

Remoción de arsénico de las aguas naturales

Gastón Mendoza Gámez *
David Gómez Salas **

ABSTRACT

The results of experimental studies including chemical coagulation and adsorption of the activated alumina processes to remove arsenic from underground water in the La Laguna Region of the State of Coahuila, México, are presented.

Under operating conditions established, the results show that iron salts are efficient coagulants and the very fine granulometry of the activated alumina substantially arsenic adsorption.

The importance of studying these conditions in order to improve arsenic recovery in the activated alumina regeneration cycle is insisted upon.

RESUMEN

Se presentan los resultados del estudio experimental de los procesos de coagulación química y adsorción con alúmina activada para remover arsénico de las aguas subterráneas de la región Lagunera, en el estado de Coahuila, México.

En las condiciones de operación establecidas, los resultados muestran que las sales de hierro son coagulantes eficaces y que la granulometría muy fina de la alúmina activada aumenta sustancialmente la adsorción de arsénico. Se destaca la necesidad de estudiar las condiciones para mejorar la recuperación de arsénico en el ciclo de regeneración de la alúmina activada.

1. INTRODUCCION

La presencia de arsénico en las aguas naturales se puede deber al contacto con suelos que los contienen y a contaminación por desechos de las industrias metalúrgicas y drenajes agrícolas. El empleo de este elemento en agentes germicidas, insecticidas, fertilizantes, detergentes, preservativos de madera, aditivos de alimentos para animales, etc, ha provocado alteraciones en la calidad natural de los cuerpos de agua y suelos de muchas zonas.

El arsénico se halla en el agua como arsenito, arsenato o ácido. La forma predominante depende del pH del agua y la presencia o ausencia de un oxidante. El arsenito es la forma más tóxica, con la característica de que se acumula en el organismo.

* Investigador , Instituto de Ingeniería, UNAM

** Ayudante de Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM

Se ha comprobado que el arsénico es carcinógeno; se conocen muchos casos de cáncer en la piel de personas que han ingerido aguas contaminadas; entre otros, se tienen los estudios hechos en Reichenstein, Silesia; Córdoba, Argentina; Taiwán y la región Lagunera en México.

Para evitar estos efectos, se han fijado límites en el agua que se utiliza para beber, considerándose una concentración de 0.05 mg/lit como máximo tolerable y 0.01 mg/lit como límite recomendable.

El estudio experimental para valuar la remoción de arsénico, se planteó considerando los antecedentes del problema en la región Lagunera. En 1962 se presentaron 40 casos de enfermedad y una defunción por intoxicación arsenical; además, en varios pozos de la región se ha venido detectando presencia de arsénico en cantidades que superan el máximo tolerable. En Torreón se localiza la Cía. Metalúrgica Mexicana Peñoles, que beneficia más de 350 000 ton de mineral al año (ref 1) y que arroja a la atmósfera óxidos de plomo, oro, cobre y arsénico, además de almacenar escorias que contienen arsénico, entre otros productos. Aunque todo parece indicar que la presencia de arsénico en las aguas se debe a esta fuente de contaminación, no se ha comprobado si el origen del arsénico es natural.

El carácter endémico del arsenicismo en la región Lagunera se comprobó mediante un estudio epidemiológico realizado en un área al norte de la misma, que comprendió los municipios de Francisco I. Madero y San Pedro. Se estudiaron en particular 268 casos que presentaron síntomas de intoxicación crónica, verificándose que las lesiones dérmicas eran cancerígenas (ref 1).

Como dicha región solo dispone de agua subterránea con un rendimiento limitado anual, se deben buscar soluciones para controlar la contaminación y potabilizar el agua. Se consideró conveniente estudiar algunos procesos de tratamiento a fin de evaluar eficiencias que sirvan de base para el diseño y costo de una planta de tratamiento.

Los experimentos se plantearon para realizarlos con muestras de agua de la zona con mayores concentraciones de arsénico, por lo que se iniciaron en tres pozos del municipio Francisco I. Madero. Para facilitar el envío de muestras y el trabajo de laboratorio, se acordó estudiar únicamente el agua del pozo La Esperanza, que tiene la concentración más alta de arsénico.

2. PROCESOS DE REMOCION

Se ha experimentado con diversos procesos físicos y químicos para remover arsénico.

La sedimentación simple tiene cierta eficiencia, pero con periodos de retención de más de 10 días.

Se han obtenido buenos resultados con intercambiadores iónicos, pero el proceso es costoso y su operación compleja.

Se ha evaluado la alta eficiencia de la coagulación química con sales de hierro, encontrándose baja eficiencia con sulfato de aluminio.

La filtración lenta en arena es efectiva, pero las carreras de operación son cortas al disminuir la capacidad de adsorción del medio.

La adsorción con carbón de hueso es efectiva, pero la recuperación del arsénico durante la regeneración del medio es baja, lo que hace que el carbón se sature rápidamente. Además, hay indicios de que el arsénico adsorbido provoca un cambio irreversible en la estructura química básica del carbón.

La adsorción con alúmina activada es muy eficiente con ajustes del pH. Con frecuencia se requiere aumentar la concentración y volumen del regenerante para mejorar la recuperación de arsénico.

Para este estudio, se seleccionaron los procesos de coagulación química y adsorción con alúmina activada para evaluar eficiencias de remoción.

2.1 Método para determinar arsénico

Se seleccionó el estándar colorimétrico que emplea el dietil-ditio-carbamato de plata, que es muy preciso (ref 2).

3. ANALISIS DE LAS AGUAS

Las muestras de agua se analizaron en el laboratorio de ingeniería sanitaria del Instituto de Ingeniería. Los resultados se presentan en las tablas 1 y 2.

TABLA 1. ANALISIS FISICOQUIMICO DE AGUAS DE TRES POZOS DE LA REGION LAGUNERA

Fecha de muestreo: 28 de febrero de 1974

Parámetro	P O Z O S		
	San Salvador	Esperanza	Finisterre
pH	8.4	8.7	8.1
Sólidos totales	260	1 520	1 060
Sólidos disueltos	240	1 500	1 040
Sólidos suspendidos	20	20	20
Alcalinidad total (CaCO ₃)	140	278	194
Alcalinidad de carbonatos (CaCO ₃)	8	20	4
Dureza total (CaCO ₃)	32	76	104
Dureza cálcica (CaCO ₃)	24	56	92
Cloruro (Cl ⁻)	8	36	52
Sulfato (SO ₄ ⁼)	56	720	520
Hierro	0	0	0.25
Manganeso	0	0	0
Arsénico	0.45	1.3	0.36

Los resultados se expresan en mg/lit, excepto el pH

TABLA 2. ANALISIS FISICOQUIMICO DEL POZO LA ESPERANZA

Parámetro	Muestra de abril de 1974	Muestra de julio de 1974
pH	8.3	8.0
Sólidos totales		900
Alcalinidad total (CaCO ₃)	224	242
Alcalinidad de carbonato (CaCO ₃)	16	0
Dureza total (CaCO ₃)		84
Dureza cálcica (CaCO ₃)		68
Cloruro (Cl ⁻)	24	26
Sulfato (SO ₄ ⁼)	470	540
Hierro	0.1	0.08
Manganeso		0.01
Arsénico	0.7	0.5

Los resultados se expresan en mg/lit, excepto el pH

Las tres primeras pruebas de coagulación se hicieron con agua de los pozos San Salvador, La Esperanza y Finisterre; las demás, junto con las de adsorción, con agua del pozo La Esperanza, que tiene el contenido más alto de arsénico (de 0.5 a 1.3 mg/lit).

4. EXPERIMENTACION CON EL PROCESO DE COAGULACION

Las variables que afectan el proceso son las siguientes: concentración de coloides; pH y alcalinidad del agua; tipo y dosificación de coagulante.

Para esta etapa experimental se decidió ensayar con aguas en condiciones naturales, teniendo como variables el tipo de coagulante y su dosificación; al respecto, se utilizaron cloruro férrico, $FeCl_3$, sulfato férrico, $Fe_2(SO_4)_3$ y sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3$.

4.1 Ensayes

Se empleó el método de jarras, fijando las condiciones experimentales para tener congruencia al comparar los resultados.

Se evaluó la eficiencia de remoción para diferentes valores del factor F , definido por la relación dosis de coagulante-concentración de arsénico y condiciones de tratamiento con filtración y sin ella.

4.1.1 Coagulantes

Se emplearon productos químicos grado reactivo. Las soluciones se prepararon al uno por ciento, en que cada mililitro equivalía a 10 mg del coagulante.

4.1.2 Equipo

Para las pruebas de coagulación se usaron agitadores mecánicos marca Phipps & Bird de velocidad variable.

Para determinar el pH se utilizó un potenciómetro marca Beckman, modelo Zeromatic II.

Para determinar arsénico se empleó un espectrofotómetro Bausch & Lomb, con filtro de máxima transmisión entre 530 y 540 m μ y celdas de 1 cm.

4.1.3 Control

Las pruebas de coagulación se efectuaron en la forma siguiente:

Mezcla rápida	Durante un minuto a 100 rpm
Floculación	20 min a 40 rpm, continuando 10 min a 20 rpm
Sedimentación	30 min

En cada juego de pruebas se tuvo una jarra testigo a la que no se dosificaba coagulante, a fin de verificar si existía adsorción de arsénico en las paredes de la jarra y las paletas de agitación. En ningún caso la hubo.

4.1.4 Programa de ensayos

Los tres primeros se hicieron con muestras de agua de tres pozos y los dos últimos con agua del pozo La Esperanza. Cada ensayo incluyó 18 jarras; se emplearon cloruro férrico, sulfato férrico y sulfato de aluminio, respectivamente.

En el cuarto ensayo se emplearon los tres coagulantes y en el quinto únicamente sales de hierro.

Todas las pruebas se hicieron con pH natural de las aguas y con dosis crecientes de coagulante. Se midió el tiempo de aparición del flóculo y se calificó su tamaño. Además de determinar el contenido de arsénico en las muestras tratadas con filtración y sin ella, se calcularon el pH y la alcalinidad de las muestras filtradas. Los resultados se presentan en las tablas 3 a 7.

4.2 Interpretación de resultados

A partir del contenido de arsénico remanente en las muestras con filtración y sin ella, se calcularon las eficiencias de remoción para distintos valores del factor F , definido por

$$F = \frac{\text{Dosis de coagulante}}{\text{Concentración original de arsénico}}$$

Las eficiencias para los tres primeros ensayos se anotan en la tabla 8; a partir de ellas se obtuvieron las ecuaciones que expresan la relación entre la eficiencia e y el factor F (tabla 9).

Las tres primeras pruebas de coagulación se hicieron con agua de los pozos San Salvador, La Esperanza y Finisterre; las demás, junto con las de adsorción, con agua del pozo La Esperanza, que tiene el contenido más alto de arsénico (de 0.5 a 1.3 mg/lit).

4. EXPERIMENTACION CON EL PROCESO DE COAGULACION

Las variables que afectan el proceso son las siguientes: concentración de coloides; pH y alcalinidad del agua; tipo y dosificación de coagulante.

Para esta etapa experimental se decidió ensayar con aguas en condiciones naturales, teniendo como variables el tipo de coagulante y su dosificación; al respecto, se utilizaron cloruro férrico, $FeCl_3$, sulfato férrico, $Fe_2(SO_4)_3$ y sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3$.

4.1 Ensayes

Se empleó el método de jarras, fijando las condiciones experimentales para tener congruencia al comparar los resultados.

Se evaluó la eficiencia de remoción para diferentes valores del factor F , definido por la relación dosis de coagulante-concentración de arsénico y condiciones de tratamiento con filtración y sin ella.

4.1.1 Coagulantes

Se emplearon productos químicos grado reactivo. Las soluciones se prepararon al uno por ciento, en que cada mililitro equivalía a 10 mg del coagulante.

4.1.2 Equipo

Para las pruebas de coagulación se usaron agitadores mecánicos marca Phipps & Bird de velocidad variable.

Para determinar el pH se utilizó un potenciómetro marca Beckman, modelo Zeromatic II.

Para determinar arsénico se empleó un espectrofotómetro Bausch & Lomb, con filtro de máxima transmisión entre 530 y 540 $m\mu$ y celdas de 1 cm.

4.1.3 Control

Las pruebas de coagulación se efectuaron en la forma siguiente:

Mezcla rápida	Durante un minuto a 100 rpm
Floculación	20 min a 40 rpm, continuando 10 min a 20 rpm
Sedimentación	30 min

En cada juego de pruebas se tuvo una jarra testigo a la que no se dosificaba coagulante, a fin de verificar si existía adsorción de arsénico en las paredes de la jarra y las paletas de agitación. En ningún caso lo hubo.

4.1.4 Programa de ensayos

Los tres primeros se hicieron con muestras de agua de tres pozos y los dos últimos con agua del pozo La Esperanza. Cada ensaye incluyó 18 jarras; se emplearon cloruro férrico, sulfato férrico y sulfato de aluminio, respectivamente.

En el cuarto ensaye se emplearon los tres coagulantes y en el quinto únicamente sales de hierro.

Todas las pruebas se hicieron con pH natural de las aguas y con dosis crecientes de coagulante. Se midió el tiempo de aparición del flóculo y se calificó su tamaño. Además de determinar el contenido de arsénico en las muestras tratadas con filtración y sin ella, se calcularon el pH y la alcalinidad de las muestras filtradas. Los resultados se presentan en las tablas 3 a 7.

4.2 Interpretación de resultados

A partir del contenido de arsénico remanente en las muestras con filtración y sin ella, se calcularon las eficiencias de remoción para distintos valores de factor F , definido por

$$F = \frac{\text{Dosis de coagulante}}{\text{Concentración original de arsénico}}$$

Las eficiencias para los tres primeros ensayos se anotaron en la tabla 8; a partir de ellas se obtuvieron las ecuaciones que expresan la relación entre la eficiencia e y el factor F (tabla 9).

TABLA 3. ENSAYE 1: COAGULACION CON CLORURO FERRICO a pH NATURAL

Pozo San Salvador, pH = 8.4, arsénico = 0.45 mg/lit

Jarra	Dosis, en mg/lit	Flóculo		Calidad del efluente					
		Tiempo inicio, en min	Aparien- cia	pH	Arsénico, en mg/lit		AF/AT	Cl ⁻ en mg/lit	SD
					Porc sed	Porc filt			
1S	0	—	—	8.4	0.384	0.328	6/146	8	338
2S	20	—	—	8.3	0.384	0.250	6/140	16	300
3S	30	15	f	8.4	0.200	0.006	6/142	16	300
4S	40	11	r	8.2	0.008	0	4/134	32	260
5S	50	11	r	8.2	0.006	0	6/126	28	280
6S	60	11	r	8.0	0.016	—	4/128	32	280

Pozo La Esperanza, pH = 8.7, arsénico = 1.3 mg/lit

Jarra	Dosis, en mg/lit	Flóculo		Calidad del efluente					
		Tiempo inicio, en min	Aparien- cia	pH	Arsénico, en mg/lit		AF/AT	Cl ⁻ en mg/lit	SD
					Porc sed	Porc filt			
1E	0	—	—	8.7	0.86	0.77	20/290	40	1 540
2E	20	—	—	8.6	0.66	0.62	16/278	48	1 400
3E	30	—	—	8.55	0.60	0.58	16/276	48	1 460
4E	40	12	mf	8.35	—	0.32	16/266	56	1 500
5E	50	7	f	8.35	0.392	—	12/254	56	1 500
6E	60	7	r	8.25	0.016	0.072	12/258	56	1 500

Pozo Finisterre, pH = 8.5, arsénico = 0.36 mg/lit

Jarra	Dosis, en mg/lit	Flóculo		Calidad del efluente					
		Tiempo inicio, en min	Aparien- cia	pH	Arsénico, en mg/lit		AF/AT	Cl ⁻ en mg/lit	SD
					Porc. sed	Porc filt			
1F	0	—	—	8.5	0.352	0.30	10/202	52	1 120
2F	20	20	mf	8.2	0.288	0.28	6/186	64	1 080
3F	30	10	mf	8.3	0.018	0	6/186	64	1 000
4F	40	7	f	8.1	0.078	0	8/178	68	—
5F	50	3	r	8.0	0.006	0	10/174	72	1 300
6F	60	3	r	8.0	0.016	0	6/174	76	1 300

NOTACIONES

AF/AT Alcalinidad a la fenolftaleína/alcalinidad total

SD Sólidos disueltos

Apariencia del flóculo:

mf muy fino

f fino

r regular

TABLA 4 ENSAYE 2. COAGULACION CON SULFATO FERRICO a pH NATURAL

Pozo San Salvador, pH = 8.32, arsénico = 0.45 mg/lit

Jarra	Dosis en mg/lit	Flóculo Tiempo Aparien- inicio, en min cia		Calidad del efluente				
				pH	Arsénico, en mg/lit		AF/AT	SO ₄ ⁼ en mg/lit
7S	0			7.75	0.323	0.308	0/75	56
8S	20			7.75	0.323	0.123	0/64	76
9S	30			7.50	0.258	0.036	0/64	76
10S	40			7.75	0.1	0.006	0/59	84
11S	50			7.75	0.044	0	0/56	84
12S	60			7.72	0.008	—	0/56	112

Pozo La Esperanza, pH = 8.7, arsénico = 1.3 mg/lit

Jarra	Dosis, en mg/lit	Flóculo Tiempo Aparien- inicio, en min cia		Calidad del efluente				
				pH	Arsénico, en mg/lit		AF/AT	SO ₄ ⁼ en mg/lit
7E	0			8.6	0.745	0.77	3/135	720
8E	20			8.3	0.697	0.38	3/125	720
9E	30			8.2	0.655	0.33	3/123	760
10E	40			8.15	0.6	0.288	3/121	770
11E	50			8.0	0.522	0.21	3/120	780
12E	60			7.85	0.266	0.016	1/119	780

Pozo Finisterre, pH = 8.4, arsénico = 0.36 mg/lit

Jarra	Dosis, en mg/lit	Flóculo Tiempo Aparien- inicio, en min cia		Calidad del efluente				
				pH	Arsénico, en mg/lit		AF/AT	SO ₄ ⁼ en mg/lit
7F	0	--	--	8.2	0.258	0.196	8/100	520
8F	20	--	--	8.2	0.158	0.072	1/92	530
9F	30	6	f	8.1	0.044	0.006	6/96	530
10F	40	4	r	8.0	0.02	0.005	5/90	540
11F	50	3	r	7.9	0.024	0	6/86	540
12F	60	3	r	7.8	—	0	0/80	540

NOTACIONES

AF/AT Alcalinidad a la fenolftaleína/Alcalinidad total

Apariencia del flóculo:

f fino

r regular

TABLA 5. ENSAYE 3. COAGULACION CON SULFATO DE ALUMINIO a pH NATURAL

Pozo San Salvador, pH = 8.5, arsénico = 0.45 mg/Lt

Jarra	Dosis, en mg/Lt	Calidad del efluente				
		pH	Arsénico, en mg/Lt		AF/AT	SO ₄ ⁼ en mg/Lt
			Porc sedim	Porc filtr		
13 S	0	8.45	—	—	4/144	60
14 S	20	8	—	0.38	4/144	72
15 S	30	7.75	—	0.254	4/140	76
16 S	40	7.6	0.132	0.224	6/132	76
17 S	50	7.5	0.288	0.124	6/140	76
18 S	60	7.5	—	—	8/116	82

Pozo La Esperanza, pH = 8.7, arsénico = 1.3 mg/Lt

Jarra	Dosis, en mg/Lt	Calidad del efluente				
		pH	Arsénico, en mg/Lt		AF/AT	SO ₄ ⁼ en mg/Lt
			Porc sedim	Porc filtr		
13 E	0	8.7	1.28	0.82	24/272	690
14 E	20	8.35	0.94	0.807	24/264	700
15 E	30	8.15	0.8	0.807	8/264	700
16 E	40	7.9	0.76	0.8	12/264	700
17 E	50	7.6	0.67	0.72	28/264	710
18 E	60	7.5	0.62	0.312	32/256	710

Pozo Finisterre, pH = 8.4, arsénico = 0.36 mg/Lt

Jarra	Dosis, en mg/Lt	Calidad del efluente				
		pH	Arsénico, en mg/Lt		AF/AT	SO ₄ ⁼ en mg/Lt
			Porc sedim	Porc filtr		
13 F	0	8.4	0.305	0.291	16/192	470
14 F	20	7.85	0.205	0.216	8/184	470
15 F	30	7.8	0.163	0.168	20/264	480
16 F	40	7.6	0.124	0.139	12/180	520
17 F	50	7.6	0.119	0.118	16/180	520
18 F	60	7.4	0.072	0.068	12/172	510

NOTACION

AF/AT Alcalinidad a la fenolftaleína/alcalinidad total

TABLA 6 ENSAYE 4. COAGULACION DEL AGUA DEL POZO LA ESPERANZA CON CLORURO FERRICO, SULFATO FERRICO Y SULFATO DE ALUMINIO, a pH NATURAL (8.3) Y UNA CONCENTRACION DE ARSENICO DE 0.7 mg/lt

Cloruro Férrico							
Jarra	Dosis, en mg/lt	Flóculo		pH	Calidad del efluente		
		Tiempo inicio, en min	Apariencia		Arsénico (muestra filtrada), en mg/lt	Alcalinidad total, en mg/lt	
19 E	50	4	r	7.4	0.064	196	
20 E	60	4	r	7.35	0.056	192	
21 E	70	1	r	7.25	0.038	188	
22 E	80	1	r	7.15	0.033	184	
23 E	90	1	r	7.1	0.019	172	
24 E	100	1	r	7	0.038	172	
Sulfato férrico							
Jarra	Dosis, en mg/lt	Flóculo		pH	Calidad del efluente		
		Tiempo inicio, en min	Apariencia		Arsénico (muestra filtrada), en mg/lt	Alcalinidad total, en mg/lt	
25 E	50	4	b	7.5	0.08	196	
26 E	60	4	b	7.4	0.06	192	
27 E	70	1	b	7.3	0.044	188	
28 E	80	1	b	7.2	0.004	184	
29 E	90	1	b	7.1	0.012	176	
30 E	100	1	b	7	0.008	172	
Sulfato de aluminio							
Jarra	Dosis, en mg/lt	Flóculo		pH	Calidad del efluente		
		Tiempo inicio, en min	Apariencia		Arsénico (muestra filtrada), en mg/lt	Alcalinidad total, en mg/lt	
31 E	50	12	mf	7.5	0.203	200	
32 E	60	12	mf	7.4	—	196	
33 E	70	10	mf	7.35	0.106	192	
34 E	80	10	f	7.3	0.103	188	
35 E	90	10	f	7.25	0.101	184	
36 E	100	10	f	7.2	0.08	180	

NOTACIONES

mf muy fino
f fino
r regular
b bueno

TABLA 7. ENSAYE 5. COAGULACION DEL AGUA DEL POZO LA ESPERANZA CON CLORURO FERRICO Y SULFATO FERRICO, A pH NATURAL (8.3) Y UNA CONCENTRACION DE ARSENICO DE 0.5 mg/lit

Cloruro férrico						
Jarra	Dosis, en mg/lit	Tiempo inicio, en min	Flóculo Apariencia	Calidad del efluente		
				pH	Arsénico, en mg/lit Porc sedim Porc filt	
37 E	50	2	f	7.75	0.02	0
38 E	60	2	f	7.4	0.002	0
39 E	70	2	r	7.35	0.007	0
40 E	80	2	r	7.35	0.008	0
41 E	90	2	r	7.3	0.007	0
42 E	100	2	r	7.25	0.008	0
43 E	110	2	r	7.2	0.008	0
Sulfato férrico						
Jarra	Dosis, en mg/lit	Tiempo inicio, en min	Flóculo Apariencia	Calidad del efluente		
				pH	Arsénico, en mg/lit Porc sedim Porc filt	
44 E	50	1	f	7.5	0.008	0
45 E	60	1	f	7.45	0.007	0
46 E	70	1	r	7.35	0.002	0
47 E	80	1	r	7.3	0.002	0
48 E	90	1	r	7.3	0.002	0
49 E	100	1	r	7.2	0.007	0
50 E	110	1	r	7.2	0.004	0

f fino
r regular

TABLA 8. VALORES DE F, e y ef, CALCULADOS A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYES 1 a 3

Cloruro férrico			Sulfato férrico			Sulfato de aluminio		
Pozo San Salvador								
F	e	ef	F	e	ef	F	e	ef
0	0	0.15	0	0	0.046	0	0	0
52.08	0	0.35	61.95	0	0.619	27.77	0.3	0.472
78.12	0.48	0.98	92.93	0.2	0.89	41.66	0.3	0.647
104.16	0.98	1	123.91	0.69	0.98	55.55	0.567	0.689
130.2	0.984	1	154.9	0.86	1	69.44	0.6	0.828
156.25	0.96	—	185.87	0.97	—	83.33	—	—
Pozo La Esperanza								
0	0	0.1	0	0	0	0	0	0.359
23.26	0.233	0.279	26.85	0.064	0.49	15.62	0.266	0.37
34.88	0.302	0.326	40.27	0.121	0.557	23.44	0.375	0.37
46.51	—	0.628	53.69	0.195	0.613	31.25	0.406	0.375
58.14	0.544	—	67.11	0.299	0.718	39.06	0.476	0.437
69.77	0.981	0.916	80.54	0.643	0.978	46.87	0.516	0.756
Pozo Finisterre								
0	0	0.148	0	0	0.241	0	0	0.046
56.82	0.182	0.204	77.4	0.387	0.721	65.57	0.328	0.292
85.23	0.95	1	116.1	0.83	0.977	98.36	0.466	0.45
113.63	0.778	1	154.8	0.923	0.981	131.15	0.593	0.544
142.04	0.983	1	193.5	0.907	1	163.93	0.61	0.613
170.45	0.954	1	232.2	—	1	196.72	0.764	0.777

F relación de dosis de coagulante a concentración de arsénico
 e eficiencia de remoción de arsénico en muestras sedimentadas
 ef eficiencia de remoción de arsénico en muestras sedimentadas y filtradas

TABLA 9 ECUACIONES QUE RELACIONAN LA EFICIENCIA DE REMOCION DE ARSENICO Y EL FACTOR F PARA LOS ENSAYES 1 a 3 DEL PROCESO DE COAGULACION

Coagulante	Eficiencia	P		O	Z		O	S	Finisterre	
		San Salvador			La Esperanza					
Cloruro férrico	e	-0.98	+ 0.018	F	-0.0634	+ 0.0128	F	-0.0158	+ 0.0075	F
	ef	0.0743	+ 0.0097	F	0.0293	+ 0.012	F	0.0381	+ 0.0087	F
Sulfato férrico	e	-0.496	+ 0.0084	F	-0.0964	+ 0.0071	F	-0.0155	+ 0.0063	F
	ef	0.4285	+ 0.0044	F	0.0772	+ 0.0108	F	0.2865	+ 0.0051	F
Sulfato de aluminio	e	0.0085	+ 0.0089	F	0.0597	+ 0.0108	F	0.0565	+ 0.0037	F
	ef	0.0725	+ 0.0117	F	0.387	- 0.0106	F	0.0625	+ 0.0036	F
					+0.0004 F ²					

e eficiencia para la porción sedimentada
 ef eficiencia para la porción sedimentada y filtrada

El valor óptimo de F se definió como aquel con el cual se alcanza una concentración final de arsénico menor de 0,01 mg/lit, que es el límite superior deseable en agua para beber.

Siendo
$$e = \frac{Co - Cf}{Co}$$

donde

Co Concentración original de arsénico

Cf concentración de arsénico después del tratamiento

Las ecuaciones se pueden escribir en la forma

$$\frac{Co - Cf}{Co} = a + bF \quad (1)$$

por tanto

$$Cf = (1-a)Co - bD \quad (2)$$

donde D es la dosis de coagulante, Cof .

La ec 2 define el valor de arsénico en el efluente tratado para parejas de valores de Co y D .

El valor óptimo de F se halla cuando $Cf=0.01$ mg/lit. Para cada prueba de los tres primeros experimentos, se calculó el valor óptimo de F , los promedios de estos valores y el coeficiente de variación.

En la tabla 10 se anotan los valores de F óptimo, sus promedios y los coeficientes de variación.

Para las condiciones de los ensayos de coagulación, el sulfato de aluminio es el menos adecuado de los productos empleados, aspecto que se manifiesta por la gran variación de F óptimo para los tres pozos y los altos valores del coeficiente de variación.

De los resultados de los tres primeros ensayos, se puede concluir:

- a) En las muestras de agua existe una fracción de arsénico en estado coloidal o soluble no filtrable, que se comprueba con las muestras testigo que tienen una concentración de arsénico menor en las porciones sedimentadas y filtradas, que en las solamente sedimentadas.

En este caso, para las muestras filtradas, la ec 2 se reduce a

$$Cf = (1 - a) Co \quad (3)$$

donde

a fracción no filtrable

$1-a$ fracción filtrable

- b) En algunas pruebas, la remoción de arsénico en muestras sedimentadas fue semejante en la jarra testigo y en las de menor dosis de coagulante. La remoción aumenta con mayores dosis de coagulante. En las expresiones obtenidas a partir de la ec 1, dadas en la tabla 9, se presenta este aspecto con los valores de $a < 0$, por lo que la ec 2 es aplicable para los valores de $D > \left| -\frac{a Co}{b} \right|$. Este valor D se define como dosis mínima para la coagulación.

4.2.1 Ensaye 4

Considerando que la remoción de arsénico aumenta con mayores dosis de coagulante, se experimentó con una segunda muestra del agua del pozo La Esperanza que contenía 0,7 mg/lit de arsénico, empleando los tres coagulantes con dosis entre 50 y 100 mg/lit. Los resultados se muestran en la tabla 6.

TABLA 10 VALORES OPTIMOS DE F DE LOS ENSAYES 1 a 3 DEL PROCESO DE COAGULACION

Coagulante	Muestra tratada	P O Z O S			\bar{F}	Cv, en porcentaje
		San Salvador	La Esperanza	Finisterre		
Cloruro férrico	Sedimentada	103.93	82.17	131.65	106	19.1
	Filtrada	92.75	79.92	107.30	93	12.1
Sulfato férrico	Sedimentada	174.39	152.53	155.05	161	6.18
	Filtrada	122.85	84.20	132.31	113	18.4
Sulfato de aluminio	Sedimentada	109.84	86.34	246.14	147	47.8
	Filtrada	78.08	54.34	251.31	128	68.5

La prueba con sulfato de aluminio no fue satisfactoria, ya que con ninguna dosis se logró un contenido final de arsénico menor de 0.01 mg/lit en las muestras filtradas; además, el tiempo requerido para la aparición del flóculo, en todas las jarras fue de 10 min o mayor.

La remoción deseada se logró con 80 mg/lit de sulfato férrico, valor que concuerda con el calculado en los tres primeros ensayos, donde para $C_0 = 0.7$ mg/lit y $F = 113$; la dosis calculada es 79.1 mg/lit.

4.2.2 Ensaye 5

A fin de confirmar la eficacia de las sales de hierro, se efectuó este ensaye con otra muestra de agua del pozo La Esperanza, con un contenido de arsénico de 0.5 mg/lit. Se emplearon dosis entre 50 y 110 mg/lit. Los resultados se anotan en la tabla 7.

En todas las porciones filtradas, la remoción de arsénico fue total, considerándose ligeramente más efectivo el sulfato férrico, puesto que la remoción de arsénico en las porciones sedimentadas fue mayor que en las del cloruro férrico para las mismas dosis. En la tabla 11 se presentan los valores del factor F y las eficiencias calculadas.

4.3 Evaluación

De los tres coagulantes empleados, el sulfato férrico, resultó más adecuado, ya que la floculación fue muy buena, los resultados fueron reproducibles y el valor óptimo del factor F no es alto. En las condiciones en que se efectuaron los ensayos, se puede conocer la dosis necesaria de sulfato férrico para la coagulación del agua con una concentración dada de arsénico.

Para aproximar mejor el valor F óptimo, el diseño experimental debe involucrar los parámetros pH y alcalinidad, con el fin de establecer una correlación múltiple. Esto será motivo de otra gran etapa experimental

5. EXPERIMENTACION CON EL PROCESO DE ADSORCION

La eficiencia de este proceso fisicoquímico está en función del área superficial del adsorbente, concentración y naturaleza del soluto, pH y temperatura del solvente.

En los ensayos programados se varió el área superficial del adsorbente y se mantuvieron las condiciones naturales del pH y la temperatura de las muestras, a fin de evaluar la efectividad de la alúmina activada para remover arsénico.

La experimentación permite definir la capacidad del adsorbente (kilogramo arsénico removido/m³ de lecho) para disminuir la concentración del tóxico a un nivel predeterminado, la velocidad de paso para calcular el área superficial del lecho, y la duración del ciclo de adsorción y regeneración más conveniente para calcular el volumen del lecho de una planta de tratamiento a escala industrial.

Con los resultados del ensaye 4, se analizaron la isoterma de adsorción y la curva de operación de la columna adsorbente, valuándose asimismo la tasa de transferencia del soluto.

TABLA 11 VALORES DE F , e y ef A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYE 5

Pozo La Esperanza

Concentración de arsénico $C_0 = 0.5$ mg/lit

Cloruro férrico				Sulfato férrico			
D	F	e, en porcentaje	ef, en porcentaje	D	F	e, en porcentaje	ef, en porcentaje
50	100	96	100	50	100	98.4	100
60	120	96	100	60	120	98.6	100
70	140	98.6	100	70	140	99.6	100
80	160	98.4	100	80	160	99.6	100
90	180	98.6	100	90	180	99.6	100
100	200	98.4	100	100	200	98.6	100
110	220	98.4	100	110	220	99.2	100

Los ensayos se hicieron con muestras de agua del pozo La Esperanza, con concentraciones de arsénico 0.63 y 0.81 mg/lit. Se empleó el sistema de flujo continuo en lecho fijo, donde la tasa de adsorción depende de la concentración del soluto. En este sistema el adsorbente está en contacto continuo con solución nueva.

Se realizaron cinco ensayos empleando tres tipos de granulometría de la alúmina activada, diferentes velocidades de paso y tiempos de contacto.

La regeneración de la alúmina activada se hizo con una solución de hidróxido de sodio al uno por ciento, con diferentes condiciones de operación para evaluar eficiencias.

El exceso cáustico se neutralizó con una solución de ácido sulfúrico 0.1 N.

5.1 Columna adsorbente

La alúmina se empacó en una columna de vidrio pyrex, con 4 cm de grava en el fondo como soporte.

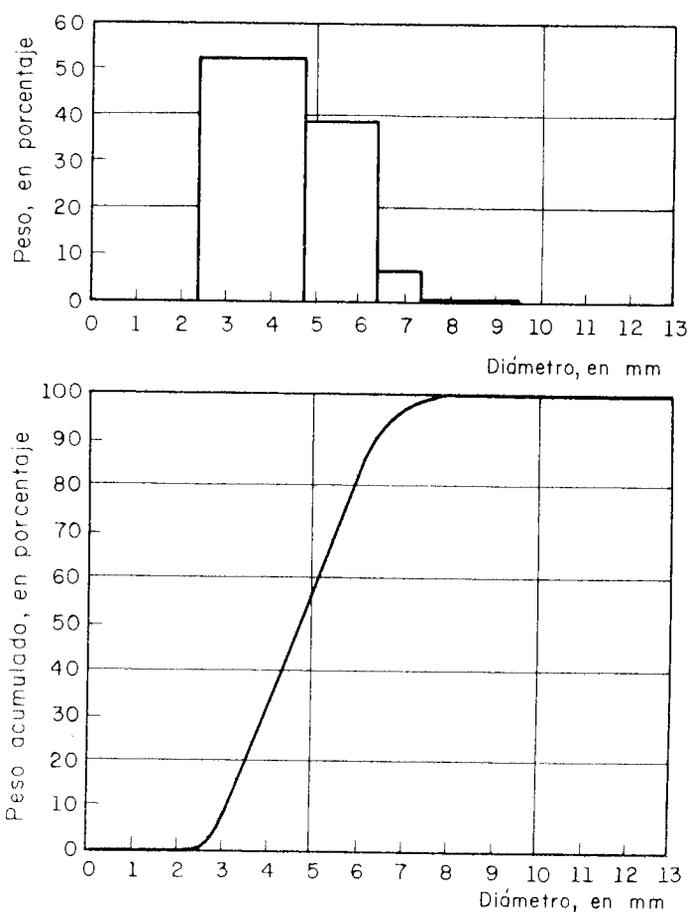


Fig 1. Distribución de densidad y distribución acumulada de la alúmina activada empleada en los ensayos 1 y 2

Se utilizó como adsorbente el producto KA-201, que se emplea como desecante en las industrias química y del petróleo. El producto es de alta pureza, con un contenido de óxido de aluminio (Al_2O_3) de 93.6 por ciento. El material es granular, con el tamaño que se muestra en la fig 1, área superficial de $350 \text{ m}^2/\text{g}$ y 65 por ciento de porosidad.

5.1.1 Análisis granulométrico

La distribución del tamaño de los granos se adaptó a una función de distribución gamma. Los valores de la media, desviación estándar y los parámetros α , β , δ de la función, para los tres tipos de granulometría ensayados, son:

Tipo	Ensaye	\bar{X} , en mm	s, en mm	α	β	δ , en mm
1	1 y 2	4.612	4.241	0.570	5.618	1.410
2	3	0.867	0.462	1.518	0.375	0.297
3	4 y 5	0.622	0.245	1.748	0.186	0.247

En las figs 1 a 3 se presentan las distribuciones de densidad de la alúmina activada empleada.

Para aplicar los resultados de los ensayos, se deberán reproducir las características granulométricas del adsorbente.

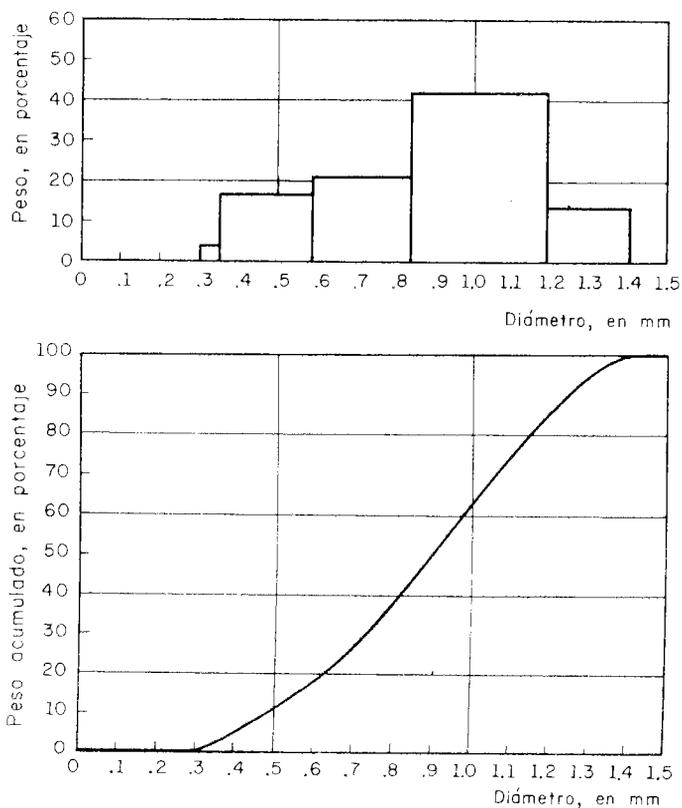


Fig 2. Distribución de densidad y distribución acumulada de la alúmina activada empleada en el ensayo 3

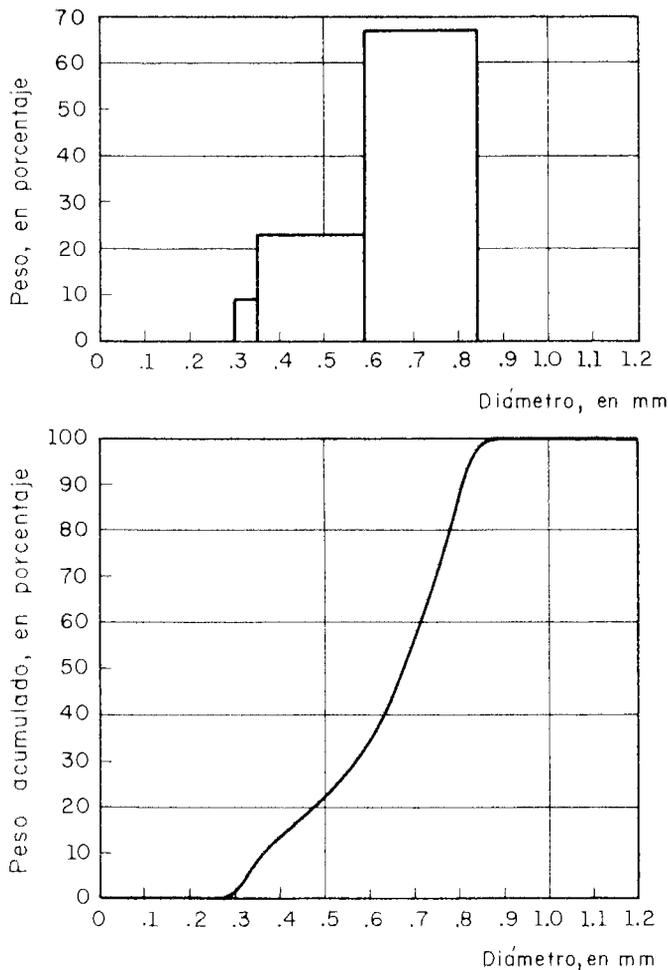


Fig 3. Distribución de densidad y distribución acumulada de la alúmina activada empleada en los ensayos 4 y 5

5.2 Metodología

Para los cinco ensayos se siguió la siguiente secuencia:

- Preparación del lecho adsorbente con peso y altura establecidos
- Retrolavado del lecho con agua corriente durante 3 min, con 50 por ciento de expansión
- Drenado del volumen de agua hasta la superficie del lecho
- Medición del espesor final del lecho
- Ajuste del gasto de paso de la muestra
- Paso de la muestra a través del lecho. Medición del volumen tratado, pH y concentración de arsénico a intervalos de 60 min

- Continuación del proceso hasta tener una concentración de arsénico en el efluente entre 0.01 y 0.02 mg/lit, con excepción de los dos primeros ensayos, donde se limitó el tiempo de operación
- Regeneración del lecho con la solución de hidróxido de sodio
- Enjuague del lecho con agua destilada para arrastrar el arsénico extraído
- Neutralización del exceso cáustico con una solución 0,1 N de ácido sulfúrico
- Enjuague del lecho con agua destilada
- Determinación de arsénico del volumen compuesto en el ciclo de regeneración para evaluar la eficiencia de extracción

5.3 Ensayes

5.3.1 Ensaye 1

Se empleó la alúmina activada en las mismas condiciones en que se adquirió, o sea en forma de granos esféricos de superficies lisas. Se aplicó el regenerante con tres gastos diferentes para observar la influencia en la recuperación de arsénico.

Datos para el ensaye:

Concentración inicial de arsénico, 0,63 mg/lit

Granulometría de la alúmina activada

Malla	Peso retenido, en g	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado que pasa
1/2 pulg	0	0	100
3/8 pulg	4,3	0,34	99,66
5/16 pulg	6,4	0,51	99,15
1/4 pulg	84,1	6,76	92,39
No. 4	487,3	39,15	53,24
No. 8	656,3	52,73	0,51
No. 14	6,3	0,51	0

Características de la columna adsorbente

Diámetro interior	4,1	cm
Peso del lecho adsorbente	133,15	g
Altura del lecho sin expansión	15	cm
Altura del lecho con expansión	16,5	cm
Peso aparente de la columna adsorbente	609	kg/m ³
Area superficial del lecho	13,25	cm ²

a) Resultados

En las tablas 12 y 13 aparecen los resultados de los ciclos de adsorción y regeneración, respectivamente.

b) Evaluación

La eficiencia de remoción de arsénico fue baja, con duración impráctica del ciclo, puesto que en la primera hora de operación el contenido de arsénico en el efluente excedió el límite establecido para los experimentos. La baja eficiencia se debe a lo reducido del área superficial de la alúmina y al gasto de paso, que no permiten una exposición y tiempo de contacto suficientes entre soluto y adsorbente.

La eficiencia de recuperación de arsénico en el ciclo de regeneración fue demasiado baja con los tres gastos ensayados, o sea que los cambios de volumen de la solución cáustica no produjeron efectos notorios.

5.3.2 Ensayo 2

Se realizó con una columna preparada en las mismas condiciones que la del ensayo 1, pero disminuyendo el gasto de paso de agua cruda con objeto de aumentar el tiempo de contacto entre el soluto y el adsorbente.

Los resultados del ciclo de adsorción aparecen en la tabla 14. En dicho ensayo no se efectuó el ciclo de regeneración del lecho adsorbente.

a) Evaluación

Igual que el ensayo 1, la eficiencia de remoción de arsénico fue baja, con una duración también impráctica del ciclo a pesar de la reducción del gasto de agua cruda. Esto comprueba que el área superficial del adsorbente tiene un efecto primordial en la remoción.

5.3.3 Ensayo 3

Se preparó la alúmina activada con una granulometría más fina, de forma irregular y con una superficie accidentada, con lo cual aumentó la superficie expuesta para contacto.

Se disminuyó el diámetro de la columna y se aumentó la altura del lecho empacado para una mayor velocidad de paso y tiempo de contacto.

Datos para el ensayo:

- Concentración inicial de arsénico 0.63 mg/lit
- Temperatura de la muestra de agua 19 °C
- Granulometría de la alúmina activada

No de malla	Peso retenido, en g	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado que pasa
14	0	0	100
16	85.8	14.06	85.94
20	261.6	42.88	43.06
30	130.7	21.42	21.64
45	104.3	17.10	4.54
50	27.7	4.54	0

• Características de la columna adsorbente

Diámetro interior	1.7 cm
Peso del lecho adsorbente	60.4 g
Altura del lecho sin expansión	38 cm
Altura del lecho con expansión	46 cm
Peso aparente de la columna adsorbente	577 kg/m ³
Area superficial del lecho	2.29 cm ²

Condiciones de operación

Se ensayó con dos gamas de gasto, una baja entre 5 y 11 ml/min durante 29 h, y otra alta entre 18 y 25 ml/min en las últimas 11 h, con el fin de verificar la influencia de la velocidad de paso en la eficiencia de remoción de arsénico cuando se tiene una amplia área de superficie activa del adsorbente.

Para la regeneración se aplicó un volumen de solución cáustica mayor que el empleado en el ensayo 1, para comprobar su efecto en la recuperación de arsénico.

a) Resultados

En las tablas 15 y 16 aparecen los resultados de los ciclos de adsorción y regeneración, respectivamente.

b) Evaluación

Los resultados del ciclo de adsorción fueron satisfactorios, ya que durante 39 h la concentración de arsénico en el efluente fue menor de 0.01 mg/lit; se consideraba valor nulo cuando la concentración no se detectaba por el método analítico.

Independientemente del gasto de paso, la granulometría fina de la alúmina activada influyó en la alta eficiencia de remoción y en la duración de la carrera de operación.

En el ciclo de regeneración aumentó la recuperación de arsénico comparada con el ensayo 1. Se considera que el mayor volumen usado de solución cáustica influyó en esta recuperación.

TABLA 12 ADSORCION CON ALUMINA ACTIVADA. ENSAYE 1

Tiempo, en h	Gasto, en ml/min	Volumen, en ml	Arsénico efluente, en mg/lt	Arsénico adsorbido, en mg		Eficiencia de remoción, en porcentaje	pH
				Parcial	acumulado		
1	28.8	1 730	0.09	0.934	0.934	85.7	7.9
2	27.9	1 675	0.16	0.787	1.721	80	8.1
3	29.6	1 775	0.17	0.816	2.537	78	8.2

TABLA 13 REGENERACION DEL LECHO DE ALUMINA. ENSAYE 1

Concepto	Volumen, en ml	Gasto 1	Gasto 2	Gasto 3
		en ml/min		
Regenerante	100	10	20	20
Enjuague	400	10	20	50
Neutralizante	100	10	20	50
Enjuague	100	10	20	50
Volumen efluente, en ml		700	700	700
Arsénico efluente, en mg/lt		0.152	0.12	0.16
En mg		0.106	0.084	0.112
Eficiencia de extracción, en porcentaje		4.2	3.3	4.4
pH		6	6	6.5

TABLA 14 ADSORCION CON ALUMINA ACTIVADA. ENSAYE 2

Tiempo, en h	Gasto, en ml/min	Volumen, en ml	Arsénico efluente, en mg/lt	Arsénico adsorbido, en mg		Eficiencia de remoción, en porcentaje	pH
				Parcial	Acumulado		
1	9.16	550	0.11	0.286	0.286	82.4	8.1
2	9.58	575	0.132	0.286	0.572	81	8.1
3	10	600	0.12	0.306	0.878	80.8	8.1
4	8.91	535	0.12	0.273	1.151	80.8	8.1
5	8.83	530	0.15	0.254	1.405	79.5	8.1

TABLA 15 ADSORCION CON ALUMINA ACTIVADA. ENSAYE 3

Tiempo, en h	Gasto, en ml/min	Volumen, en ml	Arsénico efluente, en mg/l	Arsénico adsorbido, en mg	
				Parcial	Acumulado
1	6.33	380	0	0.24	0.24
2	7.5	450	0	0.284	0.524
3	8.08	485	0	0.306	0.83
4	8	480	0	0.303	1.133
5	5.42	325	0	0.205	1.338
6	5.42	325	0	0.205	1.543
7	8.75	525	0	0.331	1.874
8	6.25	375	0	0.236	2.11
9	5.83	350	0	0.221	2.331
10	5.83	320	0	0.202	2.533
11	6.41	385	0	0.242	2.775
12	9.16	550	0	0.347	3.122
13	5.42	325	0	0.205	3.327
14	7.33	440	0	0.277	3.604
15	7.83	470	0	0.296	3.9
16	6.66	400	0	0.252	4.152
17	5.58	335	0	0.211	4.363
18	8.5	510	0	0.322	4.685
19	10.36	622	0	0.392	5.077
20	8	480	0	0.303	5.38
21	6.25	375	0	0.236	5.616
22	11.66	700	0	0.441	6.057
23	8.33	500	0	0.315	6.372
24	9.08	545	0	0.344	6.716
25	7.5	450	0	0.284	7
26	9.71	583	0	0.367	7.367
27	9	540	0	0.34	7.707
28	7.08	425	0	0.268	7.975
29	8.7	522	0	0.33	8.305
30	25.08	1505	0	0.95	9.255
31	19	1140	0	0.718	9.973
32	23.33	1400	0	0.881	10.854
33	18.66	1120	0	0.705	11.559
34	23.83	1430	0	0.9	12.459
35	25.16	1510	0	0.95	13.409
36	19.33	1160	0	0.73	14.139
37	19.33	1160	0	0.73	14.869
38	16	960	0	0.605	15.474
39	22.66	1360	0	0.858	16.332
40	22.66	1360	0.09	0.734	17.066

Suma

27 277

El pH del efluente se mantuvo en 7.9 las seis primeras horas, y en 8.1 el resto del tiempo de operación.

TABLA 16 REGENERACION DEL LECHO DE ALUMINA. ENSAYE 3

Concepto	Volumen, en ml	Gasto, en ml/min	pH	Arsénico efluente, en mg/lit	Eficiencia de extracción en porcentaje
Regenerante	300	20	>11		
Enjuague	400	20	>11		
Neutralizante	100	20	10		
Enjuague	200	20	10		
Neutralizante	150	20	7		
Enjuague	100	20	7		
Efluente total	1250			8 10	58.5

5.3.4 Ensayo 4

Se realizó con una granulometría más fina de la alúmina activada y una columna de menor diámetro para obtener velocidades de paso mayores.

Datos para el ensayo:

- Concentración inicial de arsénico 0.81 mg/lit
- Temperatura de la muestra de agua 20 °C
- Granulometría de la alúmina activada

No de malla	Peso retenido, en g	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado que pasa
20	0	0	100
30	273.6	67.42	32.58
45	94.7	23.33	9.25
50	37.5	9.25	0

- Características de la columna adsorbente

Diámetro interior	1.5 cm
Peso del lecho adsorbente	54.5 g
Altura del lecho sin expansión	38 cm
Altura del lecho con expansión	40 cm
Peso aparente de la columna adsorbente	766 kg/m ³
Area superficial del lecho	1.78 cm ²

- Condiciones de operación

Para mantener una alta velocidad de paso se ajustó el gasto entre 18 y 21 ml/min, aunque después de las primeras 22 h de operación no fue posible mantenerlo por la pérdida de carga que alcanzó el lecho y las condiciones de la instalación.

El ciclo de adsorción terminó después de 39 h de operación, cuando el efluente pasó de una concentración de arsénico de 0.061 a 0.123 mg/lit. El lecho se regeneró con un volumen de solución cáustica igual al del ensayo 3.

a) Resultados

En las tablas 17 y 18 aparecen los resultados de adsorción y regeneración, respectivamente.

b) Evaluación

Aumentó la capacidad de adsorción del lecho comparada con la del ensayo 3, ya que a las 38 h de operación se habían removido 33 mg de arsénico de un volumen de 40 lt, teniendo el efluente una concentración de 0.06 mg/lit, mientras que en el ensayo 3 a las 40 h de operación se habían removido 17 mg de un volumen de 27 lt, con una concentración 0.09 mg/lit en el efluente, o sea que la mayor velocidad de paso y la granulometría más fina de la alúmina mejoraron la eficiencia de remoción de arsénico.

La recuperación de arsénico en el ciclo de regeneración no fue tan aceptable como en el ensayo 3. Se considera que es necesario incrementar las dosis de regenerante y neutralizante a mayor adsorción de arsénico. Además, se requirió complementar con una solución de ácido más concentrada para lograr un pH neutro en el efluente.

5.3.5 Ensayo 5

Se realizó a continuación del ciclo de regeneración del ensayo anterior, con la misma columna, pero a la vez se aumentó la carga hidráulica para operar con gastos mayores. El gasto se ajustó entre 27 y 22 ml/min; después de las 12 primeras horas de operación fue disminuyendo hasta 19 ml/min, aproximadamente, por la pérdida de carga del lecho.

TABLA 17 ADSORCION CON ALUMINA ACTIVADA. ENSAYE 4

Tiempo, en h	Gasto, en ml/min	Volumen, en lt		Va, en m ³ /m ²	Arsénico efluente, en mg/lt	Arsénico adsorbido, en mg/lt	Arsénico adsorbido, en mg		X acum, en g/kg	q, en m ³ /h/m ²
		Parc	Acum				Parc	Acum		
1	19.75	1.185	1.185	6.66	0	0.81	0.96	0.96	0.018	6.66
2	20.92	1.255	2.44	13.71	0	0.81	1.02	1.98	0.036	7.05
3	20.92	1.255	3.695	20.76	0	0.81	1.02	3	0.055	7.05
4	21	1.26	4.955	27.84	0	0.81	1.02	4.02	0.074	7.08
5	20.5	1.23	6.185	34.75	0	0.81	1	5.02	0.092	6.91
6	20.33	1.22	7.405	41.6	0	0.81	0.99	6.01	0.11	6.85
7	26	1.56	8.965	50.36	0	0.81	1.26	7.27	0.133	8.76
8	19.58	1.175	10.14	56.97	0	0.81	0.95	8.22	0.151	6.6
9	18.17	1.09	11.23	63.1	0	0.81	0.88	9.1	0.167	6.12
10	20	1.2	12.43	69.83	0	0.81	0.97	10.07	0.185	6.74
11	24.17	1.45	13.88	77.98	0	0.81	1.17	11.24	0.206	8.15
12	20	1.2	15.08	84.72	0	0.81	0.97	12.21	0.224	6.74
13	18.33	1.1	16.18	90.9	0	0.81	0.89	13.1	0.24	6.18
14	19.33	1.16	17.34	97.42	0	0.81	0.94	14.04	0.258	6.51
15	18.17	1.09	18.43	103.54	0	0.81	0.88	14.92	0.274	6.12
16	18	1.08	19.51	109.61	0	0.81	0.87	15.79	0.29	6.07
17	18.17	1.09	20.6	115.73	0	0.81	0.88	16.67	0.306	6.12
18	18	1.08	21.68	121.8	0	0.81	0.87	17.54	0.322	6.07
19	18.33	1.1	22.78	127.98	0	0.81	0.89	18.43	0.338	6.18
20	18.33	1.1	23.88	134.16	0	0.81	0.89	19.32	0.354	6.18
21	18.33	1.1	24.98	140.34	0	0.81	0.89	20.21	0.371	6.18
22	17.7	1.06	26.04	146.29	0	0.81	0.86	21.07	0.387	5.97
23	16.17	0.97	27.01	151.74	0	0.81	0.78	21.85	0.401	5.45
24	15.33	0.92	27.93	156.91	0	0.81	0.74	22.59	0.414	5.17
25	15.33	0.92	28.85	162.08	0	0.81	0.74	23.33	0.428	5.17
26	15.16	0.91	29.76	167.19	0	0.81	0.74	24.07	0.442	5.11
27	15.7	0.94	30.7	172.47	0	0.81	0.76	24.83	0.455	5.29
28	15.33	0.92	31.62	177.64	0	0.81	0.74	25.57	0.469	5.17
29	15.83	0.95	32.57	182.98	0	0.81	0.77	26.34	0.483	5.33
30	15	0.9	33.47	188.03	0	0.81	0.73	27.07	0.497	5.06
31	15	0.9	34.37	193.09	0	0.81	0.73	27.8	0.51	5.06
32	15.17	0.91	35.28	198.2	0	0.81	0.74	28.54	0.524	5.11
33	15.33	0.92	36.2	203.37	0	0.81	0.74	29.28	0.537	5.17
34	15	0.9	37.1	208.43	0	0.81	0.73	30.01	0.551	5.06
35	16.84	1.01	38.11	214.1	0	0.81	0.82	30.83	0.566	5.68
36	15	0.9	39.01	219.16	0.008	0.802	0.72	31.55	0.579	5.06
37	14.33	0.86	39.87	223.99	0.024	0.786	0.67	32.22	0.591	4.83
38	10.5	0.63	40.5	227.53	0.061	0.749	0.47	32.69	0.6	3.54
39	9.17	0.55	41.05	230.62	0.123	0.687	0.38	33.07	0.607	3.09

El pH del efluente se mantuvo en 8

- Va volumen tratado acumulado por unidad de área de lecho
- x peso de soluto adsorbido por unidad de peso del adsorbente
- q velocidad del flujo masa

TABLA 18 REGENERACION DEL LECHO DE ALUMINA. ENSAYE 4

Concepto	Volumen, en ml	Gasto, en ml/min	pH	Arsénico efluente, en mg/lit	En mg	Eficiencia de extracción, en porcentaje
Regenerante	100	10	>11	9	0.9	
	100	10	>11	64	6.4	
	100	10	>11	19	1.9	
Enjuague	100	10	>11	16.4	1.64	
	100	10	>11	6.2	0.62	
Neutralizante						
0.1 N	100	10	>11	3.7	0.37	
0.1 N	100	10	11	3.7	0.37	
1 N	30	3	7	1.2	0.03	
Total					12.23	37

El ciclo de adsorción se detuvo a las 18 h de operación, cuando el efluente mostró contenido de arsénico (0.012 mg/lit). En este tiempo se trataron casi 25 lit con una remoción de arsénico de 20 mg. La carrera más corta del ciclo se debió al contenido de arsénico en el lecho, que no se recuperó en la regeneración del ensaye 4.

Con este ensaye se comprobó la efectividad de la alúmina activada para adsorber arsénico. En dicho ensaye no se regeneró el lecho.

Los resultados del ciclo de adsorción aparecen en la tabla 19.

5.4 Análisis de la isoterma de adsorción, curva de operación del lecho y tasa de transferencia del soluto del ensaye 4

En el proceso de adsorción se alcanza un tiempo en el cual la concentración del soluto que permanece en solución está balanceada con la adsorbida en la superficie del lecho. En la relación de la distribución del soluto entre las fases líquida y sólida, se expresa la cantidad de soluto adsorbido por unidad de peso del adsorbente, x , como una función de la concentración del soluto, C , que permanece en equilibrio en la solución a una temperatura fija. Esta expresión se llama isoterma de adsorción y es la manera más adecuada para representar datos experimentales.

La curva de operación se determina de un balance de masa a lo largo de la columna de adsorción.

La tasa de transferencia del soluto incluye el movimiento del soluto a través de la película líquida que rodea las partículas sólidas, y la difusión del soluto en los poros del adsorbente. Se determina a partir de la isoterma de adsorción y la línea de operación.

Punto de quiebre y nivel de agotamiento del lecho.

El punto de quiebre, C_b , en el proceso de adsorción es aquel en que la columna está en equilibrio con el soluto influente, y la tasa de remoción de este comienza a disminuir.

El nivel de agotamiento del lecho, C_x , es un punto arbitrario en el cual se considera ya impráctica la mínima remoción que se tenga del soluto.

Para el análisis del ensaye 4 se fijan los valores siguientes:

$$C_b = 0.02 \text{ mg/lit y } C_x = 0.2 \text{ mg/lit.}$$

El punto de quiebre se alcanza a las 36.8 h de operación.

Para estas concentraciones, los volúmenes de agua pasados por m^2 de sección recta de lecho son:

$$V_{ab} = 223 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ y } V_{ax} = 232.5 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

• La velocidad del flujo masa, q , tiene variación en dos etapas. Los valores promedio son:

TABLA 19 ADSORCION CON ALUMINA ACTIVADA. ENSAYE 5

Tiempo, en h	Gasto, en ml/min	Volumen, en lt		Va, en m ³ /m ²	Arsénico efluente, en mg/lt	Arsénico adsorbido, en mg/lt	Arsénico adsorbido, en mg		X acum, en g/kg	q, en m ³ /h/m ²
		Parc	Acum				Parc	Acum		
1	27.5	1.65	1.65	9.27	0	0.81	1.34	1.34	0.025	9.27
2	24.2	1.45	3.1	17.42	0	0.81	1.17	2.51	0.046	8.15
3	23.33	1.4	4.5	25.28	0	0.81	1.13	3.64	0.067	7.86
4	26.67	1.6	6.1	34.27	0	0.81	1.3	4.94	0.091	8.99
5	26.33	1.58	7.68	43.15	0	0.81	1.28	6.22	0.114	8.88
6	23.33	1.4	9.08	51.01	0	0.81	1.13	7.35	0.135	7.86
7	23.16	1.39	10.47	58.82	0	0.81	1.13	8.48	0.156	7.81
8	21.84	1.31	11.78	66.18	0	0.81	1.06	9.54	0.175	7.36
9	23.33	1.4	13.18	74.04	0	0.81	1.13	10.67	0.196	7.86
10	23.33	1.4	14.58	81.91	0	0.81	1.13	11.8	0.216	7.86
11	26	1.56	16.14	90.67	0	0.81	1.26	13.06	0.24	8.76
12	21.67	1.3	17.44	97.98	0	0.81	1.05	14.11	0.259	7.3
13	21	1.26	18.7	105.06	0	0.81	1.02	15.13	0.278	7.08
14	21.67	1.3	20	112.36	0	0.81	1.05	16.18	0.297	7.3
15	21	1.26	21.26	119.44	0	0.81	1.02	17.2	0.315	7.08
16	19.16	1.15	22.41	125.9	0	0.81	0.93	18.13	0.333	6.46
17	19.16	1.15	23.56	132.366	0	0.81	0.93	19.06	0.35	6.46
18	19.5	1.17	24.73	138.93	0.012	0.798	0.93	19.99	0.367	6.57

El pH del efluente se mantuvo en 8

Va volumen tratado acumulado por unidad de área de lecho

X peso de soluto adsorbido por unidad de peso del adsorbente

q velocidad del flujo masa

En las primeras 22 h de operación 6.65 m³/h/m²

En las siguientes 17 h 4.96 m³/h/m²

Contenido de arsénico

a) En el influente

El peso de arsénico promedio que se introduce hasta el punto de quiebre, es:

• En las primeras 22 h 119x10⁻³ kg/m²

• En las siguientes 14.8 h 59.4x10⁻³ kg/m²

Peso total = 178.4 x 10⁻³ kg/m² de área de lecho

b) En el lecho

Para condiciones de equilibrio con la solución influente:

En las primeras 22 h: 119 x 10⁻³ kg/m²

En las siguientes 13 h: 52.1 x 10⁻³ kg/m²

En la siguiente 1.8 h, la variación en el efluente es de 0 a 0.02 mg/lt.

Con variación lineal:

Influente: 7.2 x 10⁻³ kg/m²

Efluente: 0.09 x 10⁻³ kg/m²

Retenido = 7.11 x 10⁻³ kg/m²

Total en el lecho: 178.21 x 10⁻³ kg/m² de lecho

Peso de alúmina por m² de sección: 316 kg/m²

Peso de arsénico por unidad de peso de lecho en el punto de quiebre: 0.565x10⁻³ kg soluto kg adsorbente

5.4.1 Isotherma de adsorción

Se expresa a partir de los datos experimentales X y C (fig 4). Tiene la forma descrita por el modelo de Langmuir (ref 3), con una concentración de saturación del soluto en la solución C_s=0.81 mg/lt

Este modelo considera que la máxima adsorción corresponde a una capa simple saturada de soluto sobre la superficie del adsorbente, que la energía de adsorción es constante y que no hay migración de las moléculas adsorbidas en el plano de la superficie.

La isoterma de Langmuir se describe mediante la ecuación

$$X = \frac{Xm b C}{1 + bC}$$

donde

Xm número de moles de soluto adsorbido para completar una capa sobre el adsorbente

C concentración del soluto en la solución en equilibrio

b constante relacionada con la energía de adsorción (recíproco de la concentración a la cual se logra cubrir la mitad de la superficie)

Los resultados experimentales indican que se tiene una adsorción considerable, o sea que $bC \gg 1$, por lo que, $X \cong Xm$.

La ecuación en la forma lineal es

$$\frac{C}{X} = \frac{1}{bXm} + \frac{1}{Xm} C$$

En la fig 5 se presenta la isoterma en forma lineal, de la cual se calculan los valores de Xm y b . Se tiene al respecto que:

$$Xm = 0.625 \text{ g/kg}$$

y

$$b = 533 \text{ lt/mg}$$

El valor de Xm es sensiblemente igual al de saturación X_s , que se determina en la fig 4, o sea que la saturación del lecho se alcanza cuando se ha completado una capa de soluto sobre la superficie activa.

- Porcentaje de saturación

De la isoterma de adsorción (fig 4), el peso de saturación de arsénico en el lecho es $X_s = 0.62 \times 10^{-3} \text{ kg/kg}$.

Por tanto, en el punto de quiebre el porcentaje de saturación es 91 por ciento

5.4.2. Curva de operación

Si se considera que todo el soluto se remueve de efluente de la columna, se tiene

$$q C_o = m_s X_s$$

donde

m_s velocidad superficial de masa para saturación del adsorbente, $M L^{-2} T^{-1}$

C_o concentración influente del soluto 0.81 g/kg

X_s 0.62 g/kg

q 6.65 $m^3/h/m^2$ (hasta las primeras 22 h)
4.96 $m^3/h/m^2$ (en las 17 h siguientes)

Valor de m_s :

$$m_s = q \frac{C_o}{X_s}$$

Para las primeras 22 h $8.7 \times 10^{-3} \text{ kg/h/m}^2$

Para las siguientes 17 h $6.5 \times 10^{-3} \text{ kg/h/m}^2$

Pasando la línea por el origen, se tiene

$$qC = m_s X, \quad C = \frac{m_s X}{q}$$

$$C = C_o \frac{X}{X_s}$$

Valores de C

t , en h	C_o/X_s	X	C , en mg/lt
4	1.31×10^{-3}	0.074	0.097
5	1.31×10^{-3}	0.092	0.121
6	1.31×10^{-3}	0.110	0.144
25	1.31×10^{-3}	0.428	0.56
30	1.31×10^{-3}	0.497	0.65
35	1.31×10^{-3}	0.566	0.74

En la fig 4 aparece la línea de operación.

- Curva de comportamiento del lecho adsorbente

A partir de la isoterma de adsorción y la línea de operación, se tiene:

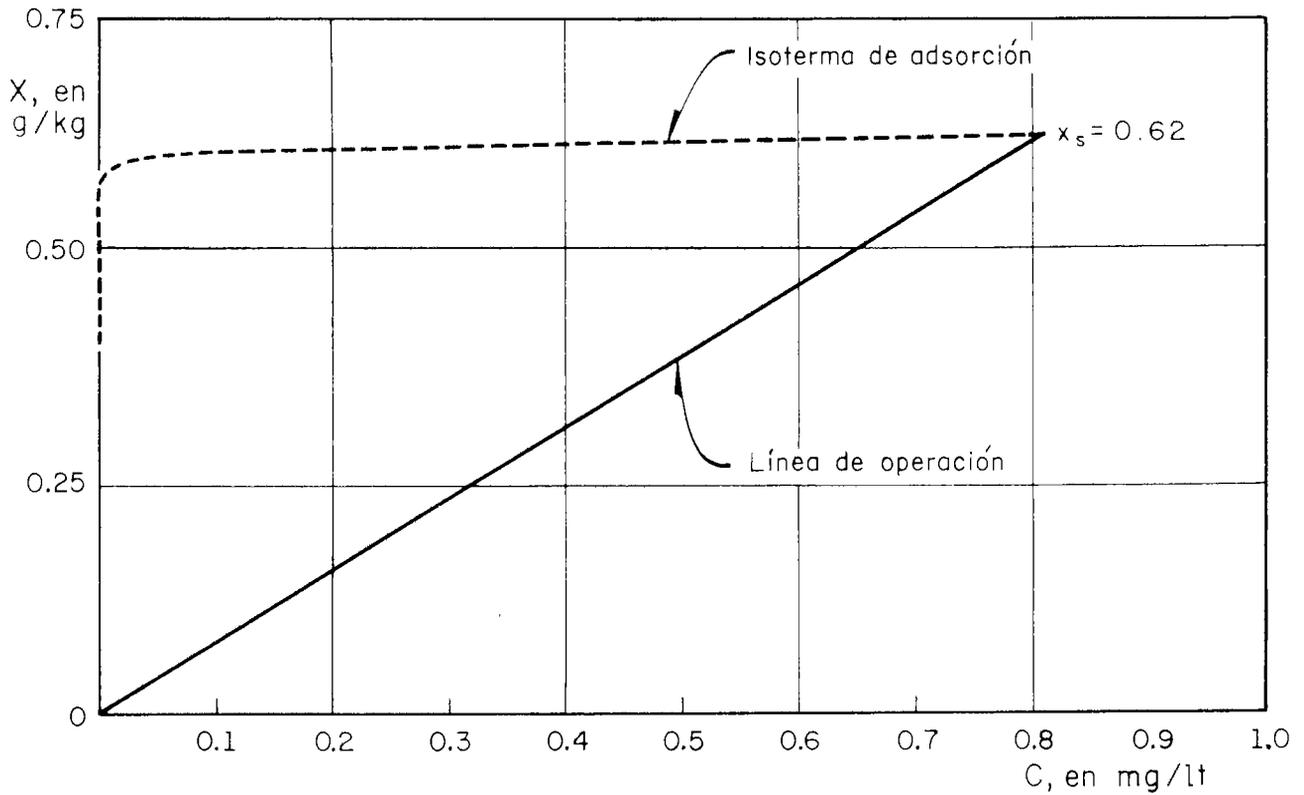


Fig 4. Adsorción de arsénico con alúmina activada. Ensayo 4. Isotherma de adsorción y línea de operación

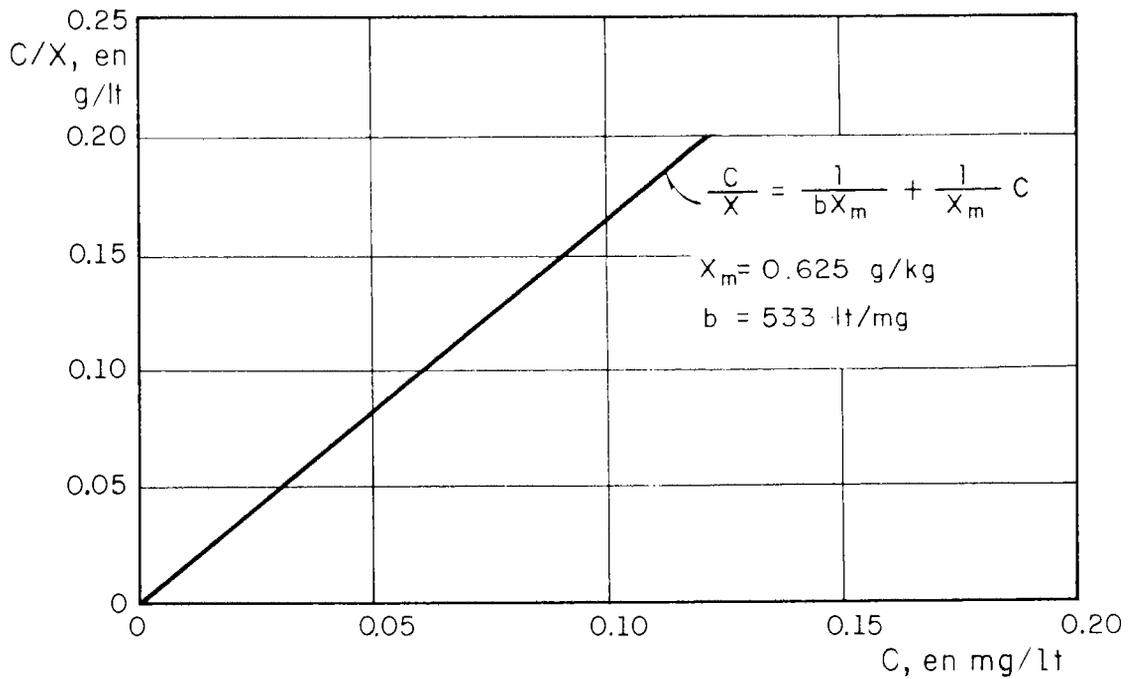


Fig 5. Adsorción de arsénico con alúmina activada. Ensayo 4. Isotherma de adsorción según el modelo lineal de Langmuir

C, en mg/lit	C/Co	C*, en mg/lit	C-C*	(C-C*) ⁻¹	$\int_{C_b}^C (C-C^*)^{-1} dc$	$\frac{V_a - V_{ab}}{V_{ax} - V_{ab}}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0.02	0.025	0	0.02	50	0	0
0.04	0.049	0	0.04	25	0.665	0.293
0.06	0.074	0	0.06	16.66	1.075	0.475
0.08	0.099	0	0.08	12.5	1.36	0.600
0.10	0.123	0	0.10	10	1.58	0.697
0.12	0.148	0	0.12	8.33	1.76	0.777
0.14	0.173	0	0.14	7.14	1.915	0.845
0.16	0.197	0	0.16	6.25	2.045	0.903
0.18	0.222	0	0.18	5.55	2.16	0.954
0.20	0.247	0	0.20	5	2.265	1.000

Col (3): De la isoterma de adsorción, fig 4

Col (7): Col (6) ÷ 2.265

donde

C* concentración del soluto en equilibrio que corresponde a la concentración adsorbida X

(C-C*) Impulso para la adsorción

En la fig 6 se presenta gráficamente (C-C*)⁻¹ vs C, y en la fig 7 la curva de funcionamiento del lecho adsorbente C/Co vs

$$\frac{V_a - V_{ab}}{V_{ax} - V_{ab}}$$

La capacidad fraccional de la alúmina en la zona de adsorción a partir del punto de quiebre (0.02 mg/lit) y hasta el nivel de agotamiento (0.20 mg/lit), se calcula integrando el área sobre la curva de comportamiento. De la fig 7

$$\phi = \int_0^1 \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) d \left(\frac{V_a - V_{ab}}{V_{ax} - V_{ab}}\right)$$

$$\phi = 0.903$$

• Espesor de la zona primaria de adsorción

Es la parte del lecho en que hay una reducción en la concentración de Cx a Cb. Se considera que esta zona es de espesor constante, δ.

Para un espesor D del lecho, se tiene la relación

$$\frac{\delta}{D} = \frac{V_{ax} - V_{ab}}{V_{ab} + \phi(V_{ax} - V_{ab})}$$

$$\delta = \frac{9.5}{231.6} 40 = 1.64 \text{ cm}$$

5.4.3 Tasa de transferencia del soluto

Considerada en un término global, ka, en que

k coeficiente de transferencia, M L⁻² T⁻¹

a área de la superficie externa del adsorbente por unidad de volumen, L⁻¹

Tasa de transferencia del soluto en un espesor diferencial de la columna, d D

$$qdc = ka (C - C^*) d D$$

En la zona primaria de adsorción se tiene

$$\frac{ka}{q} = \int_{C_b}^{C_x} \frac{dc}{(C - C^*)} = 2.265$$

Para las primeras 22 h de operación, ka = 914 kg/h/m³

Para las últimas 17 h de operación, ka = 6.85 kg/h/m³

a) Evaluación

El proceso de adsorción se comportó sensiblemente según la teoría de Langmuir.

El lecho operó satisfactoriamente, puesto que en el punto de quiebre que se fijó (0.02 mg/lit), casi había alcanzado la saturación (91 por ciento).

Las velocidades altas de paso en los dos periodos analizaron (primeras 22 h de operación y últimas 17) permitieron buenas tasas de transferencia del soluto.

La capacidad de adsorción por volumen del lecho, se puede calcular a partir de la cantidad de soluto adsorbido por unidad de peso del adsorbente, x, hasta el punto de quiebre. Para X = 0.565x10⁻³ kg soluto/kg adsorbente y un peso de la columna adsorbente de 766 kg/m³, se tiene una capacidad de adsorción de la alúmina activada de 433 g de soluto/m³ de adsorbente.

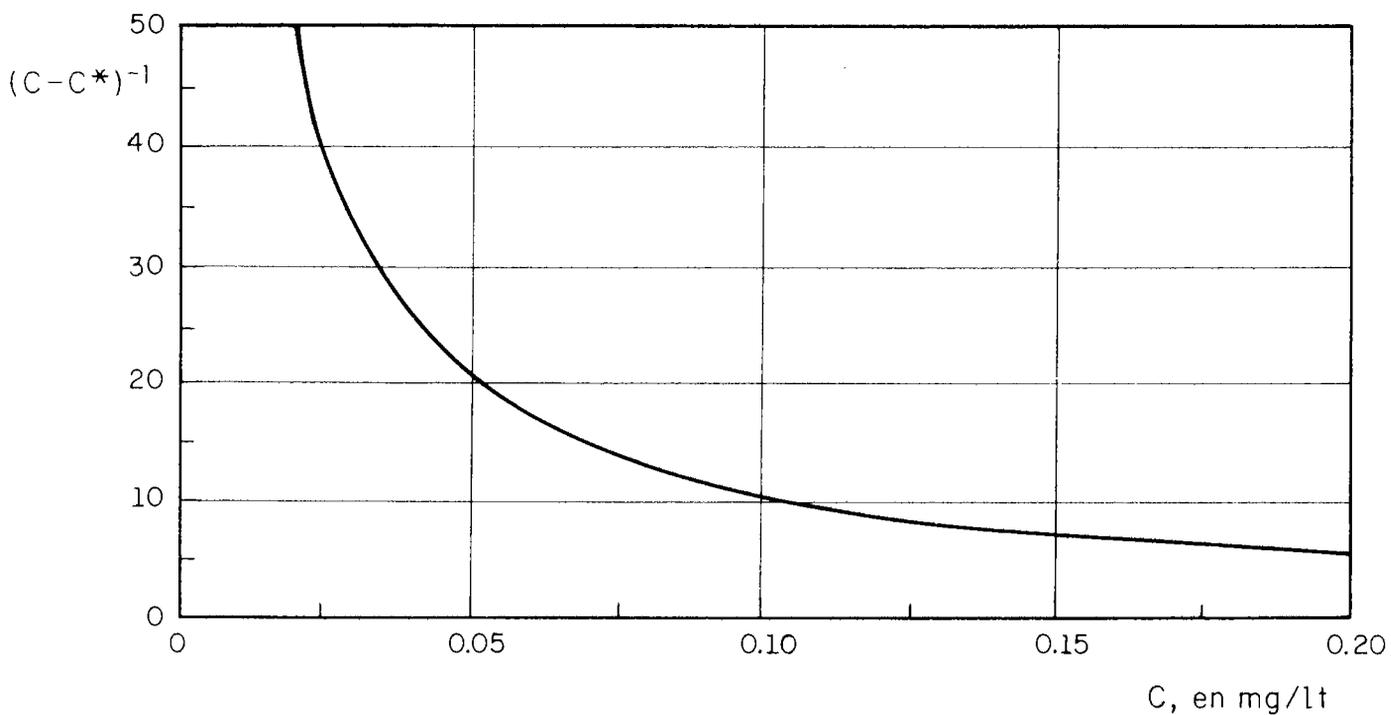


Fig 6. Adsorción de arsénico con alúmina activada. Ensayo 4. Relación del inverso de la fuerza de impulso para la adsorción y concentración del soluto

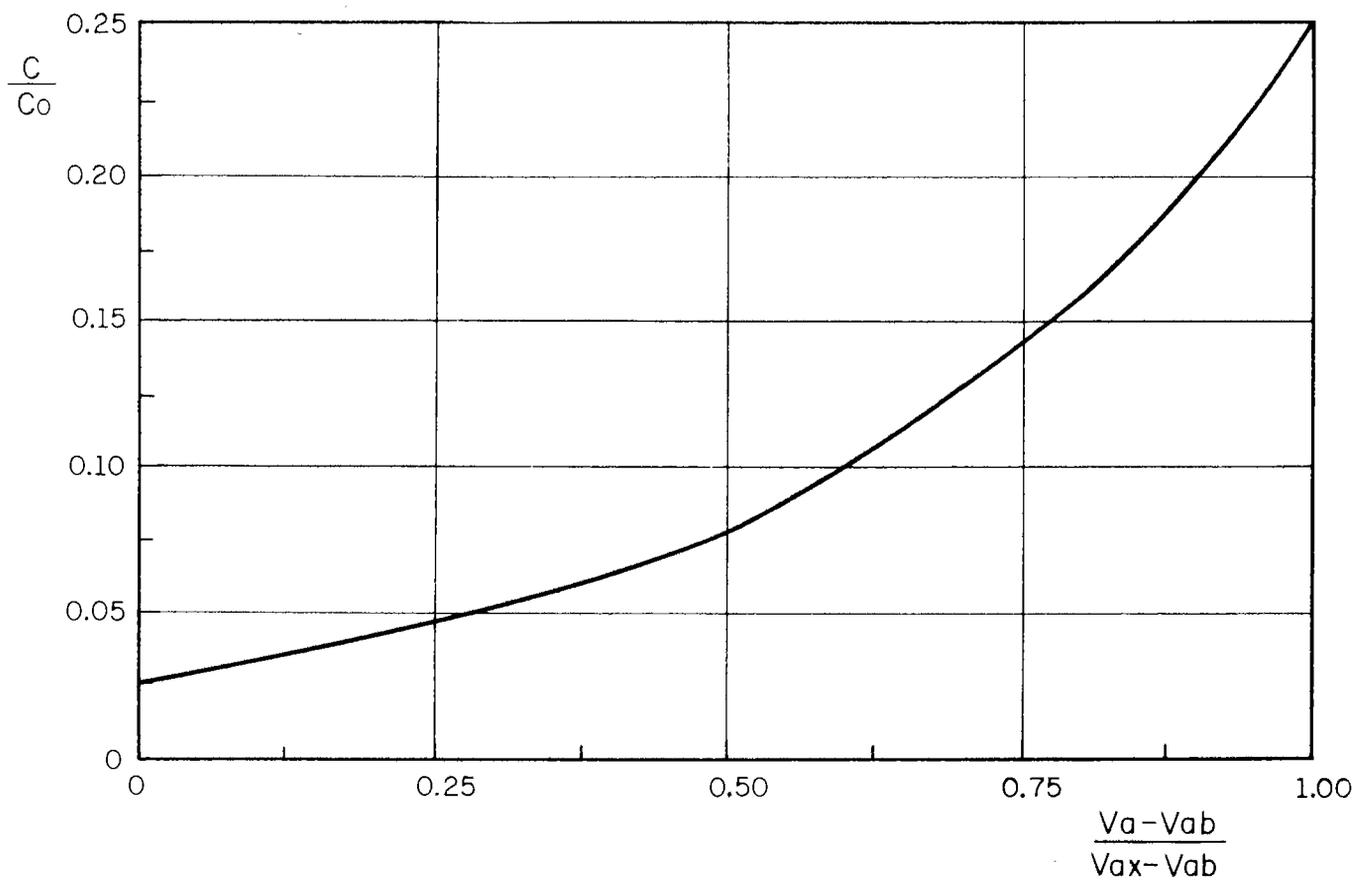


Fig 7. Adsorción de arsénico con alúmina activada. Ensayo 4. Curva de funcionamiento de la columna en la zona de adsorción

Para una concentración inicial de arsénico, gasto de agua a tratar y con un tiempo de servicio práctico de la columna de adsorción, se puede calcular el área, peso y volumen del lecho de alúmina activada y los volúmenes de las soluciones para regeneración del lecho de una planta a escala industrial.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

6.1.1 Proceso de coagulación

- El arsénico de las aguas ensayadas tiene una fracción en estado coloidal soluble no filtrable.
- En las condiciones de operación establecidas, el coagulante sulfato férrico es el más efectivo de los empleados.
- El coagulante sulfato de aluminio no es efectivo para remover arsénico a pH natural de las aguas.
- El coagulante cloruro férrico es efectivo para remover arsénico a pH natural de las aguas, pero su costo lo hace impráctico para usarse en una planta a escala industrial.
- Los ensayos establecidos permiten conocer la dosis de coagulante necesaria para tratar el agua problema a partir de la concentración de arsénico y el factor F óptimo, con el fin de tener un efluente con una concentración de arsénico no mayor de 0.01 mg/lt.

6.1.2 Proceso de adsorción

- El proceso de adsorción de arsénico con alúmina activada es muy efectivo.

Los mejores resultados se obtuvieron en el ensaye 4, con la granulometría más fina de la alúmina, y altas velocidades de paso.

- La isoterma de adsorción del ensaye 4 se ajustó sensiblemente a la ecuación de Langmuir.
- De los resultados de los ensayos se puede definir la capacidad de adsorción de la alúmina activada que permita mantener un efluente con la concentración de arsénico que se requiera.
- En las condiciones de operación establecidas, la recuperación de arsénico en el ciclo de regeneración

no fue muy efectiva, por lo que se necesitó emplear mayores volúmenes de la solución cáustica y periódicamente mayores concentraciones.

- Los resultados permiten tener bases para el diseño y operación de una planta de tratamiento a escala industrial.

6.2 Recomendaciones

Las condiciones establecidas para los ensayos de coagulación química y adsorción con alúmina activada permitieron evaluar la efectividad de ambos procesos, pero es necesario ensayar en condiciones que incluyan los posibles efectos de pH, temperatura y alcalinidad de las aguas, para poder establecer correlaciones y base para un estudio económico comparativo.

RECONOCIMIENTO

Se agradece la colaboración de Francisco Castro, ingeniero residente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos en la Región Lagunera.

7. REFERENCIAS

1. Bracho Flores, AR, "Intoxicación arsenical crónica o arsenicismo crónico en la Comarca Lagunera de Coahuila, México". Tesis profesional, **Escuela de Medicina, Universidad de Coahuila**, México (1971)
2. APHA, AWWA, APCF, "Standard methods for the examination of water and wastewater", 13 ed, Washington, EUA (1971)
3. Weber, WJ, Jr, "Physicochemical processes for water quality control", Adsorption processes, **Wiley Interscience**, Nueva York (1972), 199

8. BIBLIOGRAFIA

- Bellack, E, "Arsenic removal from potable water", **Journal AWWA**, 63, 7 (jul 1971)
- Gulledge JH y O'Connor, JT, "Removal of arsenic from water by adsorption on aluminum and ferric hydroxides", **Journal AWWA**, 65, 8 (ago 1973)
- Lisella, FS, Long KP y Scott HG, "Health aspects of arsenicals in the environment", **Journal of Environmental Health**, 34, 5 (mar/abr 1971)
- Shen YS, "Study of arsenic removal from drinking water", **Journal AWWA**, 65, 8 (ago 1973)