
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

OPTIMIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS PROVENIENTES DE LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO

INFORME TÉCNICO FINAL

**Proyectos de Desarrollo Científico para atender Problemas Nacionales 2015
PN 2015 Proyecto 1199**

**RESPONSABLE TÉCNICO DEL PROYECTO:
DRA SOFÍA E. GARRIDO HOYOS**

ABRIL DE 2019

1. RESUMEN EJECUTIVO DEL INFORME

El arsénico es considerado cancerígeno para los humanos cuando el consumo de aguas arsenicales es prolongado. En muchos lugares la única fuente de agua para uso y consumo humano contiene arsénico (As) en solución, por lo que resulta necesario tratar este tipo de agua; en estos tratamientos de remoción, se produce un residuo que al cambiar las condiciones ambientales como, pH, potencial redox, se convierte en tóxico. Como objetivo general fue optimizar los procesos de espesamiento, acondicionamiento y deshidratación de los residuos generados en la coagulación-floculación-sedimentación y filtración directa de agua que contienen altas concentraciones de arsénico. El desarrollo de este proyecto se llevó a cabo en tres etapas; la primera es la obtención de lodos bajo condiciones óptimas del proceso de C-F, un espesamiento de 12 horas y caracterización del lodo inicial, como segunda etapa es el Screening o también conocido como cribado, acondicionamiento químico y caracterización del lodo acondicionado, así como normatividad de éstos, posteriormente como tercer etapa es la obtención de cinéticas y ajuste de los valores de índice de drenado del filtro banda.

I ETAPA

En la primera etapa se obtuvieron los lodos con As(V), que, mediante un diseño experimental, central compuesto 2k, se determinaron los valores óptimos iniciales de: pH 7.20; dosificación: FeCl₃ 34.37 mg/L y polímero de 0.89 mg/L, con las variables de respuesta: sólidos sedimentables, SSED, 7.59 mL/L y concentración de As(V) en el sobrenadante de 0.003 mg/L, para un intervalo de confianza del 95%. Posteriormente, se realizó el espesamiento por gravedad durante 12 horas. Se realizó el estudio de las propiedades físicas y químicas de los lodos sin o con espesamiento como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Características físicas y químicas de los lodos sin y con espesamiento

Parámetro	Unidades	Resultados del lodo	
		No espesado ^{SS}	Espesado
Densidad 25°C	kg/m ³	1,010	998.5
Índice de Willcomb (IW)	-	6	8
Tamaño de flóculo	mm	1.0-1.5 (D)	1.50-2.25 (E)

Sólidos totales (ST)*	g/L	0.48	1.696
Sólidos sedimentables (SSed)	mL/L	7.59	400
Humedad del lodo**	%	99.95	99.06
Resistencia específica a la filtración (REF) (r)	cm/g	2.570E+13	1.076E+11
-Tiempo de filtración (tF)*	s	107	298
-Sólidos totales en la torta húmeda (STH)*	g/L	2.904	5.290
-Sólidos totales en la torta seca (STS)*	g/L	0.405	1.143
-Humedad del lodo (ci)*	%	99.95	99.13
-Humedad de la torta (cf)*	%	86.06	78.39
-Cantidad de sólido retenido en el filtro, por unidad de volumen filtrado (c)	g/cm ³	0.0005	0.0091
Arsénico total en la torta	mg/kg B.S.	-	371.54 [§]
Hierro total en la torta	mg/L	0.656	2.981
pH final en el sobrenadante		6.7	6.5
Arsénico total en el sobrenadante	mg/L	0	0
Hierro total en el sobrenadante	mg/L	-	0.009
Potencial Z (PZ) en el sobrenadante	mV	-57.1	-28.2
Sólidos suspendidos en el sobrenadante (SST)	g/L	0.001	0.001

* ST, STH, STS, c, ci, cf y tF valores son usados para calcular, REF; **Valor promedio del contenido de humedad en el lodos a 105°C; [§]NOM_004-SEMARNAT-2002 B.S: Base seca; ^{§§}Lodo proveniente de la purga del tanque de sedimentación

II ETAPA

En la segunda etapa en el acondicionamiento se estudiaron los factores que influyen en el acondicionamiento de los lodos para su posterior deshidratación como son:

Tipo de polímero y sus características

se realizó un cribado con siete polímeros, P1 (AN956VHM), P2 (AN913VHM), P3 (FLOP-AN956SH), P4 (FLOE-AN934VHM), P5 (FLOP-AN945VHM), P6 (FLOE-4190SSH) Y P7 (FLOP-4350SSH), en los que se evaluó el carácter iónico, densidad de carga, peso molecular, tamaño de flóculo, Índice de Willcomb, sólidos sedimentables y la concentración de arsénico en el sobrenadante Tabla 2.

Table 2. Resultados del cribado de polímeros en el acondicionamiento del lodo espesado

Polímero	Carácter iónico	Densidad de carga (%)	Peso molecular	Tamaño de floc (mm)	Índice de Willcomb	SSed (mL/L)	As en el sobrenadante (mg/L)
P1*	Aniónico	50	Ultra alto	2.25-3.0 (F) [§]	8 ¹	450	0
P2**	Aniónico	13	Ultra alto	2.25-3.0 (F) [§]	8	450	0
P3*	Aniónico	50	Muy alto	1.5-2.25 (E) [§]	6 ²	400	0
P4*	Aniónico	30	Super alto	1.5-2.25 (E) [§]	6	400	0
P5*	Aniónico	40	Ultra alto	2.25-3.0 (F) [§]	8	450	0
P6**	Catiónico	10	Very alto	1.0-1.5 (F) [§]	4 ³	375	0.012
P7**	Catiónico	25	Very alto	1.0-1.5 (F) [§]	4	420	0

* Poliacrilamida (carboxil modificado y alta concentración de carboxilos); ** Polyacrylamide Poliacrilamida (carboxil modificado y baja concentración de carboxilos); [§]Según la International Water Institute; ¹Bueno: El flóculo sedimenta fácilmente, pero no completamente; ²Claro: el flóculo tiene un tamaño relativamente grande, pero precipita lento; ³Disperso: Formación del flóculo bueno, pero distribuido uniformemente (sedimentación lenta o no sedimentación).

Con base en la Tabla 2 los mejores polímeros de acuerdo a su comportamiento en las pruebas fueron el P1, P2 y P5, todos ellos con un valor de 450 mL/L para sólidos sedimentables y un índice de Willcomb de 8, indicando un buen flóculo que se deposita fácilmente, pero no completamente, lo que se observó en la prueba con el polímero AN956VHM (P1) al tener pequeños flóculos suspendidos en el sobrenadante. Por otra parte, se puede observar que, los polímeros catiónicos P6 y P7 no tuvieron un comportamiento ideal para este tipo de lodo, al tener un índice de Willcomb de 4 que muestra un flóculo disperso que sedimenta muy lentamente o no sedimenta y en el caso del

polímero P6 se tuvo 0.012 mg/L de arsénico en el sobrenadante, por lo que no es un polímero óptimo para el trabajo de investigación.

Finalmente, con base en las pruebas de selección con los siete polímeros diferentes para sólidos sedimentables, índice de Willcomb y arsénico en sobrenadante, se eligieron los dos mejores polímeros, siendo el polímero P2 y el P5 los seleccionados para los ensayos en la etapa de acondicionamiento químico y deshidratación en filtro banda Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de los dos polímeros seleccionados

Parámetro	Polímero	
	P2	P5
Color Verdadero (Pt-Co)	2	3
Color Aparente (Pt-Co)	7	9
Turbiedad (UNT)	0.32	0.24
Hierro (mg/L)	0.13	0.09
Potencial Zeta (mV)	-40.3	-40.4

Dosis de polímero y permeabilidad de la malla

Una vez seleccionados los polímeros P2 y P5 se realizaron pruebas con el filtro a presión (Bootest), a fin de estudiar el efecto de la dosis de polímero y la permeabilidad de la malla sobre la capacidad de drenaje de los lodos. Las figuras 1 (a) y 1 (b) muestran que el mayor aumento de sólidos totales en la torta seca se obtuvo para ambos polímeros utilizando una permeabilidad de malla de 80 a 100 cfm / ft² y una dosis de 20 mg/L. Sin embargo, con respecto a la ST, un aumento en la dosis de 6 a 8 y de 8 a 20 mg/L resultó en una disminución en la ST de 15.6 a 14.8% para P2, y de 11.70 a 5.4% para P5. Por lo tanto, el mayor aumento fue para P2 con una dosis de 8 mg/L, con un tiempo de drenaje de aproximadamente 20 minutos. Como se ve en la Figura 1 (c), la turbidez residual del filtrado aumentó gradualmente con una dosis mayor de P2 y P5, para todas las permeabilidades. Mientras tanto, los valores de turbidez residual más bajos, 0.13 y 0.14 NTU, se obtuvieron con una permeabilidad de malla de 80 a 100 cfm / ft² y dosis de 6 y 8 mg / L para P2, respectivamente. Con respecto al potencial Z (figura 4 (d)), se obtuvieron valores de -36.5 mV

para P2 y -35.6 mV para P5 con una dosis de 8 mg/L, con lo cual hubo un aumento en el potencial Z del lodo espesado, Tabla 2, (-28.2 mV) de -8.3 mV y -7.4 mV, respectivamente. Finalmente, el color del sobrenadante fue 20 unidades UPt-Co mayores para P5 que para P2. Dados los hallazgos anteriores, se seleccionó P2 (AN913 VHM) para evaluar el efecto del pH en el acondicionamiento y el drenaje de los lodos de arsénico.

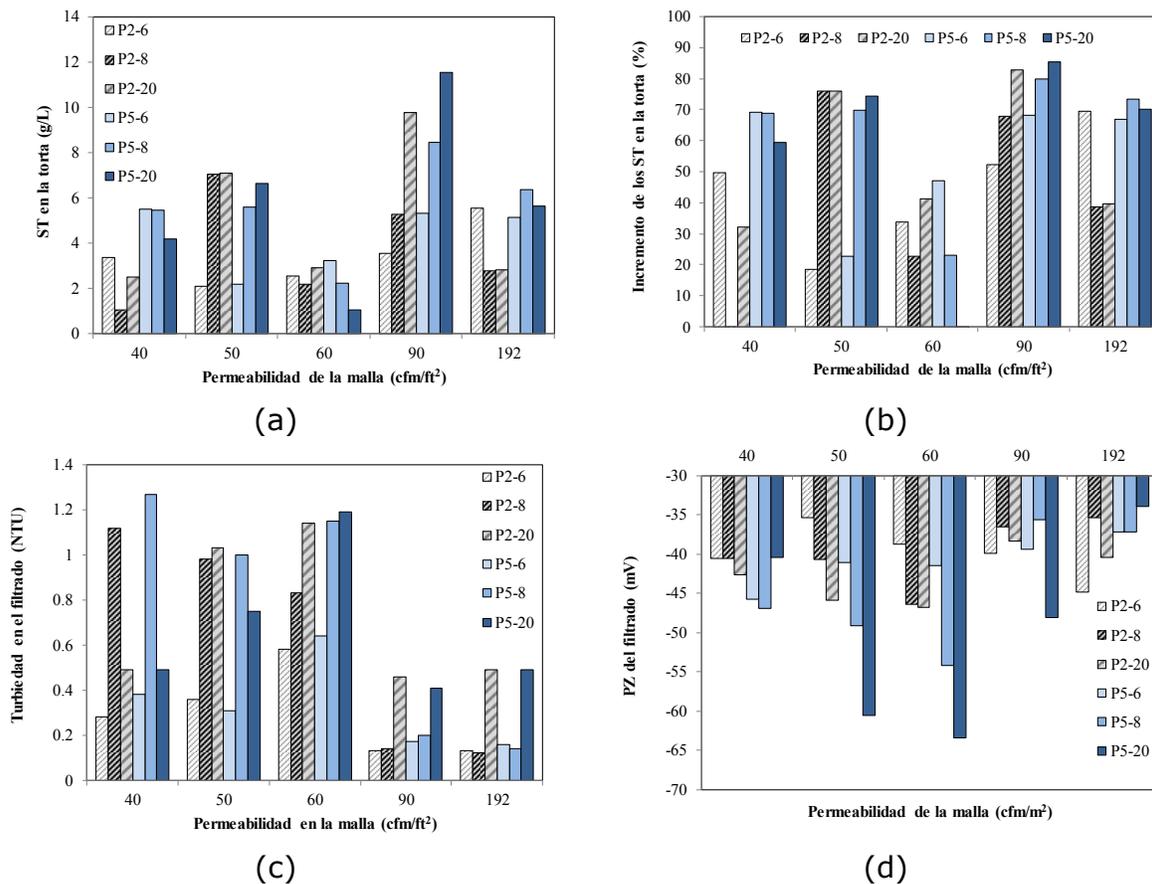


Figura 1. Resultados del proceso de deshidratación de lodos que contienen arsénico, acondicionados previamente con los polímeros P2 y P5, dosis de 6-8-20 mg/L and permeabilidad de la malla de 40, 50, 60, 80-100 and 192 ft³min/ft², pH of 6.7 y presión 520 mmHg: (a) ST en la torta, (b) Incremento de los ST en la torta (%), (c) turbiedad del filtrado, (d) PZ del filtrado.

pH

Se estudio el efecto del pH del comportamiento del polímero P2, en primer lugar en prueba de jarras para la obtención de las características físicas y químicas del

lodo acondicionado y posteriormente, se obtuvo el índice de drenado en el filtro de banda de presión (Bootest). Como se muestra en la Tabla 4, las características y propiedades físicas y químicas del lodo acondicionado a diferentes valores de pH, mejoraron significativamente con respecto al lodo inicial obtenido de los procesos de coagulación-floculación-sedimentación (Tabla 2). En cuanto a las características de los flóculos de hierro que se formaron, el mejor comportamiento se observó con un pH de 7, con el que el flóculo fue excelente, se sedimentó completamente y resultó con un sobrenadante con una turbidez <7.4 NTU y sólidos suspendidos totales <0.001 mg/L. La concentración de arsénico fue inferior a 0,0001 mg/L, el hierro fue de 1,8 mg/L con un pH de 3 y menor a 0,001 mg/L con los valores de pH restantes. Los valores de color verdaderos fueron 12 UPt-Co (pH 3), 9.6 UPt-Co (pH 6.5), 11 UPt-Co (pH 7) y 0 UPt-Co con pH de 4, 5, 5.5 y 6, respectivamente. Para todos los casos, la turbidez fue <7,4 NTU, con un aumento de 1,4 NTU entre los valores de pH de 6 y 7. Además, se obtuvo un potencial z más bajo de -50 mV con un pH de 7, lo que confirma la estabilidad de los coloides. Finalmente, el pH final en cada prueba tuvo un aumento en el rango de 4 a 7, como se muestra en la Tabla 4, debido a las características del polímero dosificado.

Con respecto al tiempo de filtración (tF) y al REF a diferentes valores de pH, se encontró un comportamiento inversamente proporcional entre estos dos parámetros, como se muestra en la Figura 5. Al comparar el pH 3 y 7, el fango con un pH de 3 tuvo una mayor REF debido a la composición de los lodos y la distribución de las partículas, así como el tamaño y la resistencia del flóculo.

Tabla 4. Resultados de la caracterización del lodo y sobrenadante en el proceso de acondicionamiento anterior

Parameter	Unidades	Lodo sin acond.	pH						
			3	4	5	5.5	6	6.5	7
Índice de Willcomb		6	6	6	6	8	8	8	10
pH _{sobrenadante} Final	Units	6.7	2.9	4.3	6.0	6.6	6.9	7.2	7.4
ST en el lodo acondicionado	g/L B.S	0.48	10.60	12.90	11.90	12.10	12.15	11.12	11.76
ST en la torta	g/L B.S	-	24.00	26.80	22.84	18.01	25.93	21.81	17.26
REF (r)	cm/g	2.570 E+13	1.805 E+13	6.330 E+12	4.737 E+12	5.957 E+12	8.371 E+12	4.221 E+12	3.499 E+12
tF	s	107	698	289	203	246	214	150	100
ST en la torta humedad* (STH)	g/L	2.904	6.228	6,773	6.028	5.920	5.859	8.114	5.380
ST en la torta seca* (STS)	g/L	0.405	0.986	1.061	0.958	0.873	0.900	0.779	0.794
Humedad del lodo (ci)*	%	99.95	98.94	98.71	98.81	98.79	98.79	98.89	98.82
Humedad de la torta (cf)*	%	86.07	84.17	84.34	84.11	85.25	84.64	90.39	85.25
Cantidad de sólido retenido en el filtro, por unidad de volumen filtrado (c)	kg/m ³	0.5	11.4	14.1	12.9	13.2	13.2	12.6	12.8
b (pendiente)	g/cm ⁶	-	0.3655	0.158 6	0.108 6	0.138 7	0.112 7	0.082 1	0.066 9
R ²			0.9839	0.958 0	0.965 0	0.894 2	0.884 4	0.870 2	0.866 8
humedad **	%	99.06	98.88	98.69	98.79	98.78	98.75	98.80	98.90
PZ _{sobrenadante}	mV	-28.2	-13	-28	-32	-38	-39	-48	-50

* ST, STH, STS, c, ci, cf y tF valores son usados para calcular, REF; **Valor promedio del contenido de humedad en el lodos a 105°C; ^sNOM_004-SEMARNAT-2002 B.S: Base seca

Por otro lado, la distribución de humedad en los lodos del proceso de acondicionamiento químico y deshidratación, está relacionado con la distribución del contenido de agua, el mayor porcentaje de agua se encuentra como agua superficial con un 69.28%, seguido de un 13.07% de agua intersticial, por lo que un 82.35% de agua presente en el lodo es fácil para la deshidratación, como se muestra en la Figura 1.5. Análisis realizado en una balanza de humedad electrónica de marca OHAUS modelo MB120), en las Figuras 2 y 3 se puede

apreciar el resultado de deshidratación del lodo inicial y de un lodo ajustado a un pH 7 dosificado con el polímero AN 913 VHM.

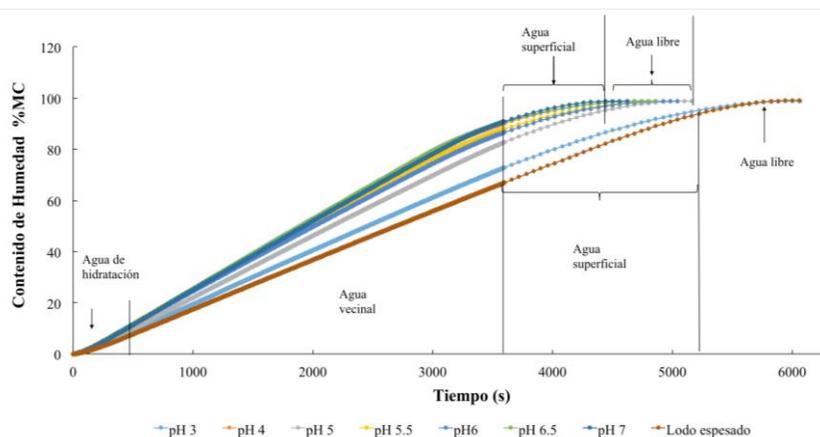


Figura 2. Distribución de humedad del lodo acondicionado a diferentes pH a una temperatura de 105°C y ST de 20 g



Figura 3. Deshidratación del lodo inicial en un tiempo de 78 min.



Figura 4. Deshidratación de lodo a un pH 7 en un tiempo de 77 min.

En cuanto la Resistencia Específica a la Filtración (REF) se obtuvo el menor valor a pH 7 (3.499 E+12), esto se debe a la composición del lodo y la distribución que presentan las partículas, al igual que el tamaño y resistencia del floc, como se observa en la Figura 5. Finalmente en la Etapa (II), se analizó la calidad correspondiente a la muestra del lodo inicial y acondicionado a un pH de 7, de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT, en metales y sólidos totales, Tabla 5, se observó que el lodo inicial tiene mayor concentración de arsénico total, con una diferencia de 155.96 mg/kg B.S. comparado con el lodo acondicionado, los cuales rebasaron la norma. Por ello se concluyó que no se pueden disponer estos lodos en rellenos sanitarios, cuerpos de agua, alcantarillado sin tener un tratamiento anterior.

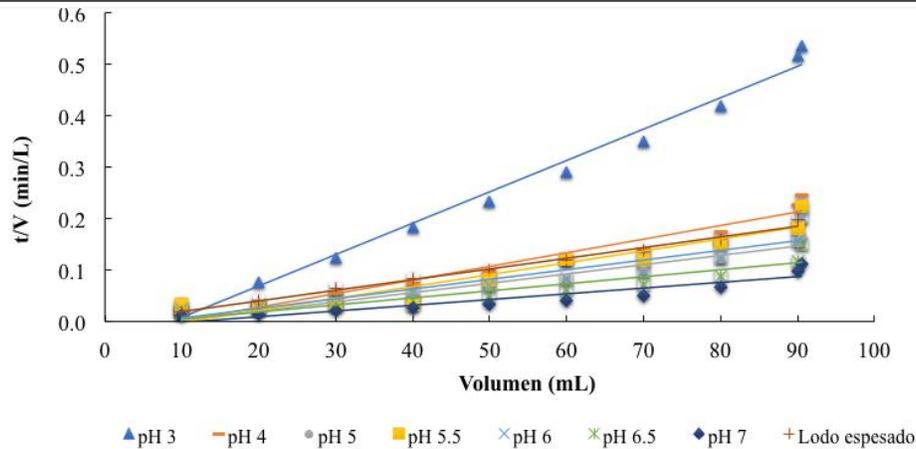


Figura 5. Comparación de interacciones de tiempo y volumen en la técnica de REF, de lodos acondicionados a diferentes pH

Tabla 5. Límites Máximos Permisibles para metales lodos obtenidos de la remoción de Arsénico

Parámetro	Resultado Lodo Inicial (mg/kg B.S.)	Resultado Lodo Acondicionado (mg/kg B.S.)	Límite máximo permisible		Lodo	
			Excelentes (mg/kg B.S.)	Buenos (mg/kg B.S.)	LDM	LPC
Contaminante (determinados en forma permanente)						
Arsénico total	371,54	215,58	41	75	0,223	0,5
Cadmio total	ND	ND	39	85	0,546	5
Cromo total	1608,7	1834,4	1200	3000	7,36	50
Cobre total	411,3	ND	1500	4300	19,4	100
Plomo total	174,4	ND	300	840	3,68	20
Mercurio total	ND	ND	17	57	0,0477	0,083
Níquel total	ND	ND	420	420	3,56	20
Zinc total	215,8	113,3	2800	7500	3,45	50
Sólidos totales (ST)	5.20	5.20			0.50	

B.S: Base seca; LDM: Límite de detección del método; LPC: Límite práctico de cuantificación; ND: Analito no detectado

ETAPA III

Posteriormente, en la tercera etapa, se obtuvo la cinética de drenado para cada uno de los siete casos de estudio propuestos en donde se ajustaron a diferentes pH como se muestra en la Figura 6. Durante el desarrollo de estas pruebas se observó que para un pH 3 con una masa inicial de 7.8 %, la velocidad en la cinética de drenado del lodo es mayor que para un pH 7 con una masa inicial de 23%, sin embargo, se obtuvo un mayor tamaño de flocs (0.5 - 0.75 mm) e índice de Willcomb (10), por lo que se presentó una mejor estabilidad en la torta

húmeda sobre la malla y menor concentración de sólidos suspendidos en el volumen filtrado. Una vez obtenidas las cinéticas de drenado, se calculó el índice de drenado, E_g , según la ecuación (1), teniendo en cuenta los parámetros relacionados con la deshidratación del lodo con arsénico como lo son: P_1 , P_2 y P_3 , cuyos valores se muestran en la Tabla 1.10, para cada pH estudiado.

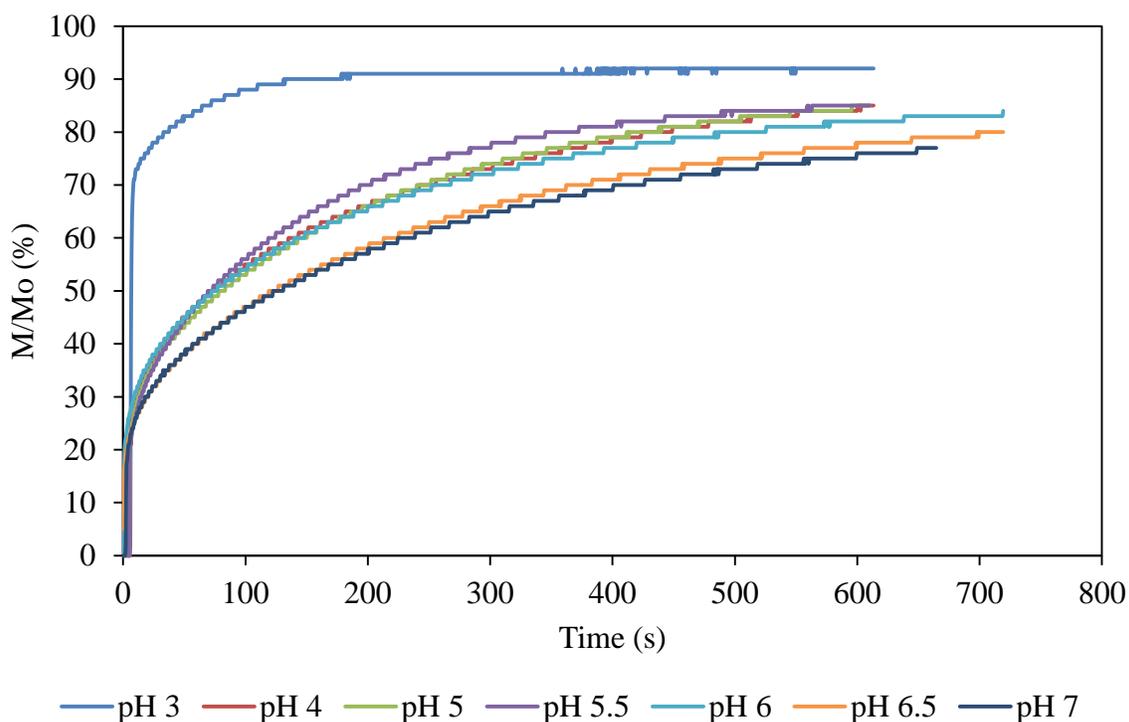


Figura 6. Cinética de drenado a distintos pH en el equipo BOOTEST.

La Tabla 6 presenta los valores de los parámetros que determinan el grado de drenabilidad con lodo acondicionado que contiene arsénico, a diferentes valores de pH. Éstas incluyeron características de secado (factor de concentración de sólidos en la torta, P_1), caracterización cinética (cinética de drenaje, P_2), caracterización de la tasa de captura (parámetro de calidad del filtrado, P_3) e índice de drenaje (E_g), que se obtuvieron con la Ecuación (1).

$$E_g = \ln \left(\frac{P_1}{P_2^\alpha P_3^\beta} \right) = \ln \left(\frac{\frac{Si_f}{Si_0}}{\left(\frac{t_{60}}{120} \right)^\alpha \left(\frac{SM_f}{Si_0} \right)^\beta} \right)$$

Ecuación (1), Ginisty et al. (2012)

Eg= Índice de drenado

P₁= Factor de concentración de sólidos en la torta

Donde;

Si₀= Cantidad de sólidos totales inicial (g/L)

Si_f= Cantidad de sólidos totales final (g/L)

P₂= Cinética de drenado

Donde;

T₆₀ = Tiempo mínimo para recuperar el 90% de la masa total del filtrado (s)

60 = Se refiere que el 90% de la masa total se filtre en menos de 60 segundos.

P₃= Calidad del volumen filtrado

Donde;

SM_f= Cantidad de sólidos suspendidos en volumen filtrado, (g/L).

Si₀ = Cantidad de sólidos totales final, (g/L).

Tabla 6. Resultados obtenidos en el proceso de deshidratación para filtro banda

pH	t₉₀	P₁	P₂	P₃	Eg
3	48.69	27.78	0.81	0.04	4.8
4	349.00	15.13	5.82	0.21	-2.2
5	339.00	5.30	5.65	0.18	-3.1
5.5	280.00	5.56	4.67	0.20	-2.5
6	356.00	5.57	5.93	0.20	-3.2
6.5	412.95	5.57	6.88	0.20	-3.7
7	390.00	5.57	6.50	0.20	-3.5

De acuerdo con los resultados obtenidos de la Tabla 6 del presente trabajo, fueron comparados con los valores promedios, E_g, obtenidos por Ginisty et al. (2012) para diferentes lodos obtenidos de tratamientos de agua potable, residual e industrial. Las consideraciones fueron las siguientes:

- ✓ Para P₁, generalmente se requiere un valor entre 3 y 10. En consecuencia, el parámetro es rechazado para P₁ < 3

- ✓ Para P_2 , la referencia es de 60 segundos para equipos industriales de gran tamaño. El parámetro se rechaza para $t_{90} > 60$ segundos (o $P_2 > 1$). En consecuencia, el mínimo valor de P_2 -a es igual a 1. En la mejor prueba de drenado realizada con la mezcla de 5 tipos de agua, se observó un $t_{90} = 5$ segundos y el valor correspondiente para $P_2^{-\alpha}$ fue igual a 1730.
- ✓ Para P_3 , el valor máximo para SM_r / Si_0 se fijó en 0.01 para obtener un valor correcto de la relación de captura. El parámetro se rechaza para $Si_0 / SM_r < 100$. Por consiguiente, el valor mínimo de $P_3^{-\beta}$ es igual a 3.2.

Debido a los resultados negativos del E_g obtenidos, se procedió al ajuste de los datos experimentales al modelo de regresión no lineal. Del cual se obtuvo de la pendiente la velocidad de drenado (%masa drenada/s), con unos coeficientes de determinación R^2 , aceptables para todos los pH menos para el pH 3, Tabla 7 y Figura 7.

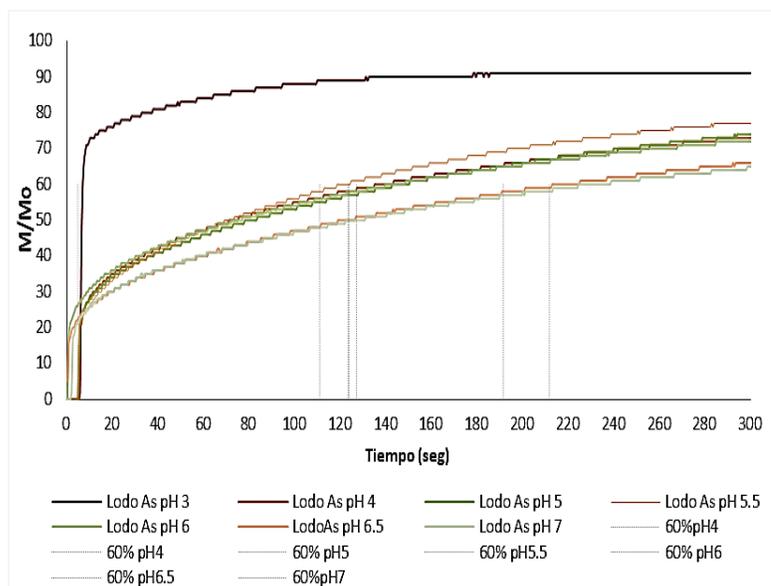


Figura 7. Curva de drenado a distintos pH con el modelo matemático de regresión no lineal

Tabla 7. Velocidades de drenado para cada caso de estudio a diferentes pH

pH	Velocidad de Drenado (%masa/s)	R ²
3	7.492	0.571
4	15.181	0.985
5	15.661	0.983
5.5	15.914	0.985
6	13.464	0.977
6.5	14.044	0.985
7	13.591	0.972

Por último, una buena tasa de captura en el proceso de filtrado se caracteriza por una baja concentración de materiales suspendidos en el proceso de filtrado (Ginisty et al., 2012). indica que un drenado es bueno cuando los tres parámetros, P_1 , P_2 , P_3 , son aceptados respecto a los valores de referencia que se presentan en la Tabla 8.

Con respecto al presente estudio, se observaron que los valores experimentales obtenidos de P_1 , P_2 , P_3 , (Tabla 8) para las condiciones que indica Ginisty et al. (2012) y para los siete casos en que se varió el pH, respectivamente. Se obtuvo el 90% del drenado con el lodo en el estudio, el tiempo varía entre 264.785 y 1925.375 segundos para los pH 3 y 7 respectivamente, por lo que los investigadores proponen los valores de referencia indicados por Ginisty et al. (2012), establecen que el límite para P_1 es de 3-10. Sin embargo, para P_2 entre 0.017-1; considerando que en 60 segundos se drena el 90% de los sólidos. No obstante, los resultados de nuestros experimentos con lodo con As de agua potable indican que los valores máximos de drenado obtenidos son; pH 3 (92 s), pH 4 (85 s), pH 5 (85 s), pH 5.5 (85 s), pH 6 (84 s), pH 6.5 (80 s) y pH 7 (77 s). Por lo que se propone que en 120 segundos se drene el 60% de los sólidos. Considerando lo anterior, el valor de referencia para P_2 es de 0.0083-1. $P_2 = \frac{t_{60}}{120}$ donde el t_{60} se obtiene empleando el modelo matemático ajustado para cada pH. Se comprobó que los valores de referencia para P_3 son los mismos que los reportados por Ginisty et al. (2012) que son $SM_r/Si_0 < 100$. Considerando los

valores de referencia propuestos se considera un drenado aceptable de 1.49 a 14.36. Se concluye que para los pH 4, 5.5, 6, 6.5, 7 se obtuvieron los valores del E_g : 2.42, 2.25, 2.41, 3.05, 1.02 y 1.05 respectivamente. Por lo que el mejor E_g es para el pH de 6.0, sin embargo se selecciona el pH a 7 como el mejor comportamiento en características físicas y químicas en la torta y filtrado.

Tabla 8. Valores de referencia para el Índice de drenado (E_g)

Tipo de Agua		P_1	P_2	P_3	α (*)	β (*)	E_g	Autor
Promedio de 5 tipos	Valores de referencia	3 - 10	0.017 - 1	<100	3	0.25	6-10.5	Ginisty et al. (2012)
	Valores experimentales	3 - 10	0.0170 - 1.0000	1 - 0.01	3	0.25		
Agua Potable		P_1	P_2	P_3	α (*)	β (*)		Presente estudio (2018)
	Valores de referencia	3 - 10	0.0083 - 1	<100	3	0.25	1.49-14.36	
	Valores experimentales	1.40 - 10	0.0083 - 1.0000	1 - 0.01	3	0.25		

(*) Los valores de α y β son los establecidos por Ginisty Pascal (2012).

Por último, se estudió la lixiviación del arsénico presente en los lodos. Se emplearon dos métodos para las pruebas de lixiviación de lodos con arsénico, el de American Society of Testing and Materials (ASTM) y el método establecido por la USEPA. En el método ASTM se emplearon 25 g de lodo seco, se lixiviaron con 100 ml de agua desionizada durante 48 horas en continua agitación, posteriormente el lixiviado se filtró (0.45 μm) y se acidificó a $\text{pH} < 2$ para su análisis de As por duplicado con el método químico Wagtech Arsenator digital, la concentración de As en el lixiviado fue de 47 μg .

En el método de la USEPA se emplearon 25 g de lodo seco, el cual se mezcló con 500 ml de agua desionizada a $\text{pH} 4.93$; otra muestra de 25 g se mezcló con agua desionizada a $\text{pH} 2.88$, ambas soluciones se agitaron a 30 RPM durante 18 horas. El lixiviado se filtró (0.45 μm) y se acidificó a $\text{pH} < 2$ para su análisis de As por duplicado con el método químico Wagtech Arsenator digital, las concentraciones de As en el lixiviado de ambas muestras fue 0 μg . Por lo que se concluye que el As no se disuelve en el lixiviado con el método USEPA debido a que la velocidad y tiempo de agitación es menor que en el método establecido por la ASTM.

CONCLUSIONES

Durante el proceso de drenado del lodo a un pH de 7 se obtuvo un alto contenido de sólidos en la torta, una rápida liberación de filtrado (humedad superficial de un 69.28%) y por último una alta tasa de captura, confirmando que sí influye el pH en el acondicionamiento y deshidratación de este tipo de lodos, contribuyendo a disminuir costos de disposición de este tipo de lodos de plantas potabilizadoras, así como reducir daños a la salud pública y al medio ambiente.

COSTOS

Consumo día de la Potabilizadora 13^a ubicada en Gómez Palacio, Durango

Caudal tratado de agua	2592 m ³ /d
Volumen de lodo producido (retrolavados)	80 m ³ /d
Porcentaje de lodo producido	3.09%
Lodo deshidratado producido	85.71 kg/d
Cloruro férrico	8.33 kg
Hipoclorito de sodio	30 kg
Polímero	0.02 kg
Consumo de energía	431 kWh

Costos de operación

Cloruro férrico (kg)	5.50
Hipoclorito de sodio (kg)	4.90
Polímero (kg)	72.00
Contenedor de lodos 4 m ³	1000.00
Cantidad producida (kg)	85.71
\$/kg	5.52

VISITAS A PLANTAS POTABILIZADORAS PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Se estableció contacto con los organismos operadores de Torreón (SIMAS) y de Gómez Palacio (SIDEAPA), los cuales su objetivo es mejorar el abasto y calidad del agua para consumo humano a los habitantes de la Región Lagunera, Estado

de Coahuila y Durango respectivamente. Se visitaron cinco plantas de filtración directa en donde se está removiendo el arsénico. Actualmente se está realizando una tesis de Maestría en la que se comparan los lodos obtenidos mediante las tecnologías de tratamiento convencional y filtración directa.

Elaboración del procedimiento estandarizado Procedimiento estandarizado a nivel laboratorio de los procesos de espesamiento, acondicionamiento y deshidratación BOOTEST. Se anexa.

Diseño de modelo de utilidad para realizar cinéticas de drenabilidad de lodos, se anexa esquema y descripción general.

OFERTA DEL VALOR DEL GRUPO DE TRABAJO/INSTITUCIÓN

Se ha formado un grupo de trabajo en que han trabajado alumnas en sus Tesis de Licenciatura (UPEMOR) y Maestría (UNAM), además de varios alumnos de universidades como la UAEM y UPEMOR realizando sus trabajos de Servicio Social y Prácticas Profesionales.

2. PRINCIPALES PRODUCTOS DERIVADOS DE LA APLICACIÓN DEL PLAN ESPECÍFICO DE ADAPTACIÓN DE LOS RESULTADOS HACIA LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA EN EL SECTOR PÚBLICO, PRIVADO O SOCIAL

El beneficio es de este proyecto, es que, con los lodos colectados de las plantas potabilizadoras en Gómez Palacio, se está desarrollando la Tesis de Maestría de la alumna Estefania Miranda Zamora, en que se realizará la transferencia del conocimiento en materia de tratamiento de los lodos con arsénico, específicamente en las mejores condiciones de operación para el espesamiento, acondicionamiento y deshidratación de los lodos para su disposición final. Una vez que se ha trabajado en el laboratorio optimizando los diferentes parámetros de operación se aplicaron a una matriz que es real, por lo que se conseguirán resultados que se empleen directamente en campo, evitando que estos lodos con arsénico sean vertidos al alcantarillado, produciendo un impacto ambiental irreparable.

3. INDIQUE EL GRADO DE CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO GENERAL, OBJETIVOS ESPECÍFICOS, METAS Y OBTENCIÓN DE PRODUCTOS QUE UD. PROPUSO

OBJETIVO GENERAL

Optimizar los procesos de espesamiento, acondicionamiento y deshidratación de los residuos generados en la coagulación-floculación-sedimentación y filtración directa de agua que contienen altas concentraciones de arsénico

OBJETIVOS ESPECÍFICOS, METAS Y PRODUCTOS

	Metas	Productos	%Cumplimiento	*Observaciones
Objetivo 1				
Identificar las condiciones óptimas: pH, dosis de FeCl ₃ y polímero, respecto a las variables de respuesta de: SSED en lodos y As en el sobrenadante, en la obtención de lodos provenientes de los procesos de Coagulación-Floculación-sedimentación para agua potable.	Estudio de la obtención óptima de lodos en la remoción de As de agua potable	Realización de Tesis de Maestría en donde se estudiaron las condiciones óptimas para la obtención de lodos.	100	Maestría UNAM
Objetivo 2				
Estudiar las propiedades físicas y químicas de los lodos en el proceso de espesamiento provenientes de la coagulación-floculación-sedimentación y filtración directa	Estudio de las propiedades físicas y químicas de los lodos con arsénico y su influencia la optimización de los procesos de espesamiento, acondicionamiento y deshidratación	Realización de la Tesis de Licenciatura	100	Licenciatura UPEMOR
Objetivo 3				
Evaluar los factores que influyen en el acondicionamiento químico de los lodos para su deshidratación	Estudio de los factores que influyen en el acondicionamiento para su deshidratación	1.Realización de una Tesis de licenciatura y en Proceso Tesis de Maestría 2.Procedimiento estandarizado a nivel laboratorio de los procesos de espesamiento, acondicionamiento y deshidratación BOOTEST. 3. Construcción	100	Licenciatura UPEMOR y Maestría en proceso UNAM

	Metas	Productos	%Cumplimiento	*Observaciones
		de un modelo de utilidad para realizar cinéticas de drenabilidad de lodos		
Objetivo 4				
Realizar pruebas de lixiviación de arsénico en suelo		Resultados de lixiviación de As en suelos	100	
Objetivo 5				
Estudio costo/beneficio de diferentes escenarios planteados para la disposición final de los lodos con arsénico			100	
Objetivo 6				
Formar un Maestr@ y Licenciado	Graduación de dos estudiantes	Realización de dos Tesis de Licenciatura y dos Tesis de Maestría, una terminada y una en proceso (Archivo con las Tesis)	100	1. Betsabé López Flores (Licenciatura UPEMOR) 2. Estefanía Miranda Zamora (Licenciatura UPEMOR) 3. Karina García Mendoza (Maestría UNAM) 4. Estefanía Miranda Zamora (Maestría en proceso UNAM)
Objetivo 7				
Publicar los resultados en una revista indizada, en memorias in extenso en Congreso Nacional e Internacional	Elaboración de un artículo en revista indizada. Participación en congresos internacionales	Un artículo en revista indizada STOTEN. Cinco ponencias y artículos In Extenso en memorias de congresos internacionales. Un capítulo de libro.	100	Aceptado con correcciones en la revista Science of the Total Environment, índice de impacto 4.610

*Observaciones (modificaciones, problemática, justificaciones, etc.)

FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

1. Tesis de Maestría: Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Karina García Mendoza. optimización de los procesos de acondicionamiento y deshidratación de los

residuos generados en la coagulación- floculación de agua que contiene arsénico. Directora de Tesis: Dra Sofía E. Garrido Hoyos. Presentada el 27 de enero de 2017.

2. Tesis de Licenciatura: Ingeniería en Tecnología Ambiental de la Universidad Politécnica del Estado de Morelos. Estefanía Miranda Zamora. Estudio de la cinética de drenado de lodo con arsénico procedente del acondicionamiento químico. Tutora Externa Dra. Sofía E. Garrido Hoyos; Tutores Internos: M en I. Luis Hernández Álvarez y M en I. Karina García Mendoza. Presentada el 24 de julio de 2017.

3. Tesis de Licenciatura: Ingeniería en Tecnología Ambiental de la Universidad Politécnica del Estado de Morelos. Betsabé López Flores. Cinética e índice de drenado en la deshidratación de lodos con arsénico en filtro banda. Tutora externa: Dra. Sofía E. Garrido Hoyos; Tutores Internos: Dra. Jessica Vanessa Briseño Ruiz y Dr. Leonel Ernesto Amábilis Sosa. Presentada el 01 de marzo de 2018.

4. Tesis de Maestría en Proceso 2017-2 del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Estefanía Miranda Zamora. Tema de Tesis: Determinación de la influencia del acondicionamiento en la cinética de drenado de lodo que contiene arsénico en un filtro banda. Directora de Tesis: Dra Sofía E. Garrido Hoyos.

PUBLICACIONES: ARTÍCULO EN REVISTA INDIZADA

1. S. Garrido-Hoyos, K. Garcia, E. Miranda, B. López, J. Briceño (2019). Kinetics and drainage index in function of pH, in the dewatering of iron sludge containing arsenic. Science of the Total Environment. En proceso de correcciones. Índice de impacto 4.610

MEMORÍA IN EXTENSO EN CONGRESOS INTERNACIONALES

1. Sofía E. Garrido Hoyos, García Mendoza Karina y Miranda Zamora Estefanía. (2017). Analysis of the physical and chemical properties to improve arsenic sludge dewatering and disposal. XVI IWRA World Water Congress, Cancún 29 de mayo al 01 de junio de 2017.
2. Garrido Hoyos Sofía Esperanza, García Mendoza Karina, Miranda Zamora Estefanía, López Flores Betsabe. (2017). pH en los procesos de acondicionamiento y deshidratación de lodos que contienen arsénico. 3er. Congreso Nacional AMICA, XII Congreso Regional para Norteamérica y el Caribe, Primer Simposio Interamericano de AIDIS Joven y Primer Encuentro Internacional de Jóvenes Investigadores en Evaluación y Tecnología Ambiental (EJITA) "Norteamérica y Caribe en el camino hacia el

desarrollo sostenible". Villahermosa 17-20 de octubre de 2017.

3. S.E. Garrido, K. García, B. López. (2018). Influence of the pH on the processes of conditioning and dewatering of sludge containing arsenic. SMICE2018. Sludge Mangament in Circular Economy. Rome Italy 23-25 de Mayo 2018.
4. S.E. Garrido Hoyos, K. García, J. Briseño, B. López. (2018). Influence of pH in the conditioning and dehydration processes of arsenic-containing sludge. 7th International Congress & Exhibition. Arsenic in the Environment. Environmental Arsenic in a Changing World (As2018). Beijing, China, 01 al 06 de julio de 2018.
5. López F.B., Garrido H.S. García M.K. y Briseño R.J. (2018). Cinética e índice de drenado en la deshidratación de lodo con arsénico en filtro Banda. 1st Latin American & Caribbean Young water professionals conferencia. Querétaro México, 07 al 09 de noviembre del 2018.

CAPÍTULO DE LIBRO

1. K. Garcia, S.E. Garrido, J. Briseño. B. López. E. Miranda. (2018). Alternativas para el tratamiento de agua con arsénico y sus residuos generados. Aceptado. Para publicar en Editorial AM Editores S.A de C.V.

4. CON BASE EN LOS PRODUCTOS GENERADOS EN EL PROYECTO, INDIQUE EN EL SIGUIENTE LISTADO EN CUAL TUVO LOS ALCANCES MÁS IMPORTANTES Y JUSTIFIQUE SU RESPUESTA RESALTANDO LOS IMPACTOS (BENEFICIOS) DE LOS PRODUCTOS

- a) Publicaciones científicas de investigación y/o de divulgación

El tema que se desarrolló en el proyecto financiado por CONACYT, es interesante desde el punto de vista, de que existe muy poca investigación sobre los lodos que contienen arsénico, los cuales son generados en la remoción de arsénico de agua para uso y consumo humano. Debido a que hubo un buen diseño de los experimentos y los resultados fueron presentados de una forma lógica, fue aceptado con correcciones, este trabajo en la revista Science of the Total Environment, con un índice de impacto de 4.610, con lo que se espera la difusión de este trabajo a nivel internacional, para que sea de guía para otros trabajos relacionados con los lodos con arsénico.

- b) Formación de recursos humanos especializados

Es evidente como se muestra anteriormente, que sí hay un interés por parte de

los estudiantes en este tema del Proyecto, en la formación de éstos, en Programas de Posgrado de la UNAM y del IMTA y en Licenciatura de la UPEMOR. Dos Tesis de Maestría y Dos de Licenciatura.

- c) Participación en congresos y foros académicos

En orden de importancia también participó en cinco congresos internacionales en que se logró llamar la atención en el tratamiento de los lodos con arsénico para disminuir volumen y así poderse manejar éstos con más facilidad para su disposición final en un confinamiento para residuos tóxicos.

- d) Productos de comunicación pública de la ciencia que promuevan la apropiación social del conocimiento

No aplica

- e) Participación en redes, Colaboraciones académicas, o bien con los sectores productivo, social empresarial, gubernamental

Por último, se impartió un curso sobre Contaminación del arsénico y sus residuos en el Seminario Nacional de la Red Temática Gestión de la calidad y disponibilidad del agua, celebrado en la ciudad de Santiago de Querétaro, el día 24 de octubre de 2018. En este curso se mostraron los resultados más importantes obtenidos de las pruebas de tratabilidad de los lodos a nivel laboratorio.

Una parte muy importante de este proyecto fueron las visitas que se realizaron a cinco potabilizadoras que remueven arsénico operadas por los organismos operadores de SIMAS en Torreón (Coahuila) (2), y SIDEAPA en Gómez Palacio (Durango) (3). Se aplicó un cuestionario que fue diseñado por la responsable de este proyecto y colaboradores del IMTA para la CONAGUA "Guía rápida de evaluación de plantas potabilizadoras", los cuales se anexan a este informe.

En esta visita se hicieron observaciones a la operación de las plantas que trabajan por filtración directa asistida con cloruro férrico, sólo dos de las cinco tratan los lodos, por lo que el problema sigue vigente con respecto a la disposición de los lodos con arsénico.

5. EN CASO DE QUE HAYA TENIDO ACCIONES DE VINCULACIÓN INDICAR CON QUIEN Y DESCRIBAMENTE EL IMPACTO (BENEFICIO) SOCIAL, ECONÓMICO, AMBIENTAL

- a) Con tomadores de decisiones, organizaciones sociales, ONGs, sector productivo

Se estableció contacto con los organismos operadores de Torreón (SIMAS) y de Gómez Palacio (SIDEAPA), los cuales su objetivo es mejorar el abasto y calidad del agua para consumo humano a los habitantes de la Región Lagunera, Estado de Coahuila y Durango respectivamente.

Actualmente el abastecimiento de agua potable a los habitantes de los municipios de Torreón, Fco. I. Madero, Matamoros, San Pedro y Viesca (Coahuila) y Gómez Palacio, Lerdo y Tlahualilo (Durango) es mediante el aprovechamiento de aguas subterráneas del acuífero Principal de la Región Lagunera. La sobreexplotación de este acuífero ha provocado importantes abatimientos en los niveles de bombeo con el consecuente deterioro gradual de la calidad del agua. El principal elemento contaminante encontrado en el agua para consumo humano de la Región Lagunera es el Arsénico donde se presentan concentraciones de este metaloide por encima de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (0.025 mg/L).

Ante esto el Gobierno de la República firmó con el Gobierno del Estado de Coahuila el Compromiso CG-114 cuyo objetivo es "Impulsar Obras de Infraestructura que permitan mejorar el abasto y calidad del agua en la Región Lagunera", el cual contempla el Diseño y Construcción de 29 Filtros a Pie de Pozo para la remoción de Arsénico para Coahuila y 21 Filtros a Pie de Pozo, rehabilitación de 9 plantas de ósmosis inversa y Estudios y proyecto ejecutivo para la nueva fuente de agua futura para la Zona Lagunera. Con estas acciones se mejorará la calidad del agua de un gasto del orden de 1,080 L/s en beneficio de una población de 311,000 habitantes, con un costo de \$317.3 millones de pesos en Coahuila y de 1,130 L/s en beneficio de una población de 325,000 habitantes, con un costo de \$289.6 millones de pesos en Durango

El beneficio de este proyecto, es que, con los lodos colectados de las plantas potabilizadoras en Gómez Palacio, se está desarrollando la Tesis de Maestría de la alumna Estefania Miranda Zamora, en que se realizará la transferencia del conocimiento en materia de tratamiento de los lodos con arsénico, específicamente en las mejores condiciones de operación para el espesamiento, acondicionamiento y deshidratación de los lodos para su disposición final. Una vez que se ha trabajado en el laboratorio optimizando los diferentes parámetros de operación se aplicaron a una matriz que es real, por lo que se conseguirán resultados que se empleen directamente en campo, evitando que estos lodos con arsénico sean vertidos al alcantarillado, produciendo un impacto ambiental irreparable.

b) Con instituciones académicas

La colaboración se ha llevado a cabo con la Universidad Politécnica del Estado de Morelos, UPEMOR en la formación de estudiantes a nivel Licenciatura y con la Universidad Nacional Autónoma de México a nivel de Maestría.

- c) Para la aplicación y/o transferencia del conocimiento generado o reproducido

Se respondió en el inciso a)





Diferentes aspectos de las visitas a campo en Torreón y Gómez Palacio

6. ¿CUÁL CONSIDERA QUE FUE LA APORTACIÓN CIENTÍFICA Y/O TECNOLÓGICA MÁS IMPORTANTE Y QUÉ PROBLEMÁTICA RESUELVE?

De acuerdo a la escasa información científica que hay sobre el tratamiento de

lodos, la aportación científica y tecnológica se ve reflejada en los estudios realizados en el tratamiento de lodos con arsénico provenientes de la remoción de este metaloide del agua para uso y consumo humano, a continuación, se hace un resumen de los logros obtenidos:

En primer lugar se obtuvieron las condiciones óptimas de remoción de arsénico y obtención de los lodos provenientes del proceso de coagulación floculación en la remoción de arsénico de agua para consumo humano con una concentración inicial de As(V) de 0.150 mg/L; los valores óptimos fueron: pH: 7.2, dosis de coagulante: 34.33 mg/L y dosis de polímero 0.89 mg/L, con un intervalo de confianza del 95%, para continuar con el tratamiento de los lodos en las siguiente etapas de espesamiento, acondicionamiento y deshidratación.

Dentro del análisis, la calidad del residuo proveniente del proceso de coagulación-floculación (C-F), se obtuvo una concentración de 0.48 mg/L de ST, una concentración final de As(V) en el sobrenadante <0.003 mg/L y 7.59 mL/L de sólidos sedimentables, en este sentido las características de este lodo en la C-F, es frágil y difícil de disponer por el volumen de líquido presente.

Del análisis realizado, se identificaron los valores óptimos con un intervalo de confianza del 95% en el acondicionamiento para P1 y P2: Dosificación de polímero 284 mg/L, pH: 6.4; y Tiempo: 2 min, para continuar con ellos en la siguiente etapa de análisis de deshidratación. Siendo estos los principales factores que influyen en el acondicionamiento químico de los lodos producidos para su espesamiento, acondicionamiento y deshidratación.

De manera general se puede enunciar las siguientes conclusiones:

- Se remueve de manera eficiente las diferentes concentraciones de As, manteniendo valores inferiores al límite máximo permisible que establece la modificación del año 2000 de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994
- El lodo con As(V), presenta una mayor resistencia a la filtración en comparación a otros tipos de lodo (Al, Fe y Mn), ya que las presiones utilizadas para deshidratar el arsénico fueron mayores, lo que comprueba que a mayor presión mayor REF, por lo tanto, los tratamientos mediante estos procesos de filtración tienen mayor tiempo para lograr su deshidratación.
- Los polímeros utilizados acondicionan de manera eficiente el lodo, para la etapa de deshidratación.
- El lodo puede deshidratarse fácilmente acondicionando y empleando un método mecánico en la deshidratación, siendo en definitiva notable la disminución de volumen en el tratamiento de lodo.
- En el desaguado del lodo se comprueba la complejidad de lodos con As para

drenarlos ya que se observan valores negativos para una eficiencia de drenaje.

En segundo lugar, se realizó el estudio de las propiedades fisicoquímicas del lodo obtenido del proceso de coagulación-floculación-espesamiento, así como el estudio de la cinética de drenabilidad de cada ensayo de acondicionamiento y deshidratación por filtro banda.

Al evaluar el comportamiento de diferentes polímeros mediante un cribado para el proceso de acondicionamiento, de los siete polímeros analizados se obtuvo que el polímero AN 913 VHM y AN 945 VHM formaron más lodo al tener un valor de 450 ml/L de sólidos sedimentables, siendo estos polímeros de carácter iónico y de alto peso molecular se favoreció la aglomeración de los sólidos observando un índice de Willcomb de 8 lo cual indica un buen flóculo que se deposita fácilmente, de igual manera removieron de forma eficiente el arsénico presente en la muestra de agua con un valor de 0 µg/L en el sobrenadante, por lo que se consideraron estos dos polímeros como los mejores para el proceso de acondicionamiento químico.

Se realizó la comparación de la cinética e índice de drenabilidad del lodo obtenido de cada ensayo en el acondicionamiento químico y deshidratación por filtro banda "Bootest", donde se observó que la malla 302 C con permeabilidad 80-100 CFM/FT2 tuvo menor duración en el tiempo de drenaje a una dosificación de polímero de 800 mg/L.

El mejor ensayo de este trabajo de investigación fue el número 39, en el cual se usó el polímero AN 945 VHM y la malla 302 C con permeabilidad 80-100 CFM/FT2, donde se obtuvo un índice de drenabilidad de 1.8788, siendo este un valor positivo en comparación a los diferentes ensayos realizados y a estudios previos de García (2017) de lodo con arsénico, donde se obtuvo un índice de drenabilidad de -1.1.

Se concluye con base en los resultados obtenidos que las condiciones óptimas para el acondicionamiento y deshidratación de lodo con arsénico en filtro banda son: polímero AN 913 VHM con dosis de 800 mg/L con la malla 302 C con permeabilidad 80-100 CFM/FT2 con una mezcla rápida de 14 segundos a 100 rpm y una mezcla lenta de 9 segundos a 30 rpm.

Al ser acondicionado, el lodo puede deshidratarse de manera eficaz mediante un método mecánico como el filtro banda "Bootest" con las condiciones óptimas de las variables que intervienen en este proceso, logrando reducir significativamente el volumen del lodo y mejorando su disposición final.

En tercer lugar, se realizaron estudios en que se concluyen lo siguiente:

El estudio de las propiedades fisicoquímicas, sí influyen en el mejoramiento de la deshidratación del lodo acondicionado y se concluye que conforme aumenta el pH, se reduce el tiempo de pérdida de humedad en general y el análisis del

Potencial Z a diferentes pH muestra, por su carga negativa, una estabilidad en la dosificación.

Se determinó que el pH sí influye en la deshidratación de lodos. A un pH 7, se observa un mayor porcentaje de humedad superficial (69.28%) en el acondicionamiento del lodo, mejorando la etapa de deshidratación. Se concluye que el caso de estudio con pH 7, se obtuvo un mejor rendimiento en cuanto a las propiedades fisicoquímicas del acondicionamiento, ya que, en comparación con los otros casos, se observó un mejor comportamiento en sus valores de sólidos totales, resistencia específica a la filtración, humedad, Tamaño de Flóculo e Índice del Willcomb. Los lodos con arsénico obtenidos contribuyen a disminuir costos de disposición final para plantas potabilizadoras y daños a la salud pública.

De acuerdo con los resultados del índice de drenado calculado a través de los valores de referencia ajustados en este trabajo, se concluye el lodo con el mejor índice de drenado corresponde al pH (7) con un valor de 1.05 y un porcentaje del 77% en su masa inicial.

Como aporte tecnológico se construyó un prototipo para realizar pruebas de cinéticas de deshidratación a nivel laboratorio, el cuál será muy beneficioso a nivel de prácticas en el Laboratorio Ambiental de la Subcoordinación de Posgrado del IMTA. Se inscribirá este prototipo como modelo de utilidad ante el IMPI.

7. ¿EN QUÉ MEDIDAD CONSIDERA QUE LOS RESULTADOS DE SU PROYECTO TIENEN O TENDRÁN IMPACTO PARA ENCONTRAR UNA SOLUCIÓN AL PROBLEMA SELECCIONADO?

Varios cuestionamientos sobre las características, producción e impactos ambientales de los residuos generados en el tratamiento de agua todavía no poseen respuestas satisfactorias que posibiliten un manejo adecuado del problema. Esto se debe a los pocos trabajos de investigación científica y tecnológica realizados sobre el tema y en especial trabajos que aborden específicamente el tema de caracterización y eliminación de los residuos con arsénico. Los pocos datos existentes están totalmente dispersos lo que dificultan las acciones en ese campo.

Desde un punto de vista técnico, el objetivo del manejo de residuos es usualmente minimizar, mediante recuperación de materiales que pueden ser reciclados o reducción del contenido de agua, las cantidades de residuo al que debe darse disposición final. En la mayoría de los casos, el transporte y disposición final son los componentes que más impactan al costo total del manejo de residuos, por lo que la opción más económica es reducir la cantidad de material para disposición final.

Los resultados obtenidos en esta investigación, tendrán un impacto importante en el estudio de las propiedades físicas y químicas de los lodos en cada uno de los procesos que conforman el tratamiento de éstos. Hasta la fecha hay muy pocos estudios a nivel de investigación realizados para mejorar la calidad de los lodos, que posteriormente deben ser dispuestos en zonas confinadas para residuos tóxicos, por lo que considero que este proyecto genero conocimiento científico de alto valor para que las plantas potabilizadoras que remueven arsénico del agua para uso y consumo humano, tengan los elementos necesarios desde un punto científico para la tratabilidad de lodos con arsénico, los cuales son muy tóxicos que repercuten de forma negativa en el medio ambiente.