos presentes en el agua cruda durante la potabilización, representan entre el 0.3 al 1% del agua tratada, los cuales en nuestro País se disponen sin tratamiento en presas, terrenos o en las mismas fuentes de suministro ocasionando daños al medio ambiente, y en algunos casos son descargados al alcantarillado municipal y tratados conjuntamente con las aguas residuales.

Uno de los principales problemas que presentan estos lodos es su alto contenido de agua, dificultando así su manejo y disposición.

Dentro de los tratamientos que se utilizan para reducir su volumen eliminando gran parte del contenido de agua, se encuentra el acondicionamiento químico, el cual emplea polímeros, ácidos y bases. Para tal efecto, es importante conocer las características del lodo antes de su acondicionamiento para que de esta forma se logre optimizar el uso de dichos reactivos químicos.

Los procesos de tratamiento empleados consistieron en un espesamiento por gravedad, acondicionamiento químico mediante la aplicación de tres tipos de polímeros, aniónico, catiónico y no iónico y finalmente una acidificación.

Algunas de las propiedades físicas del lodo utilizadas para evaluar la efectividad de los agentes empleados en el acondicionamiento, se encuentra la resistencia específica a la filtración y el tiempo a la filtración, y como propiedad fisicoquímica el porcentaje de humedad. Se empleó la microscopía electrónica de barrido y la difracción de rayos-X para determinar cambios morfológicos, composición elemental y estructura cristalina de los lodos durante su tratamiento.

2. TEORÍA

2.1 Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

Un microscopio es un sistema óptico que magnifica objetos pequeños para examinarlos con luz natural o luz emitida de una fuente artificial, en el microscopio electrónico, en lugar de luz se utiliza un haz electrónico para formar la imagen.

Un MEB tiene un rango de aumentos de 10 a 180,000 X y junto con detectores de rayos X, hace posible identificar minerales muy pequeños y examinar la forma y distribución de éstos (Reyes, 1997).

2.1.1 Funcionamiento

El MEB consiste de una columna óptica y una consola electrónica. La primera cuenta con una cámara que está a alto vacío (aproximadamente 2×10^{-6} torr) donde se coloca la muestra que se va a analizar. La imagen del microscopio es formada por un haz de electrones dirigido hacia la muestra, dicho haz es generado a partir de un cañón electrónico, el cual tiene como cátodo un filamento de tungsteno que se calienta mediante un sistema de emisión termoiónica a una temperatura que excede los 2,700 °K, este filamento emite electrones en abundancia que producen un alto potencial negativo con respecto al ánodo, que son rápidamente acelerados hacia el mismo a través de la

columna electrónica. El haz de electrones pasa por dos o tres lentes condensadores electromagnéticos cuya función es disminuir el diámetro del haz.

Cualquier radiación desde la muestra puede ser usada para proporcionar una señal y cada una de éstas es el resultado de alguna interacción entre los electrones incidentes y la muestra, proporcionando diferente información (Reyes, 1997).

2.1.2 MEB y microanálisis

El objetivo del microanálisis es obtener análisis químicos de una pequeña cantidad de material del orden de un micrómetro cúbico. Cuando la materia es bombardeada por electrones de alta energía, los átomos de cada elemento emiten un espectro característico de rayos X. Con los detectores adecuados se pueden obtener análisis cualitativos y cuantitativos, éstos últimos, comparando las intensidades de cada elemento de la muestra desconocida con intensidades de elementos de referencia (estándares).

Existen dos técnicas de rayos X usadas en el microanálisis: *Espectrofotometría de energía dispersiva (EED)* y *Espectrofotometría de longitud de onda dispersiva (ELOD)*. La diferencia fundamental entre éstas técnicas está en los detectores usados para medir la intensidad de rayos-X. (Reyes, 1997).

2.1.3 Preparación de la muestra

Debido a que existe una gran variedad de campos de aplicación del MEB, hay muchos tipos de muestras que pueden ser observadas. Por lo tanto, se han desarrollado diversas técnicas de preparación que dependen del objetivo de la investigación. En general, las muestras a analizar por MEB son relativamente fáciles de preparar, uno de los requerimientos es el tamaño, que puede ser desde muy pequeño hasta 7 cm o tres veces más en los equipos más modernos. Sin embargo, para cada caso se deben tomar en consideración tres aspectos importantes: 1) La muestra debe estar limpia y seca, 2) se debe mantener la morfología original y 3) no debe tener cargas electrostáticas.

Todas las técnicas de secado causan cambios dimensionales pudiendo alterar la construcción original de la muestra. El agua puede ser removida por secado al aire, o a pasos graduales. El daño puede ser reducido si el agua es reemplazada por un fluido volátil que tenga una superficie de tensión menor a la del agua.

Los métodos más importantes de remoción de humedad hasta el momento son el congelado-secado y secado a punto crítico, y se utilizan principalmente en materiales biológicos, arcillas y zeolitas, con la finalidad de conservar la microestructura.

Para que la muestra adquiera características conductivas y se obtenga una imagen clara en el MEB, debe ser adherida a una cinta de carbón y fijada a un soporte con pasta de plata, posteriormente se debe recubrir con un metal, como oro, aluminio, plata o carbón

mediante una ionizadora o evaporadora, esto evitará que se carguen con energía estática y se polarizen.

2.2 Identificación de minerales arcillosos mediante difracción de rayos X

Mediante la difracción de rayos-X se pueden determinar estructuras cristalinas de composición química compleja y de baja simetría (Kraus, *et al.*, 1965).

La imperfección cristalina natural de los materiales muestran diversos patrones de difracción de rayos X, que se representan en forma de bandas o líneas que al ser medidas con exactitud dan información acerca de los defectos estructurales (Brindley y Brown, 1980).

La selección del tipo de radiación depende de la composición de la muestra y el objetivo del estudio. Para el análisis de difracción por rayos X normalmente se utilizan radiaciones de Cu, Co, Fe y Cr, cada uno de ellos tiene diferente poder de difracción al poseer longitudes de onda características, donde las de Cu son las más utilizadas en análisis de arcillas (Brindley y Brown, 1980).

Las muestras que se analizan mediante difractómetro deben estar orientadas. Muchos minerales de arcilla tienen generalmente una forma plana y pueden ser fácilmente orientadas.

3. METODOLOGÍA

3.1 Microscopio electrónico de barrido

Los tratamientos propuestos para reducir el volumen de lodo consistieron en una combinación de los procesos de espesamiento, acondicionamiento y acidificación. El objetivo fue evaluar la influencia del tipo de tratamiento y del polímero en la deshidratación del lodo para reducir su volumen y recuperar el coagulante.

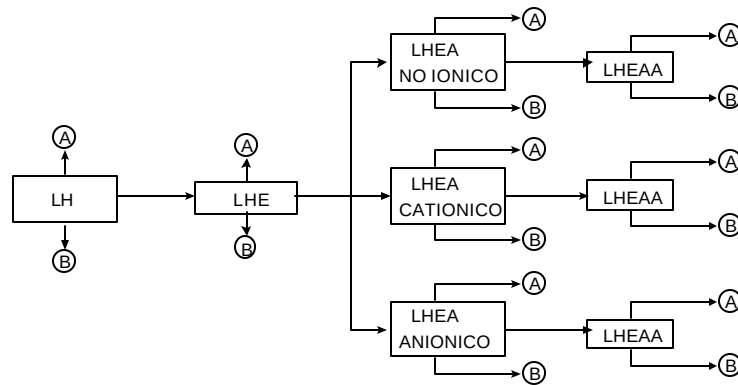
Se trabajó con el lodo proveniente de la planta potabilizadora de “Los Berros”, del sistema Cutzamala, Edo. de México, de la caja de recepción de lodos de los módulos de tratamiento B y C, denominado lodo homogéneo (LH). Dicha planta utiliza sulfato de aluminio como coagulante.

El lodo resultante del espesamiento se le llamó “lodo homogéneo espesado” (LHE), del acondicionamiento con polímeros aniónico, catiónico y no iónico “lodo homogéneo espesado acondicionado” (LHEA) y de la acidificación “lodo homogéneo espesado acondicionado acidificado” (LHEAA), los cuales fueron analizados por medio de un

microscopio electrónico de barrido, para cuantificar sus componentes y observar su morfología en cada tratamiento.

3.1.1 Preparación de las muestras

Se requirió que las muestras estuvieran libres de agua para ser analizadas por MEB, para tal efecto se establecieron dos métodos de secado que pierden el agua en forma controlada: el secado térmico y liofilización. En la Figura 3.1 se presenta el esquema de obtención de muestras.



Tratamiento de las muestras para su análisis con MEB:

Ⓐ Secado térmico = Pérdida del agua por evaporación a temperatura controlada (105 °C)

Ⓑ Liofilización = Pérdida del agua por sublimación con vacío (centrifugación-congelamiento-sublimación)

Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso y generación de muestras

3.1.1.1 Secado térmico

Se colocó el platillo de aluminio dentro de la balanza de humedad y se taró a temperatura ambiente, se colocó en el platillo una muestra de lodo (15 a 20 g) y se secó a una temperatura constante (103 a 105 °C) durante tres horas.

3.1.1.2 Liofilización

Se centrifugaron muestras de lodo de 50 mL durante 15 minutos a 2500 rpm, se colocó el lodo en un congelador a -30° C, se retiró el sedimento del congelador y se colocó en los frascos para liofilizadora. Una vez alcanzada la temperatura de -100°C, se encendió el vacío (10 micras de Hg). Se dejaron los frascos en la liofilizadora hasta que el sedimento se secó completamente (36 a 48 horas).

En el secado térmico y liofilización, el sedimento deshidratado se colocó en una placa de aluminio mediante un adhesivo de carbón y finalmente fueron recubiertas con oro-paladio para que adquirieran características conductivas.

3.1.2 Determinaciones en MEB

Se colocó la muestra en la cámara de vacío del MEB.

Se tomaron micrografías a 100 X, 1500 X, 3600 X y 12000 X.

Se realizó un microanálisis general abarcando la mayor área posible

3.2 Difracción de rayos X

El análisis mineralógico por difracción de rayos X se realizó con la finalidad de identificar el tipo de arcilla presente en el lodo.

Se utilizó un difractómetro Siemens D-500 con radiación filtrada de cobre.

El generador de rayos X se mantuvo a 30 mA y 30 kV.

Para obtener la fracción arcillosa se emplearon la dispersión por ultrasonido y la separación por gravedad.

El sedimento de cada muestra se distribuyó sobre placas de vidrio para obtener láminas orientadas.

Estas láminas se analizaron en su forma normal a temperatura ambiente (2 a 45 grados de orientación), y saturadas en atmósfera de etilenglicol (2 a 18 grados de orientación).

Adicionalmente, con el objeto de distinguir la presencia de ciertos minerales, las muestras se calentaron a 300 y 550 °C y se analizaron.

4. RESULTADOS

4.1 Microscopio electrónico de barrido

4.1.1 Preparación de muestras

Con la finalidad de establecer cual es el tratamiento más adecuado para la eliminación del agua en las muestras analizadas por MEB, se realizó una comparación de los métodos de liofilización y secado térmico, mediante el análisis de la composición elemental y la observación morfológica de los lodos.

En las Tabla 4.1 y 4.2 se presentan los resultados obtenidos del porcentaje en peso de los elementos presentes en los diferentes tipos de lodos. La Figura 4.1 muestra micrografías de la morfología obtenida por cada tratamiento.

Tabla 4.1 Resultados del análisis elemental en muestras secadas por liofilización

Peso (%)	LH	LHE	LHEA Aniónico	LHEAA Aniónico	LHEA Catiónico	LHEAA Catiónico	LHEA No iónico	LHEAA No iónico
C	26.85	30.13	15.30	21.35	28.17	31.44	21.72	28.72
O	49.35	44.81	46.86	47.35	52.03	45.97	46.55	43.97
Na	0.46		0.30	0.30		0.25	0.43	0.12
Mg	0.17	0.13	0.21	0.14	0.18	0.16	0.14	0.11
Al	10.79	10.82	15.12	10.20	9.11	7.02	10.02	9.78
Si	9.91	9.87	14.31	14.62	8.29	10.36	13.53	11.75
Cl	0.10	0.17	0.12	0.33	0.16	0.15	0.22	0.18
K	0.27	0.35	0.69	0.60	0.31	0.45	0.56	0.41
Ca	0.22	0.23	0.41	0.20	0.16	0.11	0.25	0.00
Fe	1.88	3.16	6.06	4.07	1.43	3.63	3.41	4.05
S	0.00	0.10		0.84	0.06	0.46	3.16	0.92
Ti		0.23	0.63		0.10			

Tabla 4.2 Resultados del análisis elemental en muestras por secado térmico

Peso (%)	LHE	LHEA Aniónico	LHEAA Aniónico	LHEA Catiónico	LHEAA Catiónico	LHEA No iónico	LHEAA No iónico
C	24.07	24.89	30.76	24.25	25.14	26.67	20.75
O	48.60	52.55	39.65	45.01	53.05	44.10	50.60
Na	0.22	ND	0.36	0.42	ND	0.35	0.23
Mg	0.12	0.11	0.14	0.22	0.11	0.10	0.17
Al	12.18	9.81	11.59	13.01	7.43	12.69	10.08
Si	11.51	9.64	11.03	12.69	7.38	11.81	11.48
Cl	0.13	0.19	0.22	0.21	0.32	0.24	0.26
K	0.44	0.29	0.48	0.49	0.25	0.45	0.49
Ca	0.28	0.32	0.32	0.33	0.37	0.43	0.21
Fe	2.46	2.06	5.44	3.36	1.81	3.17	2.96
S	ND	ND	ND	ND	4.01		2.54
Ti		0.14			0.14		0.22

La liofilización incluye un congelamiento y una deshidratación por sublimación a vacío, que evita el daño causado por la tensión superficial. El congelamiento rápido es empleado para solidificar toda el agua instantáneamente sin modificar o destruir los cristales o estructuras de los sólidos. La sublimación a vacío es usada para remover el hielo sin alterar las partículas, y debe ser realizada lentamente y a baja temperatura para evitar el descongelamiento y la cristalización.

El secado térmico en comparación con la liofilización es un proceso rápido que incluye calentamiento, donde el agua es eliminada por evaporación.

Los lodos analizados contienen más del 90% de agua, dentro de la cual se encuentran disueltos algunos elementos que conforman las arcillas y los reactivos utilizados en su tratamiento. Por lo anterior, se observó que la eliminación del agua mediante secado térmico disminuyó el porcentaje en peso de C, O, Mg, Si, K y Fe en relación con la

liofilización (Tabla 4.1 y 4.2). Esto puede ser debido a que el agua al ser evaporada rápidamente arrastró algunos elementos disueltos en ella.

Se observó diferente morfología en cada método de secado, las tratadas por sublimación presentaron una formación de grumos y las de secado térmico pequeñas láminas. La Figura 4.1 muestra la morfología de un mismo lodo que se obtuvo durante la acidificación. El método de evaporación propició la formación de cristales, que al ser analizados se determinó que están constituidos de sulfato de aluminio, alterando la morfología y en menor medida la composición inicial.

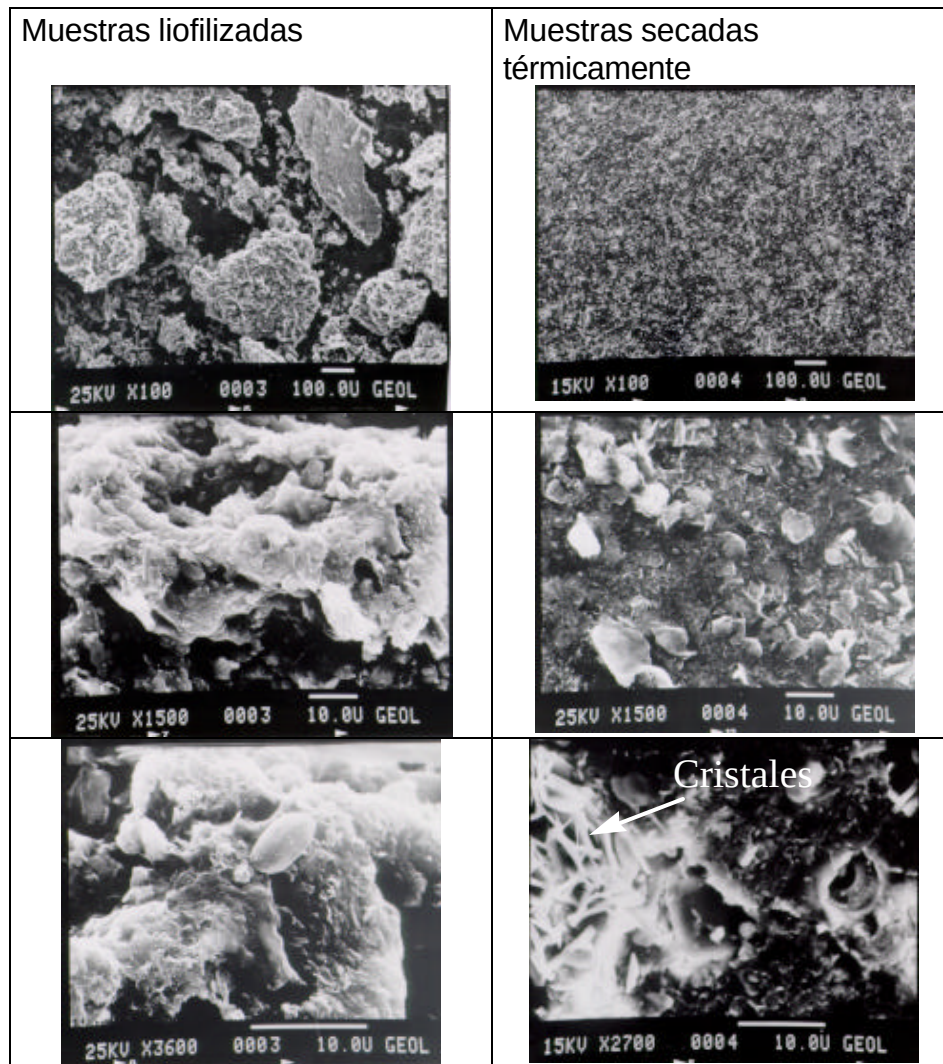


Figura 4.1 Micrografías de LHEAA a diferentes aumentos

Por lo anterior, se recomienda el secado por liofilización en el microanálisis, para evitar la cristalización de materiales contenidos en los lodos que alterarían su morfología y composición.

4.1.2 Resultados del análisis elemental

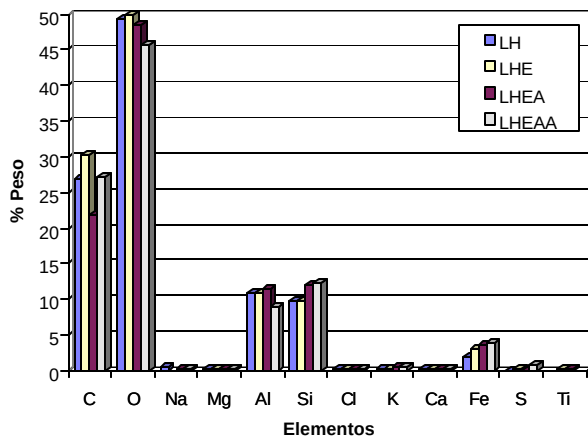
A partir de la Tabla 4.1 se calcularon los valores promedio del porcentaje en peso de los componentes del LHEA y del LHEAA para realizar una comparación elemental entre los diferentes tipos de lodos, los cuales se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Composición elemental por tipo de lodo

Elemento	LH	LHE	LHEA	LHEAA
	% en peso			
C	26.85	30.13	21.73	27.17
O	49.35	49.81	48.48	45.76
Na	0.46	ND	0.37	0.22
Mg	0.17	0.13	0.18	0.14
Al	10.79	10.82	11.42	9.00
Si	9.91	9.87	12.04	12.24
Cl	0.10	0.17	0.17	0.22
K	0.27	0.35	0.52	0.49
Ca	0.22	0.23	0.27	0.10
Fe	1.88	3.16	3.63	3.92
S	0.00	0.10	0.06	0.74
Ti	ND	0.23	0.37	ND

ND = NO DETECTADO

De estos resultados se observó que los principales constituyentes de los cuatro tipos de lodo son: oxígeno (O), carbono (C), aluminio (Al), silicio (Si) y hierro (Fe), como se muestra en la Gráfica 4.1. Los elementos restantes solo están presentes a nivel traza.



Gráfica 4.1 Composición elemental por tipo de lodo

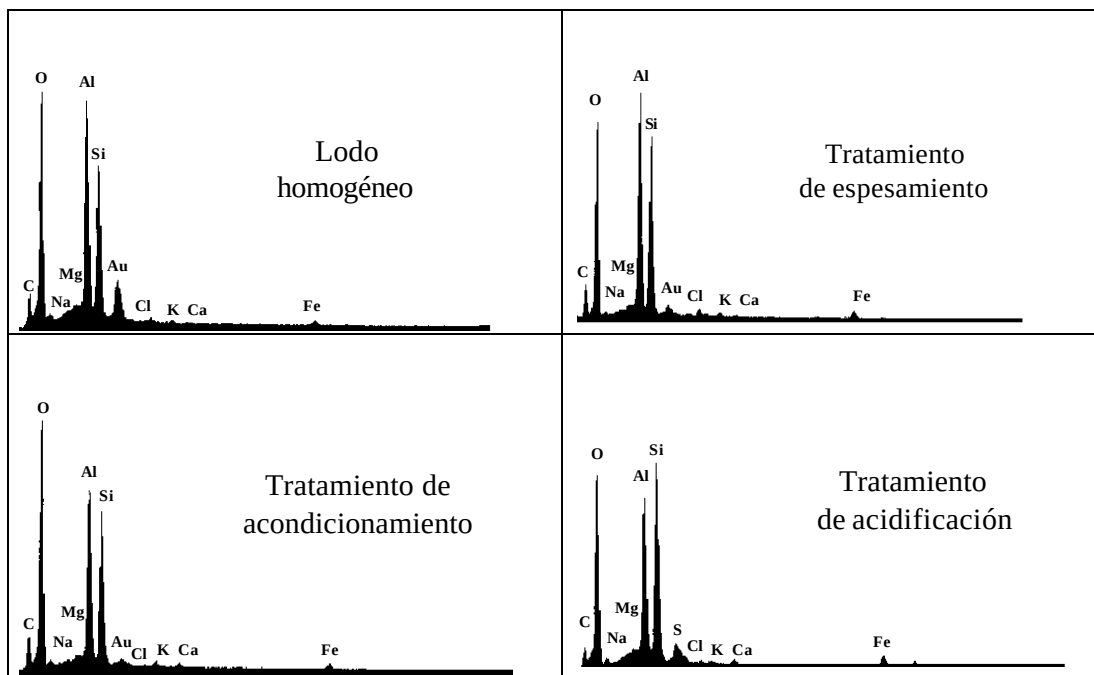
Esto indicó la presencia de *halloysita* ($\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$), *micas* (óxidos de silicio y aluminio ligados a potasio, hierro y magnesio), *cuarcos* (SiO_2) y *feldespatos* constituidos de óxidos de silicio y aluminio ligados a potasio, sodio y calcio (apartado 4.2). Además, una pequeña cantidad de SiO_2 está asociada con los esqueletos de las diatomeas que están presentes en el lodo.

De acuerdo a análisis previos la cantidad de carbono presente en el lodo como constituyente de materia orgánica es del 5%. Por lo que, el aumento en las muestras

analizadas se debió al carbón activado aplicado al agua cruda para eliminar el olor que impartían las microalgas.

En la Gráfica 4.2 se presentan las relaciones en peso que se obtuvieron del análisis elemental proporcionado por el MEB. La presencia del oro en estos análisis se debió al recubrimiento que se le dio a la muestra para evitar su polarización. Además se observó que la composición del lodo al ser espesado no cambió, sin embargo, presentó un incremento en el oxígeno cuando se le agregó un polímero, debido a que los principales constituyentes de éste son el carbono y el oxígeno.

En el tratamiento de acidificación la presencia del azufre aumentó, mientras que la del aluminio, carbono y oxígeno se redujo, debido a la adición del ácido sulfúrico utilizado para acondicionar el lodo y a la recuperación del sulfato de aluminio (coagulante) respectivamente.



Gráfica 4.2 Análisis elemental por tipo de tratamiento

4.1.3 Resultados del análisis morfológico

4.1.3.1 Análisis por tratamiento

En la Figura 4.2 (a, b, c y d) se muestran las micrografías de los lodos obtenidos en cada tratamiento, observándose que en el lodo inicial (a), las partículas o flóculos no están agrupados, dando lugar a espacios entre ellos. En un lodo espesado (b) la distancia entre los flóculos se redujo, mostrando un aspecto mas compacto. Cuando el lodo se acondicionó con polímero (c), se formaron aglomerados que reducen aún más los

espacios entre los flóculos. Al agregar ácido sulfúrico (d), se disolvió el aluminio y el polímero que mantenían a las partículas aglomeradas permitiendo que éstas se liberen formando pequeños grumos.

El tipo de tratamiento influyó en la morfología del lodo, siendo éste un factor importante en la reducción de su volumen, al formar aglomerados más compactos y disminuir los espacios que existen entre las partículas, permitiendo liberar una mayor cantidad de agua libre.

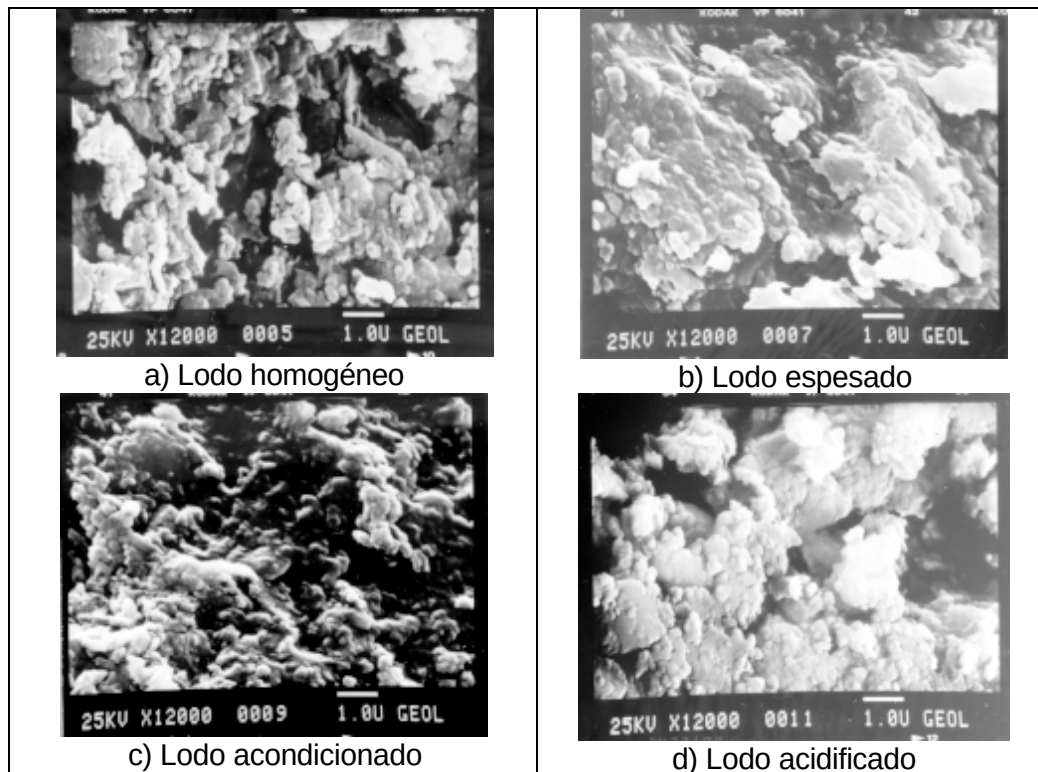


Figura 4.2 Micrografías por tipo de lodo

4.1.3.2 Análisis por polímero

La Figura 4.3 (a, b, c, d, y f) muestra las micrografías de los lodos obtenidos después de ser acondicionados y acidificados. En el acondicionamiento, la neutralización de la carga de la partícula y la formación de puentes interparticulares efectuada por el polímero catiónico (c) fue más efectiva al generar aglomerados más compactos que no muestran flóculos libres reduciendo los espacios entre partículas. Mientras que los polímeros aniónico (a) y no iónico (e) que utilizan solo puentes interparticulares muestran partículas menos compactas, al producirse su aglomeración mediante el mecanismo de reticulación y por tanto el espacio entre partículas fue mayor.

El tipo de carga del polímero propició la formación de aglomerados y disminución de los espacios que existen entre las partículas modificando la morfología del lodo. Siendo estos factores importantes en la reducción de su volumen.

Las reducciones promedio del volumen del lodo, partiendo del volumen inicial fueron del 91.9% en el espesamiento, 95.4, 95.9 y 95.6% en el proceso de acondicionamiento y del 97.5, 98.1 y 97.2% en la acidificación para los polímeros aniónico, catiónico y no iónico respectivamente; siendo el polímero catiónico el que mostró las mayores reducciones de volumen.

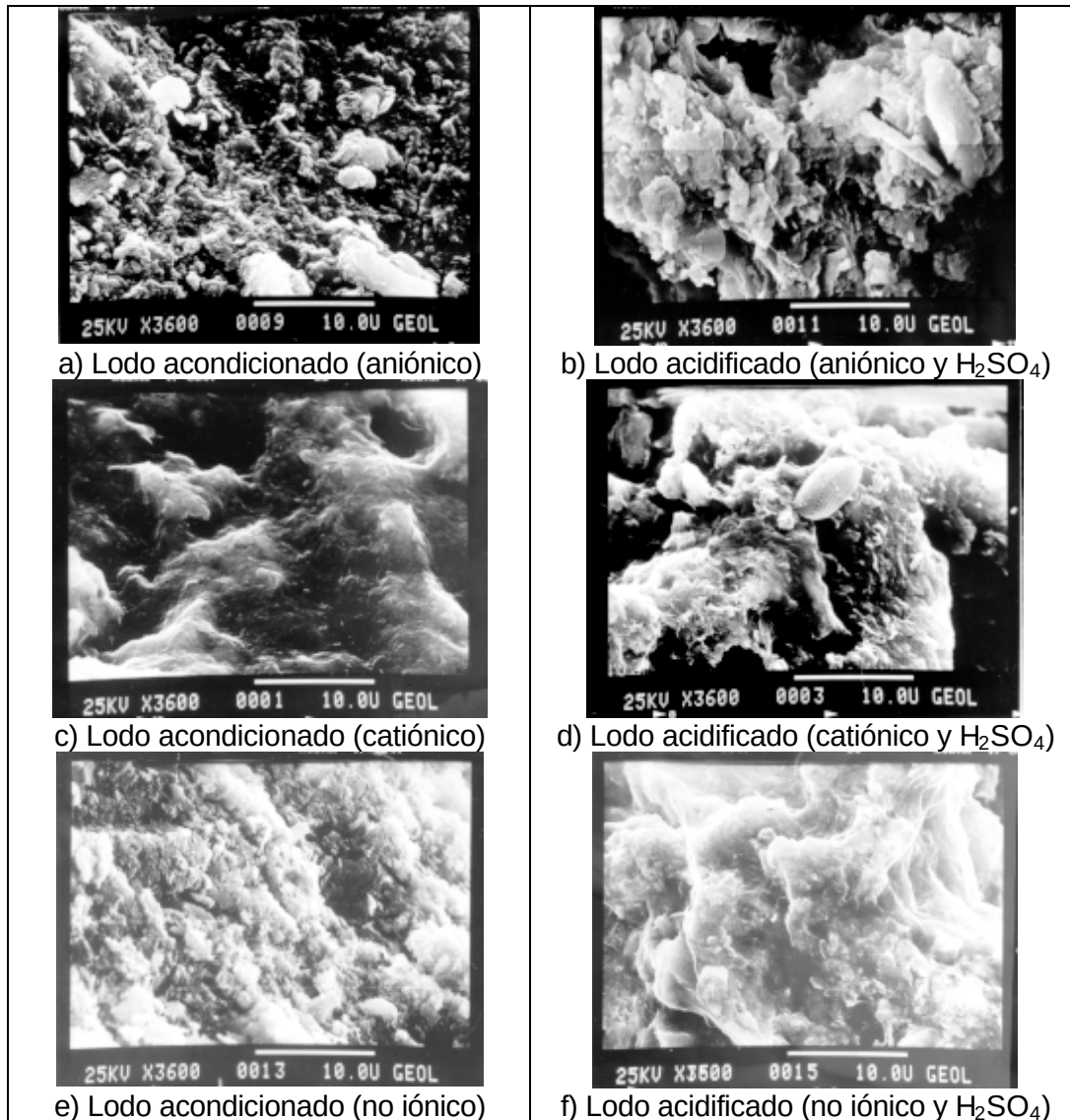


Figura 4.3 Micrografías por tipo de polímero

4.2 Resultados del análisis por rayos X

Los lodos son formados por arcillas en dispersión, que están constituidas principalmente por silicatos de aluminio, tales como la *caolinita*, la *montmorillonita*, la *ilita* y la *muscovita*, que físicamente son cristales con una estructura atómica reticular definida.

Los resultados de la determinación de los tipos de arcilla que constituyen a los lodos analizados se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Análisis mineralógico de los diferentes lodos

Muestra	Mineralogía de la fracción arcillosa
Lodo homogéneo	<i>Halloysita</i> . Trazas de <i>mica</i> , <i>cristobalita</i> , <i>cuarzo</i> y posiblemente <i>esmecita</i>
Lodo del espesamiento	<i>Halloysita</i> . Trazas de <i>mica</i> , <i>cristobalita</i> , <i>cuarzo</i> y posiblemente <i>esmecita</i>
Lodo del acondicionamiento	<i>Halloysita</i> . Trazas de <i>mica</i> , <i>cristobalita</i> y <i>cuarzo</i>
Lodo de la acidificación	<i>Halloysita</i> . Trazas de <i>mica</i> , <i>cristobalita</i> , <i>cuarzo</i> y <i>plagioclasas</i>

El tipo de tratamiento y la adición de reactivos no modificó la composición química del lodo, como se mostró en la tabla anterior, donde el principal constituyente fue la arcilla *halloysita*, seguida por trazas de *mica*, *cristobalita* y *cuarzo*, en menor cantidad *feldespatos*, *plagioclasas* y *esmecitas*.

La *halloysita* es un filosilicato de aluminio y presenta la siguiente composición: $\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$. Tiene una estructura laminar y cuando se humedece se plastifica y se puede moldear. Pertenece al grupo de la *caolinita*, debido a que su patrón de difracción de rayos-X y su comportamiento térmico son muy parecidos. Es un mineral secundario, resultado de la acción de los procesos postvolcánicos e hidrotermales sobre rocas de *feldespatos* y otros minerales que contienen aluminio. Aparece en depósitos secundarios, como resultado del transporte y sedimentación a través de las aguas superficiales. Cuando se encuentra en estas circunstancias es muy pura. Es un componente importante de arcillas y suelos. Se le asocia normalmente con *feldespatos*, *cuarzo*, *corindón* y *diásporo*.

Las *micas* tienen estructuras que se basan en láminas de tetraedros unidos y son silicatos de diversas composiciones de aluminio y potasio, que contienen hidróxido, magnesio, hierro, sodio, litio y flúor. El contenido de sílice varía entre el 33 y 55 %. Son minerales importantes en la formación de rocas, siendo componentes esenciales en las ígneas y metamórficas. Algunas rocas sedimentarias contienen considerables cantidades de *mica*.

5. CONCLUSIONES

La liofilización fue el método mas adecuado para la preparación de las muestras, ya que se evitan las cristalizaciones de sustancias disueltas en el lodo cuando se elimina el agua. En el secado térmico, se reducen las proporciones en peso de algunos componentes por efecto de la evaporación.

El tipo de tratamiento empleado modifica en cierta medida la morfología del lodo, reduciendo los espacios entre las partículas y permitiendo una mayor pérdida de agua libre.

La arcilla *halloysita* fue el principal mineral en el lodo, y está constituida por hidróxidos y óxidos de silicio y aluminio. Su estructura y composición elemental no se modificó por el tipo de tratamiento empleado en la reducción del volumen.

6. BIBLIOGRAFÍA

Brindley, G. W. y Brown, G. (1980), *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification*. Mineralogical Society, London, cap. 5.

Jeol, LTD. Serving Advanced Technology. For people who are using the SEM for the first time. Invitation to the SEM World. pp. 1-50.

Kraus, E. H.; Hunt, W. F. y Ramsdell, L. S, (1965) *Mineralogía*. Ed. McGraw Hill, España. Quinta edición. pp 665.

Reyes, S. A. M., (1997), *Microscopía Electrónica y Microanálisis a la Solución de Problemas Geoquímicos*. VII Congreso Nacional de Geoquímica, Instituto de Geología, UNAM.