



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**OPTIMIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO Y DESHIDRATACIÓN  
DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN LA COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN DE AGUA QUE  
CONTIENE ARSÉNICO**

**T E S I S**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL-AGUA**

**PRESENTA:**  
**I. T. A. KARINA GARCÍA MENDOZA**

**DIRECTOR DE TESIS:**  
**DRA. SOFÍA ESPERANZA GARRIDO HOYOS**  
**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA Cd. Mx.**

**ENERO 2017**

**Jurado asignado**

Presidente: Dr. Rosa Ma. Ramírez Zamora

Secretario: Dra. María Teresa Orta Ledesma

Vocal 1: Dra. Gabriela E. Moeller Chávez

Vocal 2: M.I. Mercedes Esperanza Ramírez Camperos

Vocal 3: Dra. Sofía E. Garrido Hoyos

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto Mexicano de Tecnología del agua IMTA

Tutor de tesis

---

Dra. Sofía E. Garrido Hoyos

## **Dedicatorias**

Agradezco y dedico este trabajo a Dios, mi padre creador y guía en todo momento, gracias por el aprendizaje, bendiciones e infinito amor. Cada herramienta otorgada, enriquece mi ser, y he aprendido sobre mi discernimiento. Desde aquel día que pasó por mi mente continuar mi formación académica, me puse en tus manos para lograrlo, existieron grandes lecciones, las cuales me llenan de inspiración para continuar trazando nuevos proyectos y metas, siempre de tu mano, siendo el medio para cumplir su plan divino.

Dedico este trabajo a mis padres, Angélica Marina Mendoza Morales, siempre ha sido mi motor, y ejemplo de vida. Las oraciones durante todo este trabajo, me han ayudado para tener la luz y firmeza en las decisiones que he tomado y a la memoria de mi amoroso padre Ángel García Escobar, porque siempre me enseñó a soñar hasta el cielo, con los pies en la tierra y luchar por lo realmente valioso de la vida, la familia.

A mis hermanos Miguel Ángel, mi cómplice en cada trayecto, me inspiras, apoyas y tienes paciencia, siempre entendiéndome, eres un gran motivo en mi vida para ser mejor cada día, eres mi amigo y confidente, gracias por cada lección que me has dado, a Carlos Uriel, de quien he aprendido mucho, eres parte importante en los cimientos de mi formación, me cuidas y guías desde niña, te admiro por todo lo que eres gracias por tu apoyo incondicional y a Gloria Edith, estoy orgullosa de ti, admiro tu fortaleza y determinación, eres una guerrera, gracias por tu cariño y comprensión. Los quiero mucho, siempre unidos siempre hermanos.

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por la confianza y apoyo incondicional durante todo este trabajo.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por las facilidades para realizar la parte experimental.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para realizar este proyecto.

A la Dra. Sofía Garrido, por dirigirme y brindarme la confianza para concluir este trabajo, por los consejos, conocimientos y asesorías brindadas para fortalecer mi formación académica.

A los miembros de jurado de examen M. I. Mercedes E. Ramírez Camperos, Dra. Rosa María Ramírez Zamora, Dra. María T. Orta Ledesma, Dra. Gabriela E. Moeller Chávez. Por sus observaciones oportunas y acertadas.

A la Mtra Sara Pérez, Biol. Martha Millán Cabrera, Biol. Lorena Castillo Rodríguez, Ing. Liliana García Sánchez por su apoyo.

Agradezco a la familia Mendoza Morales, por su apoyo, amor y comprensión, por sus consejos y oraciones, los quiero mucho.

A la Familia Dámaso Sarabia, en especial Ricardo Dámaso Sarabia, por estar a mi lado en los mejores y peores momentos, apoyándome en cada una de mis decisiones con amor y respeto.

A mis compañeros y amigos, que siempre me apoyaron para lograr la realización de este trabajo, gracias por los consejos, experiencias y sonrisas brindadas, Cristina Nájera, Sr. Mario Marín, Lorena Silva, Karina Martínez, Nadir López, Penélope Cruz, Viridiana Jiménez, Itzel Rodríguez, Estefanía Miranda, Gabriela Roldan, Fernando, Javier Canto, Carlos Covarrubias y Olga María Guzmán.

## **Resumen**

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. El objetivo de este estudio fue optimizar los procesos de espesamiento, acondicionamiento y deshidratación de los residuos generados en la coagulación-floculación de agua que contienen arsénico (V), ya que la problemática radica en una adecuada disposición. Por ello en primer lugar 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: FeCl<sub>3</sub> 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. Para el acondicionamiento se seleccionaron los dos mejores polímeros de cinco obteniéndose un lodo con las siguientes propiedades: sólidos totales 0.48 g/L, resistencia específica a la filtración (REF) 3.78E+12 cm/g y tiempo a la filtración (tF) de +108 s, principalmente. En la etapa de deshidratación se realizó en dos etapas la primera por simulación de filtro banda (Bootest) y posteriormente centrífuga. En el filtro banda se obtuvo un lodo con 9.33 g/L de ST para el polímero 1 y 8.74 g/L para el polímero 2, para la centrifugación se obtuvo un lodo con 22.48 g/L de ST para el polímero 1 y 18.42 g/L para el polímero 2, las propiedades estudiadas en este trabajo nos muestran su influencia en la deshidratación de los lodos con presencia de As.

### **Summary**

Arsenic is considered carcinogenic to humans when the consumption of arsenic water is prolonged. In many places the only source of water for human consumption and consumption contains arsenic (As) in solution, so it is necessary to treat this type of water; In these removal treatments, a residue is produced that changes the environmental conditions like, pH, redox potential, becomes toxic. The objective of this study was to optimize the thickening, conditioning and dehydration processes of the waste generated in the coagulation-flocculation of water containing arsenic (V), since problematic radiation in an appropriate arrangement. For this reason, the sludge was first obtained with As(V), which, by means of an experimental design, determined the initial optical values of: pH 7.20; Dosing: FeCl<sub>3</sub> 34.37 mg/L and polymer of 0.89 mg/L, with the response variables: sediment able solids, SSED, 7.59 mL/L and concentration of As V) in the supernatant of 0.003 mg/L, for a Confidence interval of 95%. Subsequently, thickening by gravity was performed for 12 hours. For the conditioning, the best polymers of five obtained with a single with the following properties were selected: total solids 0.48 g / L, specific resistance to the filtration (REF) 3.78E+12 cm / g and time to the filtration (tF) of + 108 s, mainly. In the dehydration stage the first one was realized in two stages by the simulation of strip band (Bootest) and later centrifugal. In the strip filter, a sludge was obtained with 9.33 g/L of ST for polymer 1 and 8.74 g/L for polymer 2, for the centrifugation a sludge was obtained with 22.48 g/L of ST for polymer 1 and 18.42 g/L for polymer 2, the properties studied in this work indications of its influence on the dewatering of sludge with presence of As.

## CONTENIDO

Resumen.....	I
Summary .....	II
Lista de abreviaturas .....	XI
Introducción .....	XII
Hipótesis.....	XIII
Objetivo general.....	XIII
Objetivos específicos .....	XIII
Capítulo 1.....	1
1 MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Química del arsénico.....	1
1.2 Toxicidad.....	3
1.3 Normatividad para el arsénico.....	5
1.4 Tecnologías para la remoción del arsénico del agua.....	7
1.4.1 Óxido reducción.....	8
1.4.2 Ablandamiento con cal.....	9
1.4.3 Coagulación floculación.....	9
1.4.3.1 Mecanismos del proceso de coagulación floculación con FeCl <sub>3</sub> .....	10
1.4.3.2 Factores que influyen en la coagulación .....	12
1.4.4 Adsorción .....	12
1.4.5 Intercambio iónico.....	12
1.4.6 Ósmosis inversa y nanofiltración .....	13
1.4.7 Procesos biológicos.....	13
1.5 Selección de la tecnología de tratamiento para reducción de lodo en sus diferentes etapas .	13
1.6 Propiedades del lodo generado durante la remoción de arsénico.....	16
1.6.1 Propiedades físicas .....	16
1.6.2 Resistencia específica a la filtración (REF) .....	17

**Optimización de los procesos de acondicionamiento y deshidratación de los residuos generados en la coagulación-floculación de agua que contiene arsénico.**

---

---

1.6.3 Tiempo de succión capilar.....	18
1.6.4 Tiempo a la filtración .....	19
1.6.5 Compresibilidad .....	19
1.7 Características químicas.....	19
1.8 Tratamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua .....	20
1.8.1 Espesamiento.....	20
1.8.2 Espesamiento por gravedad.....	21
1.8.3 Espesamiento por flotación .....	21
1.8.4 Acondicionamiento .....	21
1.8.5 Deshidratación.....	22
1.9 Antecedentes .....	23
1.9.1 Problemática de los lodos.....	23
1.9.2 Generación de lodos concentrados de arsénico .....	24
1.9.3 Residuos generados por Coagulación- Floculación .....	26
1.9.4 Concentración y disposición final de los sólidos. ....	27
Capítulo 2.....	29
2 METODOLOGÍA .....	29
2.1 Proceso de obtención de los lodos con arsénico.....	29
2.1.1 Optimización de las condiciones para la obtención de lodos provenientes del proceso de coagulación floculación.....	29
2.1.2 Análisis de las propiedades del lodo proveniente del proceso Coagulación-Floculación. ....	32
2.2 Proceso de Espesamiento .....	32
2.3 Proceso de Acondicionamiento.....	34
2.3.1 Selección de polímeros para el proceso de acondicionamiento .....	34
2.3.2 Optimización de las condiciones de estudio para el proceso de acondicionamiento .....	34
2.4 Proceso de deshidratación .....	36
2.4.1 Filtro banda .....	36



**Optimización de los procesos de acondicionamiento y deshidratación de los residuos generados en la coagulación-floculación de agua que contiene arsénico.**

---

---

2.5	Proceso de centrifugación .....	38
2.6	Técnicas analíticas.....	38
2.6.1	Técnica de Resistencia específica a la filtración (REF) .....	40
2.6.2	Tiempo a la filtración (tF).....	42
2.6.3	Compresibilidad .....	42
2.6.4	Porcentaje de humedad.....	42
2.7	Diseño experimental.....	43
2.7.1	Selección de intervalos de valores para las propiedades analizadas .....	43
2.7.2	Diseño experimental.....	43
Capítulo 3	.....	45
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
3.1	Optimización de las variables de respuesta en la obtención del lodo con arsénico.....	45
3.2	Propiedades físico-químicas del lodo obtenido a condiciones óptimas .....	50
3.2.1	Resistencia específica a la filtración (REF), del lodo obtenido sin acondicionamiento.....	51
3.2.2	Compresibilidad en el proceso de obtención del lodo.....	53
3.2.3	Tiempo a la filtración (TF) del lodo obtenido sin acondicionamiento .....	53
3.2.4	Curva de evaporación.....	53
3.3	Espesamiento.....	54
3.4	Acondicionamiento .....	55
3.4.1	Resultados de la selección de polímeros para el proceso de acondicionamiento .....	55
3.4.2	Optimización de las condiciones de estudio para el proceso de acondicionamiento. ....	56
3.4.3	Análisis estadístico ANOVA para el Polímero 1 .....	56
3.4.4	Análisis estadístico ANOVA para el Polímero 2 .....	58
3.4.5	Resistencia específica a la filtración (REF), en el proceso de acondicionamiento. ....	61
3.4.6	Curva de evaporación para los polímeros optimizados en la etapa de acondicionamiento.....	62
3.5	Comparación de resultados obtenidos con diferentes tipos de lodo realizados en otros estudios. .....	63

**Optimización de los procesos de acondicionamiento y deshidratación de los residuos generados en la coagulación-floculación de agua que contiene arsénico.**

---

---

3.6 Deshidratación.....	66
3.6.1 Filtro banda .....	66
3.6.2 Centrifugación.....	69
Capítulo 4.....	71
CONCLUSIONES .....	71
RECOMENDACIONES .....	72
REFERENCIAS.....	73
ANEXOS.....	76
Anexo A .....	76
Características y propiedades físicas y químicas del lodo en la etapa de coagulación floculación...	76
Anexo B .....	81
Resultados del análisis estadístico y propiedades físicas y químicas del lodo en la etapa de acondicionamiento .....	81

## **Índice de figuras**

Figura 1.1 Distribución de las especies de arsénico en función del pH en agua natural.....	3
Figura 1.2 Zonas de pH y dosis de hierro para mecanismos de coagulación, aplicando cloruro férrico como coagulante (Johnson, 1983).....	10
Figura 1.3 Esquematación de tratamientos de remoción de arsénico y posibles residuos. (Sandoval Yoval & Jauregui Mandujano , 2001).....	14
Figura 1.4 Distribución del agua en un floc de lodo generado en el tratamiento de agua. Fuente: (Perrazo & del Pilar, 2012).....	20
Figura 1.5 Problemática de los principales cuerpos receptores de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable.....	24
Figura 1.6 Alternativas de disposición y aplicación de estos sólidos, (Fernández Acuña , 2015).....	28
Figura 2.1 Etapas de la metodología para el desarrollo experimental .....	29
Figura 2.2 Equipo utilizado para la prueba de coagulación-floculación, (Jarras marca Phipps & Bird) .....	31
Figura 2.3 Reactor para producción de lodo con arsénico y para el proceso de espesamiento.....	32
Figura 2.4 Datos en la calibración del equipo de coagulación floculación.....	33
Figura 2.5 Dispositivo filtro banda (Bootest) .....	36
Figura 2.6 Gráfico representativo de la calibración y su coeficiente de determinación estadístico.....	38
Figura 2.7 Curva de la solución estándar de hierro con un coeficiente de correlación $R^2=0.987$ .....	39
Figura 2.8 Dispositivo para determinar la REF (Cornwell, et al., 1987) .....	41
Figura 2.9 Representación y construcción de los DCC para $k= 2$ y 3 factores .....	44
Figura 3.1 Efectos principales para la optimización de los factores experimentales estudiados .....	47
Figura 3.2 Diagrama de Pareto de efectos estimados para As(V) a 0.150 mg/L en el proceso de obtención de lodo.....	48
Figura 3.3 Grafica de superficie de respuesta estimada para los valores optimizados para la concentración de As: 0.150 mg/L. Con una $R^2 = 85.09\%$ y una $R^2$ (ajustada por g.l.) = 68.31%.....	49
Figura 3.4 Interacción de tiempo y volumen para cada una de las presiones .....	52
Figura 3.5 Torta quebrada húmeda y torta quebrada seca, para una presión de vacío de 520 mmHg .....	52
Figura 3.6 Comportamiento de la resistencia específica a la filtración a diferentes presiones en la obtención del lodo.....	53
Figura 3.7 Curva de evaporación en el proceso de obtención del lodo. ....	54
Figura 3.8 Floculador diseñado para obtener y espesar lodo optimo.....	55
Figura 3.9 Diagrama de Pareto estandarizada para SSED del polímero 1 .....	57
Figura 3.10 Efectos principales para la optimización de los factores experimentales estudiados para P1 .....	58
Figura 3.11 Diagrama de Pareto estandarizada para SSED con el polímero 2 .....	59
Figura 3.12 Efectos principales para la optimización de los factores experimentales estudiados para P2. ....	60
Figura 3.13 Interacción de tiempo y volumen para los dos polímeros óptimos en la etapa de acondicionamiento .....	62

**Optimización de los procesos de acondicionamiento y deshidratación de los residuos generados en la coagulación-floculación de agua que contiene arsénico.**

---

---

Figura 3.14 Curva de evaporación en el proceso de acondicionamiento .....	63
Figura 3.15 Comparación de ST en diferentes procesos de tratamiento con lodos de As(V), Al y Fe con Mn	64
Figura 3.16 Comparación en el comportamiento de la REF para lodos con As(V), Al y Fe con Mn en las diferentes etapas de tratamiento .....	65
Figura 3.17 Comparación en el comportamiento en el análisis de tF para lodos con As(V) y Fe con Mn .....	66
Figura 3.18 Filtro banda, para estudiar la deshidratación de lodo .....	66
Figura 3.19 Curva de desaguado en filtro banda Bootest. ....	67
Figura 3.20 Equipo de centrifugación para la deshidratación de lodo .....	69

## **Índice de tablas**

Tabla 1.1 Límites máximos permitidos por distintos organismos internacionales y nacionales, (Fernández C. A., 2011).....	5
Tabla 1.2 Características de los tipos de coagulantes utilizados para acondicionar el lodo (Hendricks, 2006)	22
Tabla 1.3 Métodos de deshidratación mecánica y sus tecnologías, (Syed, 2000) .....	23
Tabla 1.4 Residuos generados en las tecnologías de remoción de As (Adaptada por Garrido, 2015 de Amy et al., 1999).....	26
Tabla 2.1 Especificaciones del coagulante y polímero seleccionado para la obtención del lodo .....	30
Tabla 2.2 Factores de estudio en los procesos de coagulación-floculación.....	30
Tabla 2.3 Variables utilizadas para el gradiente de velocidad.....	30
Tabla 2.4 Factores de estudio en coagulación-floculación con diseño experimental matriz de 18 ensayos .....	31
Tabla 2.5 Medición de velocidad en (Hz) para obtener las (rpm) .....	33
Tabla 2.6 Características de los polímeros utilizados en la prueba de cribado.....	34
Tabla 2.7 Condiciones de estudio en los procesos de acondicionamiento.....	35
Tabla 2.8 Matriz experimental de estudio en el acondicionamiento con diseño de 18 ensayos .....	35
Tabla 2.9 Curva de calibración del equipo de filtro banda .....	37
Tabla 2.10 Técnicas analíticas para determinar las propiedades químicas del lodo con As .....	39
Tabla 2.11 Técnicas analíticas para determinar las propiedades físicas de lodo con As .....	39
Tabla 3.1 Resultados de la matriz con respecto a las variables de respuesta SS y As en el sobrenadante .....	45
Tabla 3.2 Análisis de Varianza para la obtención de lodos .....	47
Tabla 3.3 Efectos estimados para la optimización de As(V).....	49
Tabla 3.4 Resultados de las propiedades físicas y químicas realizadas al lodo óptimo.....	50
Tabla 3.5 Valores de la pendiente a diferentes presiones .....	52
Tabla 3.6 Registro del tiempo a la filtración en el proceso de obtención del lodo óptimo. ....	53
Tabla 3.7 Cribado con cinco polímeros de origen catiónico y aniónico, seleccionando los dos mejores.....	55
Tabla 3.8 Resultados de la matriz con respecto a las variables de respuesta SSED y As en el sobrenadante para el P1 Y P2; Concentración inicial de As(V) 0.015 mg/L .....	56
Tabla 3.9 Interacciones del análisis ANOVA para el polímero 1.....	57
Tabla 3.10 Análisis estadístico ANOVA para el Polímero 2.....	58
Tabla 3.11 Condiciones óptimas en la etapa de acondicionamiento para los polímeros seleccionados. ....	60
Tabla 3.12 propiedades físicas y químicas del lodo en el acondicionado.....	60
Tabla 3.13 Obtención de datos para calcular la Resistencia Específica a la Filtración con los dos polímeros. 61	
Tabla 3.14 Análisis comparativo de resultados de diferentes tipos de lodo .....	64
Tabla 3.15 Resultados obtenidos en el proceso de deshidratación para filtro banda .....	68
Tabla 3.16 Incremento de sólidos totales en la etapa de deshidratación.....	70

**Índice de ecuaciones**

Ecuación 1-1.....	17
Ecuación 1-2.....	17
Ecuación 1-3.....	18
Ecuación 2-1.....	41
Ecuación 2-2.....	41
Ecuación 2-3.....	42
Ecuación 2-4.....	42
Ecuación 3-1.....	67
Ecuación 3-2.....	67
Ecuación 3-3.....	68
Ecuación 3-4.....	68

### Lista de abreviaturas

DNA:	Ácido desoxirribonucleico
rpm:	Revoluciones por minuto
OMS:	Organización Mundial de la Salud
EPA:	Agencia de Protección Ambiental
As:	Arsénico
HACER:	Hidroarsenicismo Crónico Endémico
CONAGUA:	Comisión Nacional del Agua
IMTA:	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
ATSDR:	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
C-F:	Coagulación Floculación
REF o r:	Resistencia Especifica a la Filtración
CST:	Tiempo de Succión Capilar
P:	Presión
tF:	Tiempo a la filtración
TCLP:	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
SSED:	Sólidos Sedimentables
ST:	Sólidos Totales
DCC:	Diseño Central Compuesto
V:	Volumen
STH:	Sólidos en Torta Húmeda
STS:	Sólidos en Torta Seca
P1:	Polímero 1
P2:	Polímero 2
NOM:	Norma Oficial Mexicana
WRA	Water Research Institute
$P_1$	Concentración máxima de sólidos en el lodo.
$P_2$	Valor de la cinética de liberación de agua.
$P_3$	Volumen filtrado

## **Introducción**

El arsénico (As), es un elemento ampliamente distribuido en la corteza terrestre. Se clasifica químicamente como un metaloide. En el ambiente el arsénico generalmente se encuentra combinado con otros elementos como por ejemplo oxígeno, cloro y azufre. El arsénico combinado con estos elementos se conoce como arsénico inorgánico. El arsénico combinado con carbono e hidrógeno se conoce como arsénico orgánico, (ATSDR, 2007).

La exposición al arsénico inorgánico puede causar varios efectos sobre la salud, como es irritación del estómago e intestinos, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel, e irritación de los pulmones. A exposiciones muy altas de arsénico inorgánico puede causar infertilidad y abortos en mujeres, afección de la piel, pérdida de la resistencia a infecciones, afección en el corazón, daños al cerebro y desarrollar cáncer de piel, pulmón, hígado, linfa. Finalmente, el arsénico inorgánico puede dañar el DNA, (LENNTECH, 2016).

En México no existe actualmente un cálculo exacto de la población expuesta a la ingestión de arsénico a partir del agua; sin embargo, se conoce que son varias las localidades del país cuyas fuentes de abastecimiento se encuentran contaminadas con este metaloide con valores reportados que van desde 0.3 a 48 mg/L. Tales localidades se ubican en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco, Morelos, Hidalgo y Guerrero, (CONAGUA, 2007).

Existen múltiples procesos de remoción de arsénico como son, coagulación convencional, intercambio iónico, filtración directa, adsorción, electrocoagulación, procesos de membrana, deionización capacitiva y métodos biológicos. El punto crítico radica en el manejo de los residuos generados en los procesos de remoción.

Los diferentes tratamientos de remoción de contaminantes en agua con (As), generan residuos considerables en diferentes concentraciones de arsénico presentes en forma de semisólidos que, se descargan generalmente a cuerpos receptores no adecuados provocando efectos ambientales que contaminan el agua, suelo, vegetación y animales. La solubilidad del arsénico puede aumentar originando modificaciones en el pH y reducciones en el oxígeno disuelto, (Prieto, *et al.*, 2009).

Por lo que, con base en el contexto anterior, se plantearon la hipótesis, objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo:



### **Hipótesis**

Al optimizar las condiciones de obtención de lodo y acondicionamiento se obtendrá una adecuada deshidratación y disminución de volumen en el lodo con arsénico producido con  $\text{FeCl}_3$ , y polímero C496HMW.

### **Objetivo general**

Optimizar los procesos de acondicionamiento y deshidratación de los residuos generados en la coagulación-floculación de agua que contiene arsénico.

### **Objetivos específicos**

- Optimizar las condiciones de obtención de lodos provenientes del proceso de coagulación floculación en la remoción de arsénico del agua para consumo humano.
- Analizar la calidad del residuo proveniente del proceso de coagulación-floculación.
- Evaluar los factores que influyen en el acondicionamiento químico de los lodos producidos para su espesamiento y deshidratación.

# CAPÍTULO 1

## 1 MARCO TEÓRICO

La abundancia de arsénico en el subsuelo ha convertido a México en uno de los productores más importantes del mundo de arsénico. En 2003, México ocupó el cuarto lugar en la producción de arsénico, siendo los tres primeros productores China, Chile y Perú, (COREMI, 2004).

Muchos países sufren la presencia de arsénico en el agua de consumo humano, tal es el caso de México donde los primeros casos de arsenicosis fueron identificados desde 1958 en la Comarca Lagunera (Coahuila y Durango), resultado de concentraciones de  $As^0$ , así también en lugares como Tlacolula (Oaxaca), Zimapám (Hidalgo), Acámbaro (Guanajuato), Zacatecas (Zacatecas), Delicias, Meoqui, Cambaro Jiménez (Chihuahua), Huautla y Cuautla (Morelos, (Narváez-Suárez, 2009), se reportan concentraciones superiores a los establecidos. Por lo anterior, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA), regulan un límite de 0.01 mg/L de As en agua. El agua potable es reconocida como la principal fuente de exposición al As en la forma más tóxica  $As(III)$ . La presencia de As, en altas concentraciones, no se acompaña de un cambio de sabor, olor o aspecto visible del agua, (Petrusevski, 2007).

### 1.1 Química del arsénico

El Arsénico (As) es un elemento representativo del grupo V de la tabla periódica de los elementos, es un metaloide que se encuentra en muchas formas alotrópicas, su símbolo químico es As, tiene un número atómico de 33 y un peso molecular de 74.91, (Narváez-Suárez, 2009).

El arsénico es un elemento considerado entre los veinte más abundantes sobre la tierra. Siendo un elemento ubicuo que ocupa el número 14 en agua de mar y el número 12 en el cuerpo humano. Está presente en cantidades trazas en rocas, suelo, agua y aire. Este elemento puede existir en cuatro estados de valencia como  $As^{3-}$ ,  $As^0$ ,  $As^{3+}$  y  $As^{5+}$ . El arsénico se encuentra en el ambiente principalmente como arsenito y arseniato, (WHO, 2001).

El arsénico presente en el medio ambiente deriva de fuentes naturales (*por ej.* Actividad volcánica y meteorización) y de la actividad antropogénica (*por ej.* fundición de minerales, combustión de carbón, uso de plaguicidas, etc.). Como consecuencia de los procesos metabólicos que se producen

---

---

naturalmente en la biosfera el arsénico se encuentra en gran número de formas (especies) químicas orgánicas o inorgánicas en los alimentos.

El arsénico se oxida fácilmente en presencia de humedad, recubriéndose de una capa de anhídrido arsenioso. Su combustión produce también vapores de anhídrido arsenioso, que son muy tóxicos. Reacciona con los halógenos, formando trihalogenuros; y con el azufre, formando los sulfuros de arsénico. Algún estado alotrópico es sensible a la acción de la luz, así como algún trihalogenuro. El producto es atacado por los ácidos fuertes (níttrico, sulfúrico) que lo disuelven. Con las siguientes sustancias puede dar lugar a riesgo ambiental por explosión o inflamación: cloratos, bromatos o iodatos de calcio, bario, magnesio, sodio, potasio y zinc; pentafluoruro de bromo, trifluoruro de bromo, azida de bromo, carburos de cesio y rubidio, cloro, flúor, trióxido de cromo, monóxido de cloro, trifluoruro de cloro, litio, ácido hipocloroso, tricloruro de nitrógeno, tribromuro de nitrógeno, nitrato potásico, permanganato potásico, nitrato de plata, peróxidos de sodio y potasio, entre otras.

El agua es uno de los principales medios de transporte de arsénico en el ambiente. Su presencia predomina en lugares con alta actividad geotérmica. Generalmente existe en la forma inorgánica en las fuentes de abastecimiento de agua. Las especies pentavalentes son  $\text{AsO}_4^{3-}$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$ , y  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y las trivalentes son  $\text{AsO}_3^{3-}$ ,  $\text{As}(\text{OH})_3$ , y  $\text{As}(\text{OH})_4^-$ . El pH determina la especie predominante, el  $\text{As}^{3+}$  existe en un intervalo de 2 a 9 en condiciones reductivas y  $\text{As}^{5+}$  predomina en un intervalo de 7 a 11.5 en condiciones oxidativas, (Litter, *et al.*, 2010). Por lo tanto, la mayoría de las aguas superficiales el arsénico existe como  $\text{As}^{5+}$  y en los pozos como  $\text{As}^{3+}$  debido al poco oxígeno disuelto. La experiencia ha demostrado que el arsénico trivalente es difícil de remover del agua utilizando los procesos normales disponibles. Lo anterior se debe a que el arsénico trivalente se encuentra predominantemente como  $\text{H}_3\text{AsO}_3$ , el cual no se ioniza, (Gupta & Chen, 1978).

Los valores estimados de las constantes de ionización (Cornwell, *et al.*, 1987) para ambas especies son:

Arseniato:  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  pKa1 = 2.2; pKa2 = 6.94; pKa3 = 11.5

Arsenito:  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  pKa1 = 9.2; pKa2 = 14.22\*; pKa3 = 19.22\* \*Valores extrapolados

Como puede observarse, las constantes de disociación para As(V) son menores que las del As(III) por lo que su grado de disociación más elevado. La capacidad de ionización del As(V) le permite combinarse fácilmente con otros compuestos, lo cual hace su remoción por diversos métodos sea más

eficiente, en comparación que el As(III); de ahí la importancia de oxidar el arsenito antes de someter el agua a algún tipo de tratamiento. Los cambios en el estado de ionización para el arsenito y arsenato ocurren a diferentes pHs y potencial redox, con una concentración de:  $[\text{AsO}_4^{3-}]_{\text{Total}}: 2.63 \mu\text{M}$ , I: 0.013 M, T: 25°C tal como se observa en la Figura 1.1.

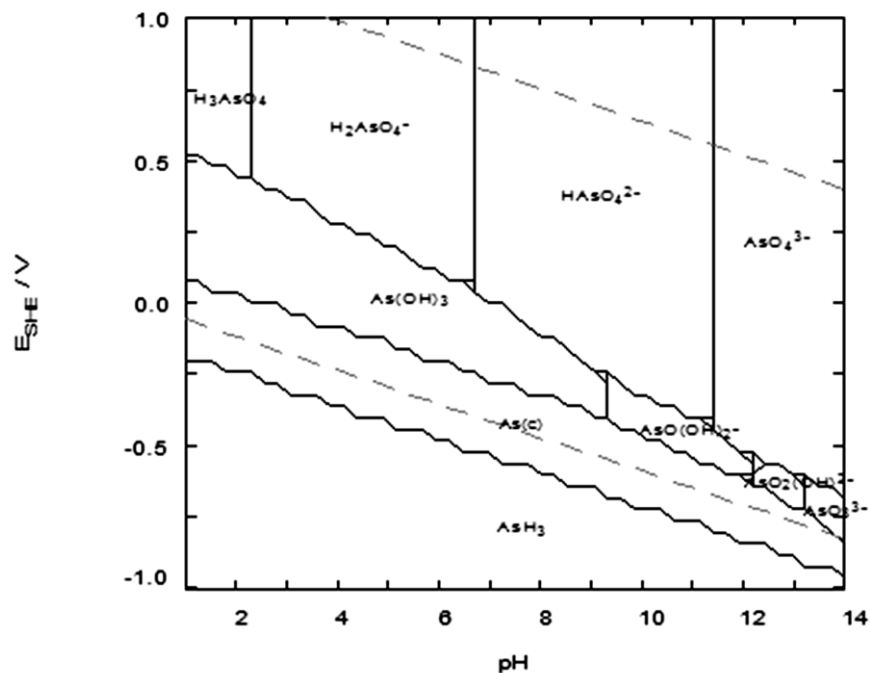


Figura 1.1 Distribución de las especies de arsénico en función del pH en agua natural, (Ramirez, 2012)

## 1.2 Toxicidad

El arsénico es un elemento tóxico para el ser humano. Esta toxicidad se produce tanto en concentraciones altas de este elemento, donde la exposición causa efectos agudos que pueden llegar a ser letales para el ser humano; como cuando la exposición se produce durante un largo período de tiempo a bajas concentraciones, por ejemplo, por ingestión de agua.

Se sabe que los efectos tóxicos del arsénico dependen de la naturaleza y de la extensión de la exposición (dosis), y particularmente de:

- ❖ La concentración de arsénico en el momento de la exposición,
- ❖ La frecuencia de la exposición,
- ❖ La duración de la exposición, y
- ❖ El tipo de arsénico presente durante la exposición.

Por lo que se considera según, ATSDR, (2007) y Chakraborti (2003):

Exposición aguda: >2 mg/kg/d; Exposición crónica: 0.03-0.1 mg/kg/d.

Los efectos negativos para la salud en casos de intoxicación aguda incluyen vómitos, dolor abdominal y diarrea, seguidos de entumecimiento u hormigueo en las manos y los pies o calambres musculares y, en casos extremos, la muerte. En el caso de una exposición prolongada, los primeros síntomas se observan generalmente en la piel (cambios en el color de la piel, lesiones en la piel, así como durezas y callosidades en palmas de las manos y plantas de los pies) debilidad crónica, pérdida de reflejos, fatiga, gastritis, colitis, anorexia, pérdida de peso y pérdida de cabello. La exposición a largo plazo a través de los alimentos o de aire resulta en hiperqueratosis, hiperpigmentación, enfermedades cardiovasculares, alteraciones en los sistemas vasculares y nerviosos periféricos, trastornos circulatorios, uñas quebradizas sueltas con bandas blancas transversales a través de las uñas llamadas líneas de Mees, enfermedades de hígado y riñón. El arsénico se deposita en el cabello, la piel, las uñas y huesos. Estos efectos se producen tras una exposición mínima de aproximadamente, cinco años y pueden ser precursores de cáncer de piel. Además de este cáncer de piel, la exposición prolongada también puede causar cáncer de vejiga y de pulmón. Otros efectos perjudiciales para la salud son problemas de desarrollo, daños en el cerebro y sistema nervioso, diabetes y enfermedades cardiovasculares, (Flanagan, 2012).

El arsénico es considerado como un elemento esencial, pero una gran cantidad de compuestos de arsénico son tóxicos.

En varias partes del mundo se ha reportado que el agua de pozos artesianos puede contaminarse con el arsénico presente en rocas del subsuelo. Particularmente, desde que en los años noventa se descubrió la contaminación de agua potable con arsénico en los pozos de Bangladesh, el tema del arsénico en el agua ha captado la atención de muchas personas, (WHO, 2001).

La enfermedad denominada Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), que se caracteriza por presentar lesiones en piel y alteraciones sistémicas cancerosas y no cancerosas, (García, 2011).

### 1.3 Normatividad para el arsénico

#### Agua para uso y consumo humano

El arsénico ocurre naturalmente en el agua en muchas partes del mundo ya que el agua subterránea puede contaminarse con el arsénico presente en rocas del subsuelo. Por ejemplo, en los EE. UU el nivel máximo de contaminación actual (MCL) en el agua potable es de 0.010 mg/L, según la EPA (2001) estimó que la adopción de disminuir la concentración de arsénico de 0.050 mg/L a 0.01 mg/L requirió tomar medidas correctivas para reducir el nivel de arsénico en el agua de consumo en 3.000 sistemas comunitarios de agua en los EE.UU., que sirven a 11 millones de personas. Ryker en el (2001) con estudios realizados por el Servicio Geológico de Estados Unidos muestra que las concentraciones de arsénico superiores a 0.010 mg/L se producen en todos los EE.UU. y que el arsénico en el agua subterránea es un problema muy complejo. Por tanto, existe una gran necesidad de desarrollar métodos eficientes en costos para la remoción de arsénico del agua potable.

En México no existe actualmente un cálculo exacto de la población expuesta a la ingestión de arsénico a partir del agua; sin embargo, se conoce que son varias las localidades del país cuyas fuentes de abastecimiento se encuentran contaminadas con este metaloide con valores reportados que van desde 0.3 a 48 mg/L. Tales localidades se ubican en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco, Morelos, Hidalgo y Guerrero, (CONAGUA, 2007).

Sintetizando las concentraciones de arsénico en Tabla 1.1 se muestran los límites máximos permitidos y valores guía adoptados por distintos organismos internacionales y nacionales de varios países para la regulación del contenido de arsénico en el agua de bebida para el consumo humano.

**Tabla 1.1** Límites máximos permitidos por distintos organismos internacionales y nacionales, (Fernández C. A., 2011).

País/Organismo	Concentración de arsénico máxima permitida (mg As/L)	País/Organismo	Concentración de arsénico máxima permitida (mg As/L)
Arabia Saudí	0.050	Filipinas	0.050
Argentina	0.010	Ghana	0.050
Australia	0.007	India	0.050
Baharain	0.050	Indonesia	0.050
Bangladesh	0.050	Japón	0.010

País/Organismo	Concentración de arsénico máxima permitida (mg As/L)	País/Organismo	Concentración de arsénico máxima permitida (mg As/L)
Brasil	0.010	Laos	0.010
Canadá	0.010	<b>México</b>	<b>0.025</b>
Chile	0.050	Mongolia	0.010
China	0.050	Namibia	0.010
Croacia	0.050	Nepal	0.050
Ecuador	0.010	Omán	0.050
Egipto	0.050	Organización Mundial de la Salud (OMS)	0.010
Rusia	0.010	EUA: New Jersey	0.003
Sri Lanka	0.050	Taiwán	0.010
Tailandia	0.050	UE (Unión Europea)	0.010
Vietnam	0.050	USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)	0.010
Zimbawe	0.050		

Para los residuos generados en la remoción de As en agua para uso y consumo humano, se tienen las siguientes Normas Oficiales Mexicanas:

NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos, con sus respectivos límites máximos permisibles (LMP).

Contaminante	LMP (mg/L)
Arsénico	5.0

NOM-004-SEMARNAT-2004 Protección ambiental. -Lodos y biosólidos-. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Contaminante	Biosólidos Excelentes (mg/kg) en base seca	Biosólidos Buenos (mg/kg) en base seca
Arsénico	41	75

### Para remediación

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico y otros contaminantes. Concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo.

Contaminante	Uso agrícola/residencial/comercial(mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Arsénico	22	260

### 1.4 Tecnologías para la remoción del arsénico del agua

Existen diferentes tratamientos y procesos para la remoción de arsénico del agua, que se comprenden desde plantas potabilizadoras convencionales y métodos domiciliarios, hasta tecnologías in situ, donde se aplican en forma simultánea, secuencial, o independiente. Los procesos de remediación que se conocen en la actualidad son (Esparza, 2006):

#### Técnicas empleadas para la remoción de arsénico.

- Óxido reducción
- Separación sólido- líquido:
  - Ablandamiento con cal
  - Coagulación - Adsorción - filtración
  - Coagulación-Adsorción
  - Coagulación- Filtración
  - Con sales de hierro y aluminio
  - Presencia de hierro y manganeso
  - Hidróxido férrico granular
  - Hierro con filtración directa
  - Alúmina activada



- Intercambio iónico
- Separación física
  - Electrodialisis inversa
  - Osmosis inversa y nano filtración
- Procesos biológicos

Estos procesos se utilizan en mayor o menor porcentaje, ya que se sabe las limitaciones y alcances de cada uno de ellos, por lo que resulta importante proponer mejoras a las desventajas y limitaciones de cada uno de los tratamientos, (Konstantinos C.M., (2006), Litter M.I., (2010), Ingallinella A. M., (2011)).

La selección del método dependerá directamente de la especiación del arsénico, la composición química del agua, el potencial de reducción, la dureza, la presencia de sílice, sulfatos, fosfatos, hierro y otras especies químicas, los volúmenes a ser tratados y el grado de sofisticación que pueda ser aplicado. En cualquier caso, debe tenerse en cuenta la manipulación y disposición final de los residuos generados, (Litter, *et al.*, 2010).

#### 1.4.1 Óxido reducción

La mayoría de las tecnologías de remoción de arsénico son eficientes cuando el elemento está presente en el estado pentavalente, porque la forma trivalente no está cargada a pH debajo de 9.2. Por ello, deben oxidarse previamente los componentes arsenicales. Sin embargo, debe notarse que la oxidación sin ayuda de otros tratamientos físicos o químicos no remueve el arsénico del agua.

El arsenito puede oxidarse directamente por un número de agentes químicos como el cloro gaseoso, el hipoclorito, ozono, permanganato, peróxido de hidrógeno, óxidos de manganeso y el reactivo de Fenton ( $H_2O_2/Fe^{2+}$ ). El cloro es un oxidante rápido y efectivo, pero puede conducir a reacciones con la materia orgánica, produciendo trihalometanos tóxicos como subproductos. En Europa y en los EE.UU. se usa crecientemente ozono en reemplazo del cloro. El permanganato de potasio ( $KMnO_4$ ) es un oxidante efectivo del arsenito y es un reactivo comúnmente disponible en los países en desarrollo. El agua oxigenada puede ser un oxidante efectivo si el agua contiene altos niveles de hierro disuelto, lo cual ocurre a menudo conjuntamente con la contaminación arsenical; se producen reacciones de tipo Fenton. La irradiación ultravioleta sola o conjuntamente con  $TiO_2$  pueden ser opciones convenientes para la oxidación de As(III), (Litter, *et al.*, 2010).

### 1.4.2 Ablandamiento con cal

Consiste en la transformación de piedra caliza en presencia de agua y ácido carbónico para formar carbonato de calcio; este compuesto adsorbe entonces el arsénico, y el proceso continúa por coagulación. El método se emplea usualmente para tratar aguas muy duras y presenta alta eficiencia. Las desventajas son: un pH muy alto en las aguas resultantes (10-12) y que se requieren dosis muy altas de coagulante. Sin embargo, es difícil que se pueda llevar el arsénico a niveles bajos, particularmente por debajo de 1 mg/L, y puede necesitarse un tratamiento secundario. El ablandamiento con cal es más efectivo cuando el pH es alto (>10,5). Se usa cloro para oxidar arsenito a arseniato (Pirnie, 2000).

### 1.4.3 Coagulación floculación

El proceso de coagulación desestabiliza los coloides del agua, al neutralizar las cargas eléctricas de la superficie de éstos, permitiendo así que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. Estos flóculos, inicialmente pequeños, al juntarse formarán aglomerados mayores, que son capaces de asentarse o sedimentar. El proceso de desestabilización (neutralización de la carga) corresponde a la coagulación y la etapa de formación de flóculos (formación de aglomerados), a la floculación. Muchos autores se refieren a ambas etapas como “coagulación”. Como agentes coagulantes se usan, en general, sales de Al o Fe, (Letterman, 2002).

Cada tipo de agua tiene sus peculiaridades, que deben tenerse en cuenta al seleccionar el coagulante más apropiado, la dosis a emplear y otros reactivos necesarios como polímeros. El As(V) reacciona, se adsorbe y precipita en los hidróxidos de aluminio y de hierro, obtenidos en el agua al hidrolizarse sales de Al(III) y de Fe(III). Es un método muy eficiente para remover el arsénico del agua. El tipo y la dosis del coagulante, afectan la eficiencia del proceso que es mayor en los valores intermedios de pH.

La combinación de procesos de coagulación-floculación-sedimentación-filtración se usa, tradicionalmente, para reducir la turbiedad del agua por remoción de materias suspendidas no sedimentables y de sedimentación lenta. En los casos en que la cantidad de materias suspendidas a remover es baja, las unidades en que se producen los procesos de floculación y decantación pueden ser eliminadas, dando origen a la tecnología C-F (coagulación-filtración). De esta forma se reducen los costos de inversión, operación y mantenimiento, (Barahona & González, 1987) (Chwirka, *et al.*, 2004).

La geoquímica del arsénico revela que altas concentraciones de arsénico en el agua subterránea con frecuencia están asociadas a altas concentraciones de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$ .

La oxidación para remover  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$ , conduce a la formación de hidróxidos que remueven el arsénico soluble por reacciones de coprecipitación y adsorción. La producción de especies oxidadas de Fe-Mn y la precipitación seguida de los hidróxidos son análogas a la coagulación “in situ” (la cantidad de Fe o Mn removidos se traduce como la dosis de coagulante), (Edwards, 1994).

### 1.4.3.1 Mecanismos del proceso de coagulación floculación con $\text{FeCl}_3$

Existe un diagrama de solubilidad de hierro (cloruro férrico). En este diagrama se pueden observar tres regiones típicas: región “A”, donde la coagulación es debida al mecanismo de barrido, con el valor del pH entre 6 y 9, y la dosis del cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ) entre 27 y 270 mg/L; región “B”, donde predomina el mecanismo de coagulación por adsorción y neutralización de carga, con el valor de pH entre 4,5 y 6,0, y la región “C”, donde ocurre la restabilización para valores de pH inferiores a 6, dependiendo de la dosis de cloruro férrico, (Di, 1993). En el caso de hierro el principal compuesto polimérico es  $(\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2)^{2+}$ .

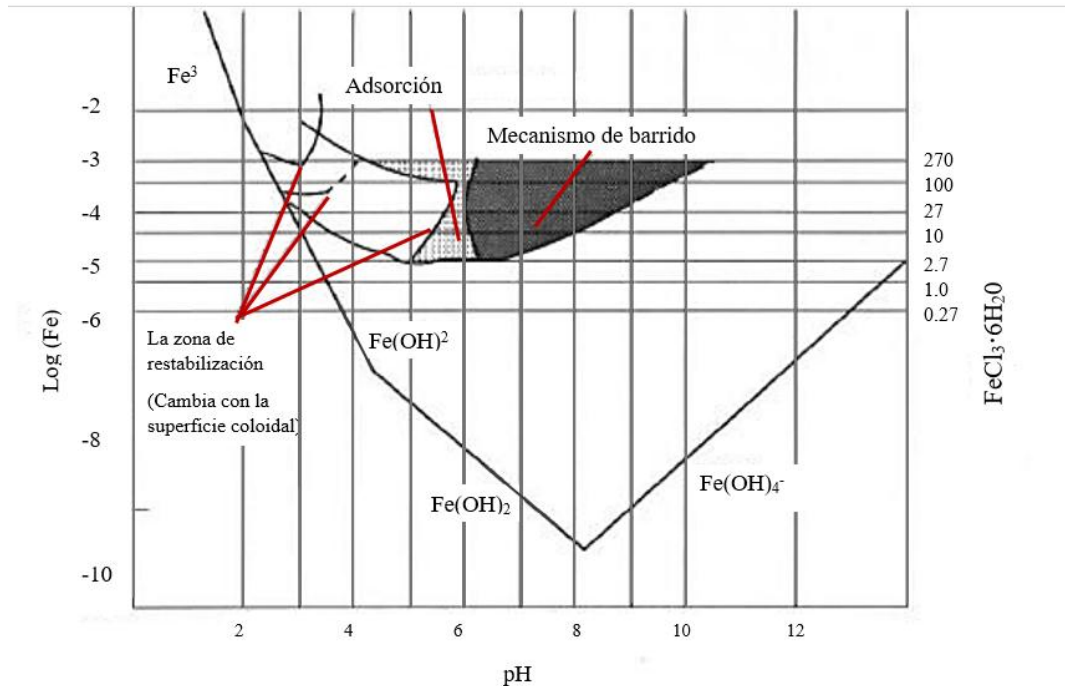


Figura 1.2 Zonas de pH y dosis de hierro para mecanismos de coagulación, aplicando cloruro férrico como coagulante (Johnson, 1983)

La coagulación con la sal de hierro es más eficiente que con la de aluminio, para valores de pH más elevados. La eficiencia de la coagulación utilizando una solución con 50% de sulfato de aluminio y 50% de cloruro férrico, en función de la masa molecular, y concluyó que no hay ventaja en utilizar la mezcla, comparando los resultados con solamente una de las sales, a no ser que alguna situación, dependiendo de la calidad del agua lo exija, (Di, 1993).

### **Región A Mecanismo de barrido**

El mecanismo de barrido es utilizado en las plantas de tratamiento, donde la floculación y la sedimentación anteceden a la filtración, los flóculos formados son mayores en tamaño y en velocidades de sedimentación, comparados con los flóculos formados en la coagulación utilizando el mecanismo de adsorción-neutralización. En la coagulación por barrido, las características químicas de la coagulación son más importantes que las responsables del transporte, significando que el gradiente de velocidad deja de ser el parámetro determinante en la eficiencia de la coagulación. En este mecanismo de coagulación, normalmente se sobresatura el agua con 3 a 4 veces más sales de aluminio y de hierro que la concentración de equilibrio, para los valores de pH correspondientes, resultando en una rápida precipitación del hidróxido formado, (Di, 1993). Dependiendo de la cantidad de coagulante añadido, de la concentración de algunos iones en el agua y del pH de la mezcla, podrán formarse precipitados del tipo  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Estos precipitados involucran las partículas coloidales y, así, son eliminados por sedimentación. Este mecanismo no depende de la neutralización de la carga de los coloides, de esta manera, la condición óptima de la coagulación puede no corresponder a aquella donde el potencial zeta es mínimo.

### **Región B Mecanismo por adsorción y neutralización de carga**

La atracción de partículas coloidales entre la superficie y la especie adsorbida puede ser debido a interacciones como enlaces de hidrógeno, enlaces covalentes, reacciones de coordinación y reacciones de intercambio iónico, si las especies químicas poseen carga contraria a la de la superficie de los coloides, habrá desestabilización de éstos. La adsorción específica, causada por la interacción entre coagulante y coloide, es común en el caso de especies hidrolizadas de hierro. El mecanismo de adsorción-neutralización de carga tiene su importancia cuando el tratamiento de agua se realiza utilizando la tecnología de la filtración directa, donde únicamente hay necesidad de partículas desestabilizadas que se retendrán en el medio filtrante y no de la formación de flóculos para la posterior sedimentación. Las principales diferencias entre la adsorción-neutralización de carga y los mecanismos de compresión de la capa difusa son que: 1) se obtiene la desestabilización de los coloides por las especies adsorbibles con dosis muy inferiores a las necesarias para la compresión de

la capa difusa; 2) la dosis excesiva de especies adsorbibles se puede obtener la reversión de la carga superficial de las partículas coloidales; y 3) la relación estequiometría entre la concentración de los coloides y la cantidad necesaria de especies desestabilizantes por adsorción, (Di, 1993).

### **Región C Restabilización**

Zona de restabilización, es donde el Potencial Zeta es positivo. En esta región, la eficiencia de la floculación es relativamente pequeña, (Di, 1993).

#### **1.4.3.2 Factores que influyen en la coagulación**

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores que influyen en el proceso de coagulación-floculación de agua con la finalidad de optimizar el proceso: pH, turbiedad, potencial Z, sales disueltas, temperatura del agua, tipo y dosificación de coagulante utilizado, condiciones de mezcla, sistemas de aplicación de los coagulantes, tipos de mezcla y el color. (Cárdenas, 2000).

#### **1.4.4 Adsorción**

Para el arsénico, se utilizan compuestos con afinidad química que interactúan electrostáticamente con el arsénico y con sus especies hidrolizadas en el agua. La separación de un contaminante (solute) por un sólido (sorbente), se debe a las interacciones intermoleculares formadas en el sistema soluto-superficie del sorbente. La energía libre de adsorción es la suma de las energías químicas, electrostáticas y la de solvatación o hidratación. Los arseniatos coprecipitan o se adsorben, sobre hidróxidos de hierro, involucrando reacciones superficiales altamente específicas. La mejor adsorción del As(V) sobre el Al(OH)<sub>3</sub> y sobre el Fe(OH)<sub>3</sub> tiene lugar en un rango de pH de 4 a 7. Como la superficie del hidróxido es anfótera, puede captar y desprender protones desorción, (Carmona, 2007).

#### **1.4.5 Intercambio iónico**

El intercambio de iones mejora los resultados de la coagulación-filtración. Hay que tener en cuenta, los efectos de la competencia entre iones, puede ser reciclada el agua residual (se trata de una solución saturada de sales). En la remoción de arsénico, las resinas de intercambio aniónico requeridas son de base débil y fuerte. Las de base fuerte pueden remover el arsenato del agua produciendo un efluente con menos de 0,001 mg/L de arsénico. Este método no remueve el arsenito y permite la diferenciación analítica entre las especies de arsénico. Los principales interferentes del proceso son el sulfato y los sólidos disueltos totales; el hierro y manganeso pueden provocar la obstrucción del lecho. Cuando se presentan estos parámetros en concentraciones altas, el agua requiere un pretratamiento.

La remoción del arsénico es relativamente independiente del pH y la concentración inicial de éste en el influente es casi completa (85-100%). Las ventajas de las resinas de intercambio iónico son su fácil regeneración con cloruro de sodio, su amplio rango de pH y el mejoramiento de la calidad del agua por la remoción de cromato, selenato, nitrato y nitrito. Este método es relativamente costoso y la regeneración de la resina produce salmueras ricas en arsénico, (EPA, 1997).

#### **1.4.6 Ósmosis inversa y nanofiltración**

Es un proceso para eliminar las sustancias disueltas presentes en el agua, forzando la circulación del agua por una membrana semipermeable bajo una presión superior a la osmótica. Tiene una eficiencia de más de 95 % de remoción de arsénico disuelto. Este método es efectivo para remover arsénico de aguas subterráneas. El rendimiento del proceso con ósmosis inversa es afectado principalmente por la turbiedad, hierro, manganeso y sílice, (Miliarium, 2008).

#### **1.4.7 Procesos biológicos**

La actividad bacteriana puede jugar un papel catalizador importante en varios de los procesos de remoción de arsénico, pero se conoce poco sobre la viabilidad del uso de procesos biológicos para eliminar el arsénico en agua.

### **1.5 Selección de la tecnología de tratamiento para reducción de lodo en sus diferentes etapas**

Los parámetros de calidad de agua son importantes para tomarse en cuenta en la eficiencia de cualquier proceso utilizado en remoción de arsénico dependerá de la presencia en el agua de factores que afecten al proceso, elementos que compitan con el arsénico y agentes que interfieran en el manejo y disposición final de los residuos generados en el tratamiento. También influirán las condiciones de operación del proceso.

En el caso de la remoción de arsénico con base en procesos de coagulación-floculación, los factores más relevantes se relacionan a los parámetros de calidad del agua, como pH y alcalinidad, que favorecen la formación de los hidróxidos metálicos y la adsorción del arsénico en éstos, así como las condiciones de óxido-reducción que favorecen la presencia de arsénico como As(V), así como en la matriz de agua, de componentes que pudieran competir con el As por los sitios de adsorción sobre los hidróxidos metálicos formados. Respecto a las condiciones de operación influirán: dosis de coagulante y tasa y duración de la carrera de filtración. (Litter, *et al.*, 2010).

Por ello, al seleccionar un método, hay que tener en cuenta el volumen de agua a tratar, la concentración inicial de arsénico requerida por la normatividad correspondiente, el pH del agua, la

concentración de sulfatos, de otras sales y xenobióticos (Figura 1.2), que además de su toxicidad, pueden alterar el proceso depurador, el caudal a tratar y las variaciones estacionales del agua disponible. También, se deben conocer los aspectos de ingeniería necesarios a la captación y a la distribución del agua, así como la disponibilidad y costo de la energía eléctrica.

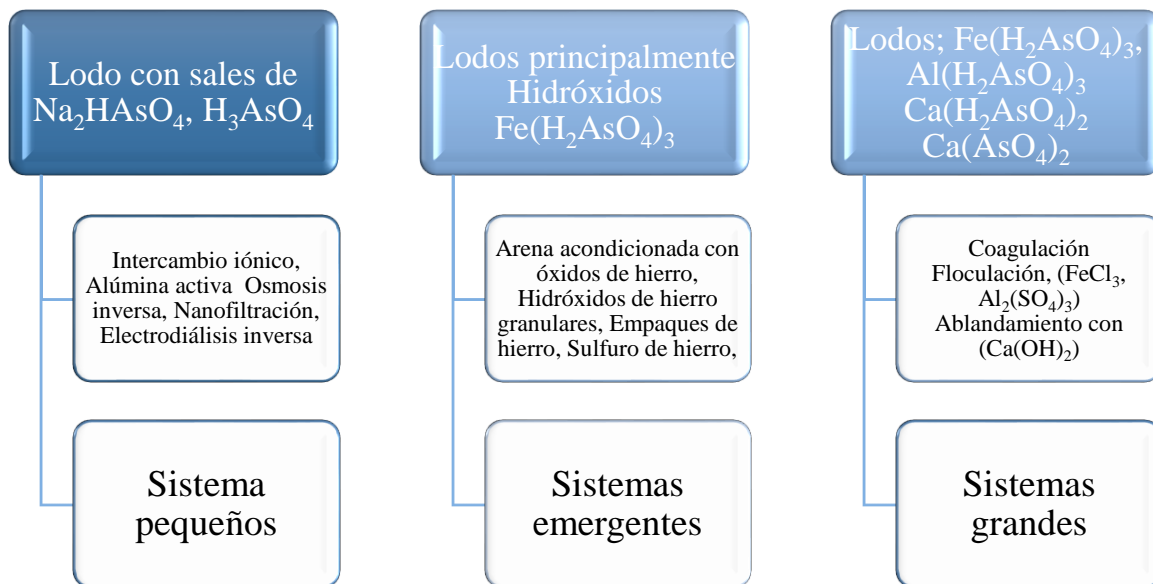


Figura 1.3 Esquematación de tratamientos de remoción de arsénico y posibles residuos, (Sandoval, *et al.*, 2001)

Existen varias alternativas, que logran implementarse para reducir la cantidad de residuos generados desde los sistemas de tratamiento ya sea en etapas iniciales del proyecto, durante la operación del sistema y/o posterior al tratamiento del agua.

### Reducción de lodos en las etapas iniciales

Al escoger un tratamiento de agua en las plantas potabilizadoras es necesario tomar en cuenta desde las etapas iniciales la generación de residuos, la cual debe ser minimizada en su máxima posibilidad.

Para ello se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos (Perrazo & del Pilar, 2012):

- Identificar la fuente de agua cruda: en la planificación inicial de cualquier proyecto, conocerse el tipo de fuente de agua, la ubicación de la misma, analizar el tratamiento adecuado y hacer un diseño viable y sustentable. El residuo generado es directamente proporcional a la calidad de agua del

influyente que será eliminado por el tratamiento. Una vez seleccionando la fuente de agua, se determina la calidad deseada o requerida del agua tratada y estimar la cantidad de residuos generados.

- **Seleccionar la tecnología de remoción:** en esta etapa de diseño, es importante que se tome en cuenta los costos del tratamiento, la calidad y cantidad de agua permeada. Una proporción importante del costo total de la planta, es a menudo asociada a la eliminación de residuos. Se debe tener claro que la selección de un proceso de potabilización tiene una relación directa con la cantidad de residuo generado.
- **Seleccionar los químicos:** una vez que el método de tratamiento del agua se ha establecido, se deben seleccionar los productos químicos para el mismo, establecer su eficacia y determinar los residuos generados por ellos.

#### **Reducción de lodos durante la operación del sistema**

- **Es necesario dosificar correctamente de químicos y/o uso de medios para el tratamiento:** durante el tratamiento de agua, se debe tener en cuenta que la cantidad de residuos producidos serán directamente proporcionales a la cantidad de químicos que se usen, así como a su calidad, (Perrazo & del Pilar, 2012).
- **Retrolavados:** durante el lavado de los filtros, el lecho de grava o arena se agita y el agua sucia se elimina a través de tuberías destinadas para el efecto. Luego esta agua puede enviarse a un sedimentador, donde se separan los sólidos del agua, ésta última se recircula nuevamente al proceso de potabilización. Las características químicas del agua de lavado deben ser investigadas cuidadosamente antes de decidir a recircularla, (Perrazo & del Pilar, 2012).

#### **Reducción de lodos posterior al tratamiento de agua**

- **La recuperación de químicos:** la cantidad de residuos puede reducirse mediante la recuperación de algunos de sus constituyentes. Por ejemplo, algunos coagulantes, como el aluminio, se pueden recuperar; no así los polímeros. La recuperación química se logra mediante la realización de reacciones químicas con el lodo, alterando las características del mismo. El costo de recuperación es una consideración importante y debe ser cuidadosamente evaluado. Se debe realizar una comparación entre el costo de recuperación química más el costo del químico usado versus el costo



de la nueva sustancia química sin recuperación más el costo de tratamiento de lodo generado, (Perrazo & del Pilar, 2012).

- El tratamiento de los residuos generados: después de realizado el proceso principal que es el de potabilizar al agua, se deben tratar los residuos generados, dependiendo si son sólidos, semi-sólidos o líquidos, además por su peligrosidad, mediante técnicas adecuadas para cada caso, (Perrazo & del Pilar, 2012).

### **1.6 Propiedades del lodo generado durante la remoción de arsénico**

Una vez que se elige la tecnología de tratamiento, la calidad de agua y la cantidad de residuo, es importante conocer las propiedades que clasifican al lodo generado, para su disposición posterior al tratamiento como; espesamiento, acondicionamiento y deshidratación.

#### **1.6.1 Propiedades físicas**

Cualquier tipo de lodo consiste en una combinación entre una fase sólida con cierta cantidad de líquido. El comportamiento de ese líquido no debe ser, asumido como igual al comportamiento habitual del agua en su estado líquido natural, pues hay diferentes formas físicas del agua en el lodo, las cuales ejercen marcada influencia en la mayor o menor dificultad de separar la fase líquida de la sólida, (Smollen & Kafaar, 1994).

Las características físicas de los residuos generados en las plantas de tratamiento de agua para flujos en estado sólido-líquido, se dividen en según sus propiedades. De acuerdo a Knocke como propiedades físicas de los lodos; macropropiedades y micropropiedades. Las macropropiedades se refieren a parámetros de tasas de sedimentación, resistencia específica a la filtración, concentración de sólidos en la torta; en las micropropiedades incluyen la distribución de tamaño de partícula y densidad. (Cornwell, *et al.*, 1987).

Knocke (1983), ha evaluado varias de estas macropropiedades y micropropiedades, así como sus efectos en la deshidratación de lodos, las cuales pueden ser utilizadas en la selección de un proceso de deshidratación y así determinar la relativa facilidad de filtración, además, pueden ser útiles como herramientas operacionales para determinar las dosis de reactivos para el acondicionamiento. Las principales propiedades físicas son: la resistencia específica a la filtración, el tiempo de succión

capilar, el tiempo a la filtración y la compresibilidad, (Cornwell, *et al.*, 1987). A continuación, se detallan cada una de éstas.

### 1.6.2 Resistencia específica a la filtración (REF)

La resistencia específica a la filtración se ha utilizado para optimizar el rendimiento en la deshidratación de lodos. Esta propiedad es más importante en la evaluación de acondicionamiento químico de los lodos para aplicaciones a escala real. (Cornwell, *et al.*, 1987).

La resistencia específica es una magnitud esencial representativa del lodo, por lo tanto, un proceso de acondicionamiento (físico o químico) tendrán por objeto reducir esta resistencia, de forma que se acelere la filtración, (Barraqué, 1979).

El cálculo de la resistencia específica se basa (Ecuación 1-1) en la ley de Poiseuille-D'Arcy, de la cual se obtiene la ecuación básica de filtración, (Cornwell, *et al.*, 1987).

$$\frac{dV}{dt} = \frac{PA^2}{\mu(rcV + R_m A)} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

V = Volumen de filtrado (m<sup>3</sup>)

t = Tiempo de filtración (s)

P = Presión de vacío aplicado (dinas/cm<sup>2</sup> = g/cm. s<sup>2</sup>)

A = Área de filtración (cm<sup>2</sup>)

μ = Viscosidad del filtrado (poise = g/cm. s)

r = Resistencia específica de la torta al paso del filtrado (cm/g)

c = Concentración de sólidos depositados por unidad de volumen de filtrado (g/cm<sup>3</sup>)

R<sub>m</sub> = Resistencia inicial del medio filtrante (generalmente despreciable cm/g)

La integración y ordenación de la Ecuación 1-1 permite el cálculo de la resistencia específica (r), obteniendo (Ecuación 1-2):

$$\frac{t}{V} = \left( \frac{\mu r c}{2PA^2} \right) V + \frac{\mu R_m}{AP} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

De la Ecuación 1-2 se deriva que el gráfico de  $t/V$  en función de  $V$  daría una línea recta del tipo  $y = bx + a$ , donde:

$$b = \frac{\mu r c}{2PA^2} \quad a = \frac{\mu R_m}{PA}$$

Si se considera despreciable la resistencia del medio filtrante y a b como la pendiente, la resistencia específica a la filtración está dada por:

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu c} \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Donde:

$r$  = Resistencia específica del lodo (cm/g)

$P$  = Presión de vacío aplicada (dinas/cm<sup>2</sup> = g/cm.s<sup>2</sup>)

$A$  = Área del filtro (cm<sup>2</sup>)

$b$  = Pendiente (s/cm<sup>6</sup>)

$\mu$  = Viscosidad del filtrado (poise = g/cm.s)

$c$  = Concentración de sólidos totales por volumen de filtrado (g/cm<sup>3</sup>)

### 1.6.3 Tiempo de succión capilar

El tiempo de succión capilar (CST) determina la velocidad de liberación de agua de lodos. Eso proporciona una medida cuantitativa en segundos, esto se refiere a la facilidad con que un lodo libera su agua.

Los resultados son necesarios para complementar los procesos en la deshidratación de lodos; para evaluar acondicionamiento de lodos y las dosis de reactivos que se utilizan una prueba de jarras y la sedimentación. La prueba contiene un pequeño cilindro con una hoja de cromatografía papel, donde se coloca la muestra, el proceso de extracción de muestra en el papel se le conoce como acción capilar. El tiempo requerido para que el líquido viaje una distancia especificada, se registra automáticamente mediante el control de la conductividad cambio que se produce en dos puntos de contacto apropiadamente espaciados y en contacto con el papel de cromatografía. El tiempo transcurrido es indicativo de la velocidad de drenaje de agua. Ha sido utilizada como indicador relativo para caracterizar el desempeño de la mayoría de deshidratación de lodos procesos. La manipulación en la conductividad hace compleja la realización de esta prueba, Knocke (1983), APHA (1998), Kavanach (1980).

#### **1.6.4 Tiempo a la filtración**

Se correlaciona con el tiempo de succión capilar (CST) y es similar a la resistencia específica a la filtración si el contenido de sólidos del lodo y la viscosidad del filtrado no varían entre ellas. La prueba ayuda en la operación diaria de los procesos de deshidratación de lodos para evaluar polímeros en la etapa de acondicionamiento, así como las dosis.

La prueba con un volumen más pequeño es posible en aplicaciones para evaluar la velocidad de escurrimiento del agua con posterioridad a pruebas de jarras y la determinación de sólidos sedimentables, (Knocke, 1983), (APHA, 1998).

#### **1.6.5 Compresibilidad**

Esta prueba consiste en medir la resistencia específica a la filtración ( $r$ ) a diferentes presiones ( $P$ ) hasta obtener la deshidratación por aplastamiento de la torta de lodos. Al aumentar la presión diferencial se produce un cierre de los poros de la torta, lo que da una resistencia mayor a la filtración, (Barraqué, 1979).

#### **1.7 Características químicas**

Es importante determinar el agua presente en el lodo para optimizar la deshidratación con respecto al costo de tratamiento, principalmente para la reducción del volumen de lodos (Smollen & Kafaar, 1994). Al seleccionar un tratamiento, es necesario conocer las diferentes formas en las que se encuentra constituido el lodo como residuo.

El contenido de humedad en un lodo tiene diferentes definiciones según varios investigadores:

La distribución de agua presente en el floc de los lodos generados se caracteriza respecto a sus diferentes estados del agua, (Figura 1.4). A continuación, se describe brevemente cada una de ellas; (Perrazo & del Pilar, 2012).

- Agua libre: agua no asociada con partículas sólidas. (fácilmente removible).
- Agua intersticial o capilar: agua ligada mecánicamente, la cual se encuentra presa entre los intersticios de los flocs.
- Agua superficial o vecinal: constituida por múltiples capas de moléculas de agua físicamente ligadas, las cuales se encuentran firmemente en la superficie de la partícula por medio de puentes de hidrógeno.

- Agua químicamente ligada o hidratación: agua químicamente unida a la superficie de las partículas sólidas (flocs).



**Figura 1.4** Distribución del agua en un floc de lodo generado en el tratamiento de agua. Fuente: (Perrazo & del Pilar, 2012)

## 1.8 Tratamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua

El tratamiento de los lodos generados en las plantas potabilizadoras tiene como objetivo eliminar parcial o totalmente el agua que contienen, disminuir su volumen para optimizar su disposición final. Entre los métodos de tratamiento para reducir el volumen de lodos se encuentran los siguientes: espesamiento, acondicionamiento y deshidratación, a continuación, se da una breve descripción de cada uno de estos procesos.

### 1.8.1 Espesamiento

Es un proceso donde el lodo de las plantas de tratamiento de agua potable se sedimenta para producir un material más concentrado y una fracción líquida relativamente libre de partículas. Esta porción líquida es retirada, para ser recirculada al inicio del tratamiento, lo que permite una considerable reducción del volumen. Este aumento de la concentración de sólidos y la reducción del volumen tienen un efecto directo en los procesos subsecuentes (deshidratación) como un mejor funcionamiento, una mayor eficiencia y una reducción del tamaño de las unidades. Existen pocos tipos de espesadores en el mercado, siendo utilizado generalmente un decantador ya sea por gravedad o por flotación, (Fernández Acuña , 2015).

### **1.8.2 Espesamiento por gravedad**

Es un método de separación de estados sólido-líquido empleado para incrementar el contenido de sólidos y reducir el volumen de los lodos sin mayor consumo de energía. Por este proceso se pueden concentrar los lodos provenientes del sedimentador después de ser espesados. (Piña Soberanis & Rivera Huerta, 2013). La concentración de sólidos en el lodo espesado por aluminio o hierro puede alcanzar porcentajes de 3-6%, (Syed, 2000).

### **1.8.3 Espesamiento por flotación**

Este proceso consiste en el arrastre hacia la superficie de las partículas sólidas a través de pequeñas burbujas de aire cuyos diámetros están entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ . Para producir la adherencia de las partículas con la superficie de las burbujas, estas últimas son distribuidas a través de las aguas residuales y la mezcla es presurizada a 6 bares, siendo posteriormente descomprimidas para reducir la densidad efectiva y así ser fácilmente separables, (Fernández Acuña , 2015).

### **1.8.4 Acondicionamiento**

Al espesar los lodos disminuye el porcentaje de agua en el lodo, pero no es suficiente ya que es necesario acondicionarlo para optimizar los porcentajes alcanzando de un 20 a 30 % de sólidos en el lodo, principalmente si están constituidos de minerales, pesados y granulosos, (Syed, 2000). Por ello el proceso de acondicionamiento, contempla una serie de métodos físicos o químicos para modificar las características de las aguas del tratamiento de agua potable y así asegurar la eficiencia de las etapas subsecuentes de deshidratación, (Fernández Acuña , 2015).

El acondicionamiento químico incluye la adición de:

- Químicos inorgánicos como, sulfato de aluminio cloruro férrico, cal, o una combinación de ambos.
- Polímeros (Poliectrolitos).
- Combinación de químicos inorgánicos y polielectrolitos.

**Tabla 1.2** Características de los tipos de coagulantes utilizados para acondicionar el lodo (Hendricks, 2006)

Tipo	Nombre		Formula molecular	Peso molecular (g/mol)	Cantidad de lodo generado por kg de coagulante	Características generales
Inorgánico	Cloruro Férrico		FeCl <sub>3</sub>	162.21	0.66 kg	Efectivo en amplios rangos de pH. genera iones de mayor peso molecular, esenciales para el proceso de coagulación.
	Sulfato de Aluminio		Al(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	342.5	0.26 kg	Efectivo sobre un amplio rango de pH, efectivo en aguas cloradas
Orgánico	Aniónico	Poliacrilamida parcialmente hidrolizada	$\begin{array}{c} \text{---CH}_2\text{---CH---CH}_2\text{---CH---} \\   \qquad \qquad   \\ \text{C=O} \qquad \qquad \text{C=O} \\   \qquad \qquad \qquad   \\ \text{NH}_2 \qquad \qquad \text{O}^- \end{array}$	10 <sup>4</sup> -10 <sup>7</sup>	1kg	Sus grupos ionizados negativamente permiten la adsorción, y aumentan la extensión de las cadenas del polímero.
	Catiónico	Poliaminas	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N) <sub>n</sub>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>7</sup>		Tienen en sus cadenas una carga eléctrica positiva, debida a la presencia de grupos amino, imino y amonio cuaternario.
		Cloruro de Polidialildimetilamonio (PoliDADMAC)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \qquad \text{CH}_3 \\   \qquad \quad   \\ \text{---CH} \qquad \text{---CH---} \\   \qquad \quad   \\ \text{CH}_2 \qquad \quad \text{CH}_2 \\   \qquad \quad   \\ \text{N}^+ \\   \qquad \quad   \\ \text{CH}_3 \qquad \text{CH}_3 \\ \text{Cl}^- \end{array}$	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>		
No iónico	Poliacrilamida		(C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NO) <sub>n</sub>	10 <sup>5</sup> -10 <sup>7</sup>	Sus grupos incrementan la resistencia del floc	

### 1.8.5 Deshidratación

El principal objetivo es incrementar la concentración de sólidos en la torta mediante la remoción de la porción líquida, se pueden utilizar medios naturales o físicos (mecánicos) para reducir el contenido de humedad presente en el lodo. Los costos de transporte del lodo hasta el lugar de su disposición final son notablemente menores cuando se reduce el volumen de agua.

Los métodos de deshidratación mecánica (Tabla 1.3), tienen como objeto la remoción del agua mediante la utilización de dispositivos mecánicos. Hay varios dispositivos mecánicos disponibles, pero básicamente se pueden agrupar en dos principios: la filtración y la centrifugación.

**Tabla 1.3** Métodos de deshidratación mecánica y sus tecnologías, (Syed, 2000)

Deshidratación	Principio	Tecnología	Porcentajes de sólidos en la torta %
Mecánica	Filtración	Filtros prensa	25-35
		Filtros banda	15-20
		Filtros al vacío	25-35
	Centrifugación	Basquet	20-35
		Solid Bowl	

## 1.9 Antecedentes

### 1.9.1 Problemática de los lodos

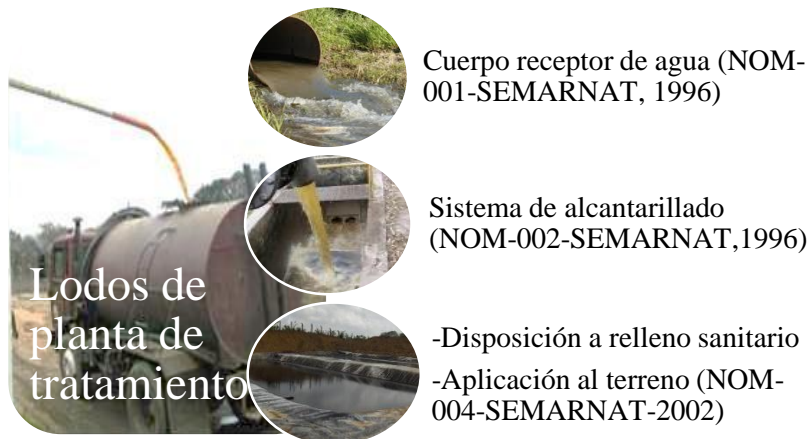
En los últimos años se ha considerado la investigación, tratamiento y disposición de los residuos generados en los procesos de tratamiento de agua para remover arsénico, tanto en estado líquido o sólidos de las plantas de potabilización. Actualmente en las plantas nuevas se prevén instalaciones para su deshidratación, pero no existen suficientes estudios sobre la caracterización de los mismos para reducir y disponer estos residuos de forma segura.

El tratamiento de agua para uso y consumo humano ha dado origen al problema de manejo y disposición de los residuos que se producen durante el tratamiento del agua potable. Los lodos, pueden provenir de la unidad de sedimentación y del proceso de lavado de filtros. El volumen de lodos que se producen es de aproximadamente el 5% del agua tratada, (Fernández Acuña , 2015).

El daño ambiental que provocan las descargas de residuos a cursos de agua, son la formación de depósitos o bancos de sólidos, que obstaculizan el normal escurrimiento del agua. El cauce natural se ve cubierto por estos sólidos, perjudicando el desarrollo de flora y fauna, provocando daños a peces que se alimentan de estos organismos y a su ciclo de reproducción. La solubilidad de algunos metales puede aumentar y ciertos productos químicos utilizados en el tratamiento pueden originar alteraciones en el pH y reducciones en el oxígeno disuelto, estas descargas directas de lodos no son el método más adecuado para el manejo de residuos debido su potencial de contaminación.

Existen alternativas para el tratamiento de lodos. Esto brinda ciertas ventajas tales como un mejor acondicionamiento debido al aporte de coagulante y una mayor capacidad de deshidratación. En la Figura 1.5 se muestran los cauces más comunes en donde se vierten los residuos de las plantas de tratamiento.





**Figura 1.5** Problemática de los principales cuerpos receptores de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable

Generalmente el lodo producido en las plantas de tratamiento de agua potable no se trata y no se dispone. Los métodos de eliminación del As pretenden entregar el agua en condiciones potables para que pueda ser consumida por las poblaciones, por lo que se ha investigado mucho respecto a mejorar y encontrar nuevos métodos de remoción, pero muy poco para tratar el residuo de los procesos de tratamiento.

Se prevé que los lodos generados por las plantas de tratamiento generen impactos sobre la salud y el medio ambiente. Sin embargo, la disposición final de lodos es costosa en todas las plantas, donde no se dispone de alternativas. En general, los lodos se terminan desechando, con la consecuente contaminación. El desafío que se plantea es transformar los residuos en productos de valor atendiendo al mismo tiempo a la minimización del riesgo sanitario y ambiental. Es importante realizar una investigación para contar con respuestas sustentables a ambos problemas de gestión de residuos.

### 1.9.2 Generación de lodos concentrados de arsénico

Existe poca información al respecto, se encontraron algunos artículos como los siguientes:

Los investigadores Michael J. MacPhee, Gail E. Charles y David A. Cornwell, realizaron una revisión exhaustiva de la literatura publicada desde 1991 al 2001, en cuya búsqueda se incluía la base de datos de la American Water Works Association (AWWA), con el fin de buscar artículos que reporten específicamente de las características de los residuos que contienen As y la eliminación del As de los residuos.

Hathaway y Frederick (1987), realizaron un estudio piloto sobre la remoción de As del agua potable

en Fallon, USA, se describió un residuo seco generado por la precipitación de hidróxido de aluminio a partir de alúmina activada agotada regenerada, que fácilmente pasó la prueba de procedimiento de extracción. Clifford y Lin (1991) reportaron 0,6 mgAs/L, en el lixiviado de lodos producidos en un tratamiento similar de alúmina regenerada, realizaron tres grandes estudios de campo y laboratorio, abordando cuestiones claves en torno a la remoción de As por intercambio iónico en los siguientes lugares: Hanford, McFarland California, y Albuquerque, Nuevo México, (Perrazo & del Pilar, 2012).

En 1991 un grupo de investigadores encabezados por el Dr. C. Bartley, realizaron un estudio de caracterización de los residuos en ocho plantas de tratamiento de agua, incluyendo una que removía As. Esta planta tenía dos trenes de tratamiento: uno procesaba agua superficial y otro trataba agua subterránea. Dentro de los pozos de abastecimiento del tren de agua subterránea existía uno cuya agua contenía As. El agua de este pozo era tratada con sulfato férrico, cloración y luego conducida a una cámara de contacto. El efluente de la cámara de contacto se filtraba y luego se combinaba con el efluente filtrado del tren de tratamiento del agua superficial. Los sólidos separados en la cámara de contacto y el agua de lavado de los filtros se enviaban a un tanque de almacenamiento, (Perrazo & del Pilar, 2012). Los niveles de As medidos en muestras compuestas de sólidos provenientes de la cámara de contacto, recogidas durante un período de seis meses, dieron un promedio de 5880 mgAs/kg en lodo, mientras que los niveles de As en el Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) llegaron a un promedio de sólo 0,016 mgAs/L. (Perrazo & del Pilar, 2012).

En 1999, en una investigación encabezada por el Dr. J. Chwirka, se recogieron muestras de residuos generados por varios tipos de tecnologías de remoción de As. Los valores de concentraciones de As oscilaron entre 0,098 mg/L lodo para las tecnologías de membranas, hasta aproximadamente 10 mg/L lodo para alúmina activada e intercambio iónico. En peso seco, las concentraciones teóricas de As variaron de 165 a más de 14000 mg/kg.

En el año 2000, se realizaron estudios sobre el As en los residuos de las plantas de remoción de As en el agua. Grupo encabezado por la Dra. Lili Wang y analizaron los residuos obtenidos de alúmina activada agotada. Los resultados de su investigación en el lixiviado de TCLP para As fueron valores que iban entre 0,05 mg/L y 0,066 mg/L. (Perrazo & del Pilar, 2012).

Estudios realizados en el año (2000) por el Dr. Keith Fields y colaboradores evaluaron los residuos resultantes de varias plantas de tratamiento, que trabajaban con tres tipos de procesos diferentes. El primer tipo fue en una instalación de eliminación del As por hierro, donde los niveles de As en el

TCLP fueron inferiores a 0,05 mg/L. El segundo tipo fue una planta de remoción de As por coagulación/filtración. se tomaron más de 30 muestras de residuos recolectados de las lagunas de deshidratación en dos plantas de remoción de As por esta técnica, donde las concentraciones de As en el TCLP fueron de 0,30 mg/L. (Perrazo & del Pilar, 2012).

Consultores en Bangladesh, utilizaron el TCLP para analizar los residuos de diferentes tipos de filtros de eliminación tradicional, con el fin de determinar si los métodos de eliminación de lodos eran correctos y si el As podía volver a contaminar el medio ambiente. En el TCLP, se detectaron concentraciones despreciables de As en el líquido de extracción, por ejemplo 0,001 mg/L y se concluyó que ninguna muestra era peligrosa. (Perrazo & del Pilar, 2012).

En la Tabla 1.4 se muestran los residuos generados en los procesos de remoción de arsénico.

**Tabla 1.4** Residuos generados en las tecnologías de remoción de As (Adaptada por Garrido, 2015 de Amy *et al.*, 1999)

Tecnología	Porcentaje de remoción de arsénico del agua (%)	Tipo de residuo producido	Volumen residual producido (L/m <sup>3</sup> )	Concentración de arsénico en el residuo (mg/L)	Cantidad de sólido producido (kg/m <sup>3</sup> )	Concentración de arsénico (mg/kg)
Coagulación /Filtración	As(V): >80 As(III): >20-80	Lodo	4.3	9.25*	21.59	1850
Coagulación, Fe(III) y microfiltración	As(V): >95	Lodo	52.6	0.76	13.50	2957
Ablandamiento	As(V): >90	Lodo	9.6	4.2	239.89	165
Intercambio iónico	As(V): >85	Líquido	4.0	10	0.623	64000
Alúmina activada	As(V): >95	Líquido	4.2	9.52	2.8	14250
Adsorción, óxidos de hierro	As(V): >99 As(III): >80	Lodo	21	1.9	2.8	14250
Nanofiltración	As(V): >90	Líquido	200-300**	0.098	No aplica	No aplica
Osmosis inversa	As(V): >95 As(III): >70	Líquido	200-300**	0.098	No aplica	No aplica

\*Se asume que se remueven 40 mg/L de arsénico en el tratamiento; \*\*Estimado

### 1.9.3 Residuos generados por Coagulación- Floculación

De acuerdo a las investigaciones realizadas anteriormente, resulta de particular interés para este trabajo las tecnologías de remoción que utilizan mecanismos basados en los principios de coagulación-floculación. La adsorción del arsénico se realiza sobre complejos de hierro donde se

produce el intercambio de ligandos de las especies del arsénico por  $\text{OH}_2$  y  $\text{OH}^-$  en los sitios de coordinación de la superficie estructural de los átomos de hierro.

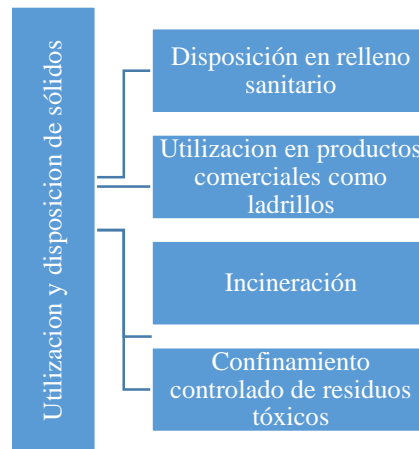
La cantidad de estos residuos sólidos/líquidos generados a partir de plantas de tratamiento de agua depende de la calidad del agua cruda, la dosificación de productos químicos utilizados, el rendimiento del proceso de tratamiento, el método de eliminación de lodos, la eficiencia de la sedimentación y la frecuencia de retrolavado. En trabajos realizados a nivel piloto por (Garrido, *et al.*, 2013), con un tren de tratamiento coagulación-filtración directa con arena sílica, dosificando Fe(III) de 6 mg/L, el volumen de agua de lavado a contracorriente dependió directamente de la tasa de filtración, y de la concentración final de arsénico que cumpla la norma mexicana de 0.025 mg/L, para tasas de filtración de 4, 7, 10  $\text{m}^3/\text{d m}^2$ , el volumen de agua de lavado fue de 3.8, 4.0 y 5.5% respectivamente para un tiempo de lavado de 5 min, por lo que trabajar a menores tasas representa un menor volumen de producción de residuos que contienen altas concentraciones de arsénico.

Otros estudios realizados en la planta de potabilización convencional con un caudal de 25 L/s en Mixco, Guatemala (Garrido, *et al.*, 2013), la cual está conformada por los procesos de preoxidación con hipoclorito de sodio (NaOCl), coagulación con cloruro férrico relación Fe(III)/As(V) fue de 1:46, floculación polímero catiónico (Poliflocal-CH y MIT03) dosis entre 1.0 a 1.8 mg/L, sedimentación de alta tasa carga superficial entre 72 a 150  $\text{m}^3/\text{d m}^2$  y tiempo de 2.12 min, filtración a presión dos tipo de medios (cerámico y clinoptilolita) tasa de filtración 23.59  $\text{m}^3/\text{h m}^2$ , tasa de retrolavado 18.95-16.42  $\text{m}^3/\text{h m}^2$  por un tiempo de 22 min, que representa un volumen de agua de lavado del 2.23% y 2.57% respectivamente del volumen total tratada, desinfección con NaOCl, 2 mg/L. Se obtuvieron remociones de 96.80% con clinoptilolita, proceso de adsorción-coprecipitación, con una concentración final de arsénico de 0,005 mg/L. Por otro lado, se encontró que el arsénico presente en el lixiviado de los lodos producidos en la purga del sedimentador (purga de lodos 17.24  $\text{m}^3/\text{d}$ ) y agua de lavado de los filtros fue de 6.6 a 15.6 mg/L, siendo un valor de 660 a 15600 veces mayor que el recomendado por la EPA en la prueba de lixiviación de compuestos tóxicos (TCLP) en que el nivel máximo permisible es de 100 veces mayor que la concentración máxima permisible para agua potable, según la norma de Guatemala es de 0.010 mg/L de arsénico. La EPA considera que lixiviados de los lodos que contengan concentraciones de arsénico mayores a 5 mg/L, son peligrosos y requieren eliminación en un vertedor especial de residuos tóxicos, (Garrido, *et al.*, 2013).

#### **1.9.4 Concentración y disposición final de los sólidos.**

La disposición final de los sólidos es una tarea difícil para las grandes plantas de tratamiento de agua

potable, pues los espacios de disposición son cada vez más reducidos, lejanos y costosos. El desarrollo de un plan integral de disposición y utilización de los sólidos, permite aprovechar el potencial económico de este material y contribuir a la protección del medio ambiente, en la Figura 1-6 se presentan algunas alternativas de disposición y aplicación de estos sólidos, (Fernández Acuña , 2015).

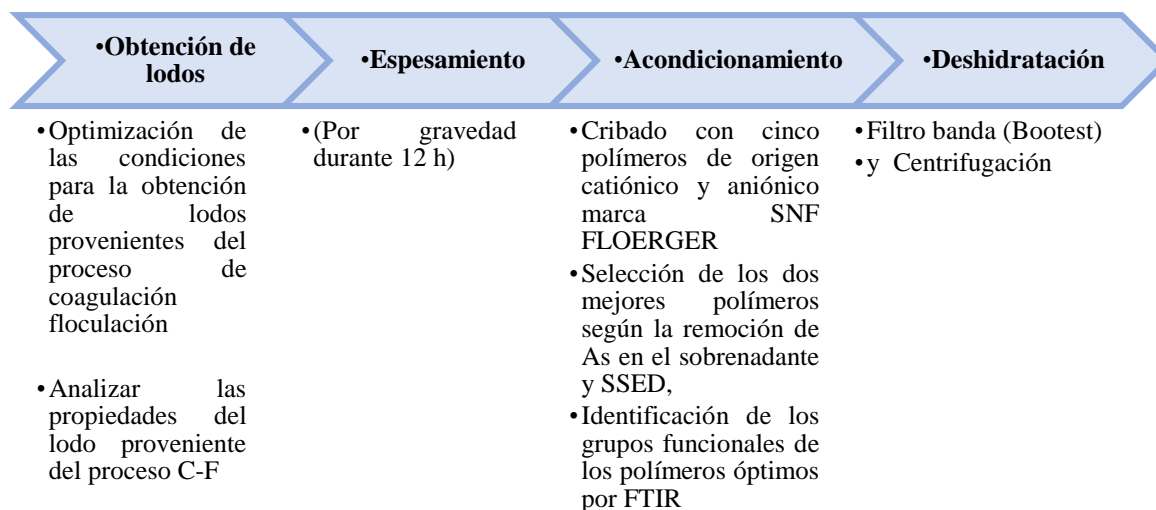


**Figura 1.6** Alternativas de disposición y aplicación de estos sólidos, (Fernández Acuña , 2015)

## CAPÍTULO 2

### 2 METODOLOGÍA

Se optimizaron los procesos de acondicionamiento y deshidratación de los residuos generados en la coagulación-floculación (C-F) de agua que contienen arsénico se realizó de la siguiente manera:



**Figura 2.1** Etapas de la metodología para el desarrollo experimental

#### 2.1 Proceso de obtención de los lodos con arsénico

##### 2.1.1 Optimización de las condiciones para la obtención de lodos provenientes del proceso de coagulación floculación

En primer lugar, se optimizaron las condiciones para la obtención de lodos provenientes del proceso de coagulación floculación en la remoción de arsénico de agua para consumo humano a partir de tres concentraciones iniciales de arsénico 0.050 mg/L, 0.100 mg/L y 0.150 mg/L. Se adicionó arsenato de sodio a la muestra de agua tomada del pozo, ubicado en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), y para esta etapa de remoción de As se eligió el polímero C496HMW con  $\text{FeCl}_3$  como coagulante, (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1** Especificaciones del coagulante y polímero seleccionado para la obtención del lodo

Productor	Nombre codificado	Sustancia activa	Peso molecular	Carácter iónico	Número CAS
KEMIRA	C- 496 HMW	Poliacrilamida	Alto	Catiónica	124-04-9
Cloruro férrico	FeCl <sub>3</sub>	FeCl <sub>3</sub>	270,195 g/mol		7705-08-0

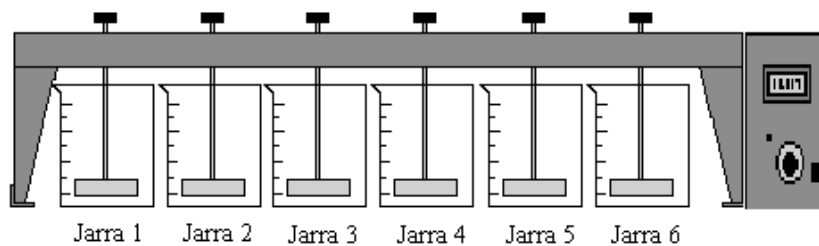
Las variables consideradas para realizar el diseño experimental se establecieron por estudios realizados por Garrido (2013): Dosificación de coagulante (FeCl<sub>3</sub>: relaciones de Fe(III)<sub>dosificado</sub>/As(V)<sub>removido</sub>: 1:20, 1:30, 1:40; Polímero catiónico: C49HMW (Anexo B-8): 0.5, 1.0 y 1.5 mg/L, pHs: 6.5, 7.0 y 7.5, (Tabla 2.2), gradientes de velocidad en la Mezcla rápida: 300 s<sup>-1</sup>; 5 s; Mezcla lenta: 60 s<sup>-1</sup>; 5 min; 30 s<sup>-1</sup>; 5 min; 17 s<sup>-1</sup>; 5 min y 10 s<sup>-1</sup>; 5 min. (Tabla 2.3). El equipo utilizado fue prueba de Jarras marca Phipps & Bird (Figura 2.2), con un intervalo de operación de 0-300 rpm, el cual está compuesto por seis jarras de 2 L de capacidad cada una. El diseño experimental (Statgraphics versión XVII) utilizado fue Central Compuesto: N = 2<sup>3</sup>; y como variables de respuesta: Sólidos Sedimentables (SSED) y concentración de As mg/L en el sobrenadante, (Tabla 2.4).

**Tabla 2.2** Factores de estudio en los procesos de coagulación-floculación

Factores		Niveles Codificados		
		+1	-1	0
		Niveles Reales		
1	pH	7.5	6.5	7.0
2	Coagulante FeCl <sub>3</sub> (mg/L)	40	20	30
3	Polímero C496HMW(mg/L)	1.5	0.5	1.0

**Tabla 2.3** Variables utilizadas para el gradiente de velocidad

Proceso	Agitación (rpm)	Tiempo	Gradiente (s <sup>-1</sup> )
Mezcla rápida	300	5 s	380
Mezcla lenta	65	5 min	60
	30	5 min	25
	17	5 min	12
	10	5 min	10
Sedimentación	0	20 min	0



**Figura 2.2** Equipo utilizado para la prueba de coagulación-floculación, (Jarras marca Phipps & Bird)

**Tabla 2.4** Factores de estudio en coagulación-floculación con diseño experimental matriz de 18 ensayos

Niveles reales			
Número de ensayo	pH	Dosis de coagulante, mg/L	Dosis del polímero, mg/L
1	7.5	20	1.5
2	7.5	20	0.5
3	6.5	40	0.5
4	7	30	1
5	7	30	0.16
6	7.84	30	1
7	6.16	30	1
8	7.5	40	1.5
9	7	30	1
10	7	13.18	1
11	7	30	1
12	7.5	40	0.5
13	6.5	20	1.5
14	7	30	1.84
15	6.5	20	0.5
16	7	30	1
17	6.5	40	1.5
18	7	46.82	1



### 2.1.2 Análisis de las propiedades del lodo proveniente del proceso Coagulación-Floculación.

Posteriormente se realizó el análisis de las características y propiedades físicas y químicas del lodo proveniente de los procesos coagulación-floculación. Como propiedades físicas: Humedad del lodo ( $c_i$ ), Humedad de la torta ( $c_t$ ), Sólidos en la torta húmeda, Sólidos en la torta seca, Resistencia específica a la filtración (REF), Tiempo de filtración (tF), Compresibilidad, Sólidos totales, Sólidos sedimentables, densidad, Índice de Willcomb y Potencial Z. Propiedades Químicas: Distribución de la humedad, Arsénico, Hierro, y pH, (Tabla 2.10 Tabla 2.11).

### 2.2 Proceso de Espesamiento

Para la producción de mayor volumen de lodo para el espesamiento se diseñó y construyó un reactor para la producción de lodo de mayor volumen (200L), con un motor trifásico marca ABB, conectado a un variador de frecuencia marca Schneider, este último se convirtió a conector bifásico, este equipo fue diseñado con tubería de desagüe y llave de paso para una mejor manipulación del lodo con arsénico, (Figura 2.3).

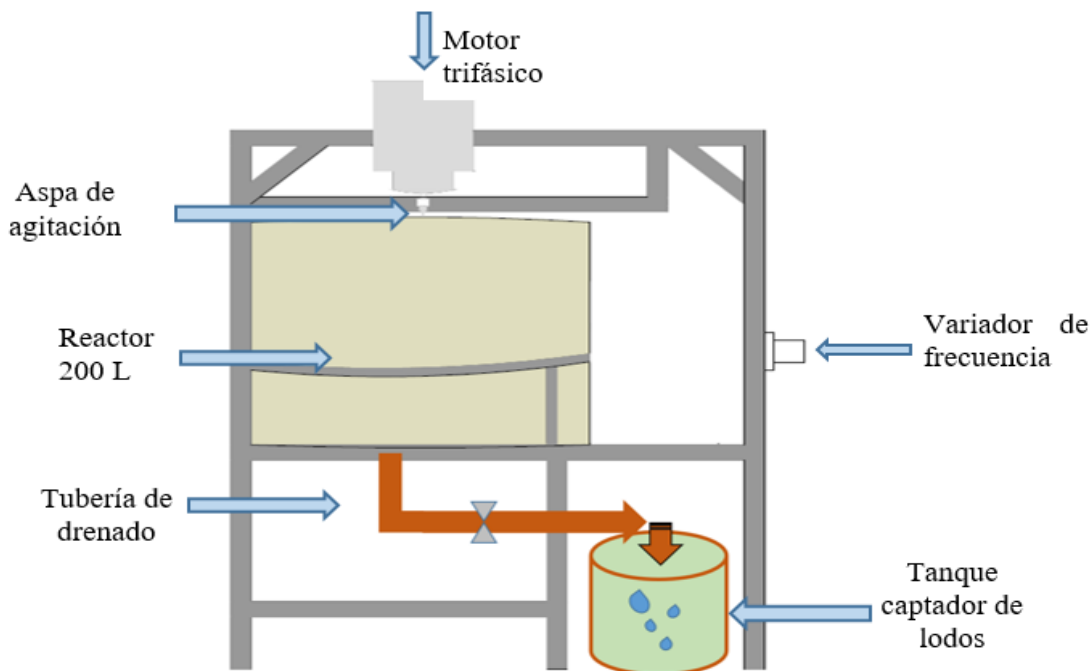
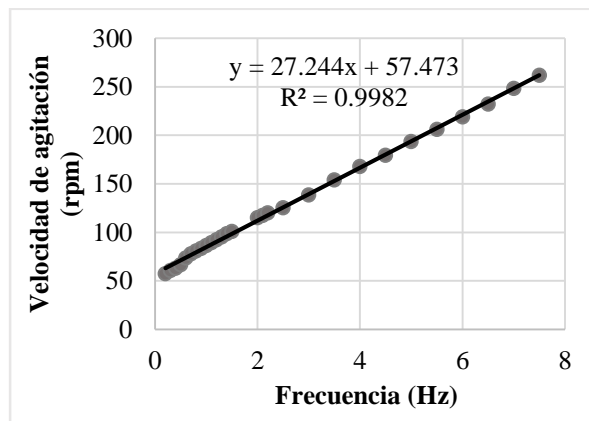


Figura 2.3 Reactor para producción de lodo con arsénico y para el proceso de espesamiento

Para realizar las pruebas de producción de lodo con arsénico fue necesario la calibración del equipo de agitación para el proceso de coagulación-floculación, esta calibración nos permitió conocer las velocidades de trabajo en rpm. Las lecturas de velocidad se realizaron con la ayuda de un tacómetro y fueron de una potencia de 0.2 a 9 Hertz, los resultados obtenidos se muestran en la (Tabla 2.5) estos datos se graficaron para conocer su coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que permite conocer la estimación lineal (Figura 2.4).

**Tabla 2.5** Medición de velocidad en (Hz) para obtener las (rpm)

Potencia (Hz)	Agitación (rpm)	Potencia (Hz)	Agitación (rpm)
0.2	57.4	2	114.9
0.3	60.7	2.1	117.4
0.4	63	2.2	120
0.5	66.4	2.5	125.3
0.6	73.6	3	138.3
0.7	77.8	3.5	154.1
0.8	80.7	4	167.8
0.9	83.4	4.5	179.4
1	86.4	5	193.5
1.1	89.3	5.5	206.2
1.2	92.1	6	218.8
1.3	95.3	6.5	232.2
1.4	98.5	7	248.3
1.5	100.8	7.5	261.9
1.6	104.4	8	275
1.7	106.6	8.5	288.8
1.8	109.2	8.9	299.6
1.9	112.2	9	302.6



**Figura 2.4** Datos en la calibración del equipo de coagulación floculación

El proceso de espesamiento se realizó por gravedad durante 12 horas para sedimentar y posteriormente drenar los lodos con arsénico espesados, fue necesario conocer la concentración constante de arsénico en el sobrenadante. En este equipo se produjo lodo bajo las condiciones óptimas de la anterior etapa de obtención de lodo.

## 2.3 Proceso de Acondicionamiento

### 2.3.1 Selección de polímeros para el proceso de acondicionamiento

Para el acondicionamiento químico de los lodos obtenidos del proceso de espesamiento por gravedad durante (12 h), se realizó un cribado para una adecuada selección) con cinco polímeros de origen catiónico y aniónico (Tabla 2.6), (Bufloc 5426, Bufloc 5240, Bufloc 5631, Fo4490UHM, Fo465055H), para seleccionar los dos mejores polímeros según las variables de respuesta: Concentración final de As en el sobrenadante y SSED de los lodos producidos. La identificación de grupos funcionales por espectrofotometría de infrarrojo se muestra en el Anexo B-9 y B-10.

**Tabla 2.6** Características de los polímeros utilizados en la prueba de cribado

Productor	Nombre Codificado	Propiedades	Peso Molecular	Carácter iónico
Buckman	Bufloc 5426	Poliacrilamida	Mediano	Catiónico
Buckman	Bufloc 5290	Poliacrilamida	Mediano	Aniónico
Buckman	Bufloc 5631	Poliacrilamida	Mediano	Aniónico
SNF FLOERGER	Fo 4490 VHM	Poliacrilamida	Muy alto	Catiónico
SNF FLOERGER	Fo 4650 SSH	Poliacrilamida	Alto	Catiónico

### 2.3.2 Optimización de las condiciones de estudio para el proceso de acondicionamiento

Posteriormente, con los dos polímeros seleccionados se realizó un diseño experimental central compuesto  $N=2^3$ , para optimizar las variables de estudio: pHs de 6.5, 7.0 y 7.5); y una dosificación del polímero 1 y polímero 2 de 150, 200 y 250 mg/L. (Tabla 2.7), con una agitación de mezcla rápida de 100 rpm con un gradiente de velocidad de  $90 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ , durante 5 s, una mezcla lenta de 30 rpm con un gradiente de velocidad de  $25 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  durante 1, 2 y 3 min y una sedimentación a 0 rpm, durante 10 min. Estas condiciones experimentales se determinaron bajo estudios realizados por (Piña & Huerta, 2013).

**Tabla 2.7** Condiciones de estudio en los procesos de acondicionamiento

Factores		Niveles Codificados		
		+1	-1	0
		Niveles reales		
1	Polímero, mg/L	250	150	200
2	pH	7.5	6.5	7.0
3	Tiempo (min)	3	1	2

Posteriormente se realizó una segunda matriz con las siguientes variables de respuesta: concentración final de As en el sobrenadante y SSED de los lodos producidos. Esta matriz experimental tuvo un número total de ensayos de 18, con diferentes interacciones, propuestas por el diseño central compuesto, (Tabla 2.8).

**Tabla 2.8** Matriz experimental de estudio en el acondicionamiento con diseño de 18 ensayos

Número de ensayo	Dosis polímero (mg/L)	pH	Tiempo (min)
1	250	6.0	1.0
2	150	6.0	3.0
3	250	7.0	3.0
4	150	7.0	3.0
5	250	7.0	1.0
6	116	6.5	2.0
7	200	5.7	2.0
8	150	6.0	1.0
9	284	6.5	2.0
10	250	6.0	3.0
11	200	6.5	2.0
12	150	7.0	1.0
13	200	7.3	2.0
14	200	6.5	2.0
15	200	6.5	0.3
16	200	6.5	2.0
17	200	6.5	2.0
18	200	6.5	3.7

## 2.4 Proceso de deshidratación

### 2.4.1 Filtro banda

La deshidratación del lodo acondicionado se llevó a cabo un equipo de filtro banda (Bootest) que tiene como objetivo identificar características primordiales en el lodo, optimizando el proceso de Floculación, permitiendo la adecuada elección de productos químicos, velocidades de mezclado y tiempos de contacto, dando como resultado la optimización del proceso de tratamiento de lodos floculados, (Figura 2.5). Este equipo cuenta con dos celdas, las cuales tienen la función de realizar el proceso de coagulación floculación. Estas celdas tienen un volumen máximo de 1.35 L, el ensayo se realizó a temperatura ambiente, cuenta con un agitador con velocidad de agitación; de 0-1700 rpm, el peso máximo de la balanza es de 3 kg, cuenta con un tablero donde se manipula la velocidad de agitación y está conectado al programa que realiza la curva de desaguado después de pasar por la malla. En esta malla se quedan retenidos los sólidos en torta, a ésta se le realizaron sólidos totales, y al líquido que atraviesa esta malla se le realizaron sólidos suspendidos totales.

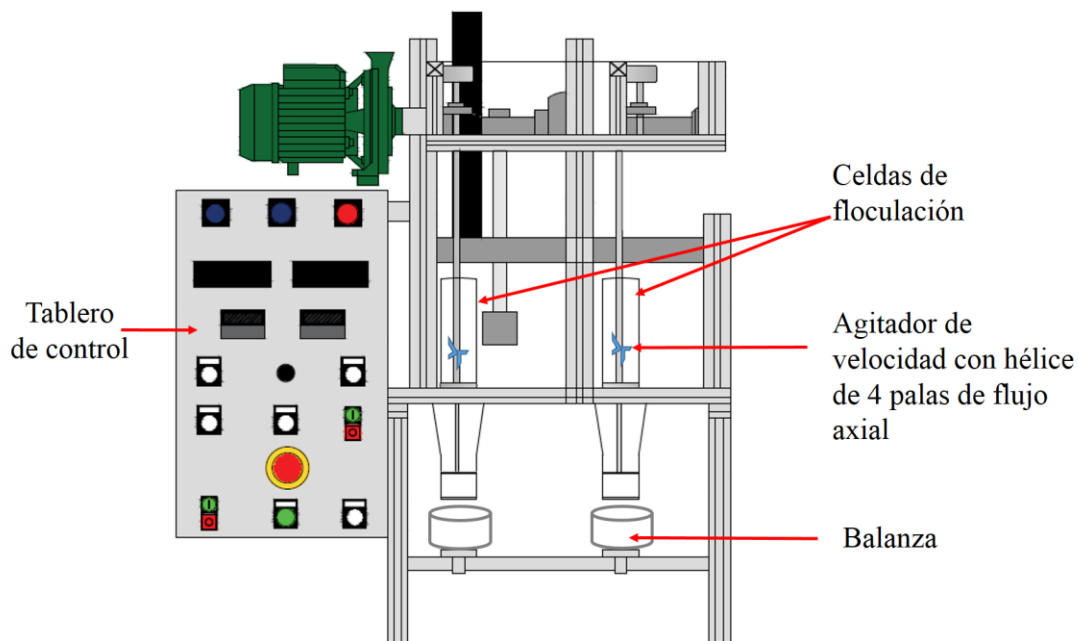


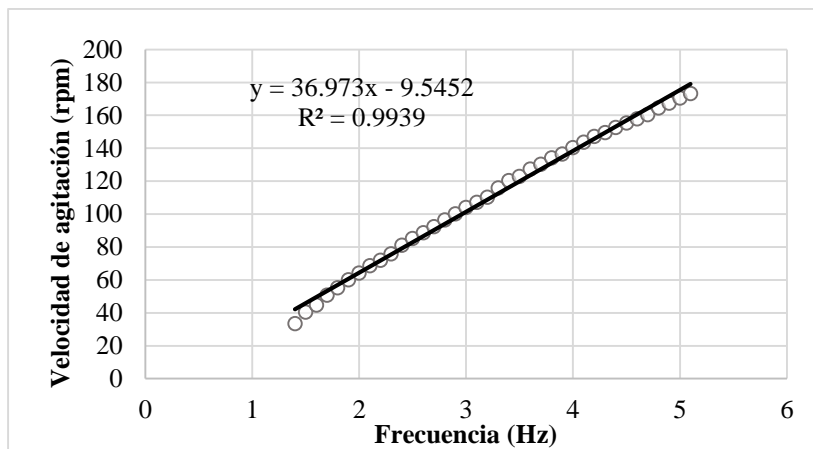
Figura 2.5 Dispositivo filtro banda (Bootest)

Es necesario seleccionar el modo de operación del equipo (manual o automático). Para el modo manual, la manipulación se lleva a cabo con las manijas y el potenciómetro.

Para utilizar modo automático es importante realizar la calibración, para ello es necesario una gráfica comparativa velocidad de agitación y frecuencia. Las lecturas de velocidad se realizaron con la ayuda de un tacómetro comenzando con una frecuencia de 1.4 hasta 5.1 Hertz, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.9 y Figura 2.6.

**Tabla 2.9** Curva de calibración del equipo de filtro banda

Frecuencia (Hz)	Velocidad de agitación (rpm)		Promedio de tacómetro (rpm)	Frecuencia (Hz)	Velocidad de agitación (rpm)		Promedio de tacómetro (rpm)
	Lectura 1	Lectura 2			Lectura 1	Lectura 2	
1.4	33.5	33.5	33.5	3.3	115.5	116.5	116
1.5	40.5	40.5	40.5	3.4	120.5	120.5	120.5
1.6	45	44.5	44.75	3.5	123	123	123
1.7	51	50.5	50.75	3.6	127.5	127.5	127.5
1.8	55.5	55	55.25	3.7	130.5	130	130.25
1.9	60.5	60	60.25	3.8	134.5	134	134.25
2	64	64.5	64.25	3.9	136.5	136.5	136.5
2.1	69	68.5	68.75	4	141	140	140.5
2.2	72	72	72	4.1	144	143.5	143.75
2.3	76	76	76	4.2	147.5	147	147.25
2.4	80.5	82	81.25	4.3	149.5	149.5	149.5
2.5	85	85.5	85.25	4.4	153	152.5	152.75
2.6	89	88.5	88.75	4.5	155.5	155.5	155.5
2.7	92.5	92.5	92.5	4.6	158.5	157.5	158
2.8	96.5	96.5	96.5	4.7	160.5	160.5	160.5
2.9	100.5	100	100.25	4.8	164.5	164.5	164.5
3	104.5	103.5	104	4.9	167.5	167.5	167.5
3.1	107	107.5	107.25	5	170.5	170.5	170.5
3.2	110	110.5	110.25	5.1	173	173.5	173.25



**Figura 2.6** Gráfico representativo de la calibración y su coeficiente de determinación estadístico

Al iniciar la prueba de desaguado, se determinó el volumen de muestra el cual fue de 500 mL, la concentración de polímero (280 mg/L), la altura del agitador (14.28 mm), se configuraron las velocidades y el tiempo de agitación determinadas como óptimas, se preparó el software para la captura de propiedades para posteriormente el análisis de datos.

### 2.5 Proceso de centrifugación

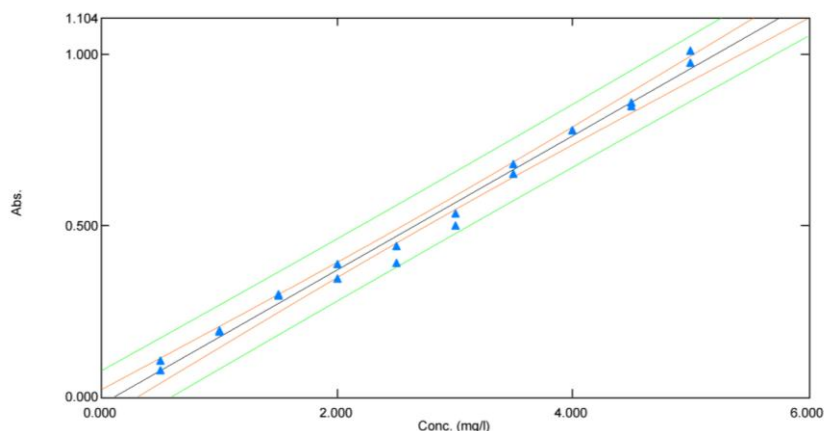
Posteriormente se realizaron pruebas de deshidratación con centrífuga, se colocaron tubos de 25 mL con muestras del lodo obtenido en la etapa de acondicionamiento para los dos mejores polímeros seleccionados; la centrífuga utilizada fue marca (International Equipment Company), modelo (IEC HN-SI), giro a una velocidad de 3000 rpm durante 4 min, posteriormente se le realizaron sólidos totales, las pruebas de centrifugación se realizaron con lodo óptimo después del acondicionamiento.

### 2.6 Técnicas analíticas

A continuación, se describen las técnicas analíticas utilizadas, para obtener las características y propiedades de los lodos en estudio.

**Tabla 2.10** Técnicas analíticas para determinar las propiedades químicas del lodo con As

Propiedades Químicas			
Parámetro	Definición	Determinación o Técnica	Materiales y/o equipos
pH	-	NMX AA-008-SCFI-2011	Potenciómetro marca ORION, modelo 420 <sup>a</sup>
Arsénico	Concentración de arsénico presente en los lodos	NOM-117-SSA1-1994/ 6010C-2007 EPA	Arsenator (medidor digital) rango: 2-100 ppb, resultados en 40 min. Marca S/M, modelo WAGTECH,
Hierro	Concentración de hierro presente en los lodos	NOM-117-SSA1-1994/ 6010C-2007 EPA	Espectrofotómetro infrarrojo marca SHIMADZU, modelo IRAFFINITY. Curva de calibración (Figura 2-7)
Humedad	Porcentaje de agua contenida en los lodos	Secado de muestra a 60°C por dos horas	Balanza térmica para humedad marca OHAUS, modelo MB200. Platinos de aluminio
		NMX-AA-016-1984	

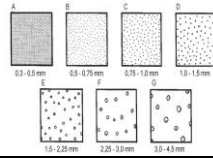


**Figura 2.7** Curva de la solución estándar de hierro con un coeficiente de correlación  $R^2=0.987$

**Tabla 2.11** Técnicas analíticas para determinar las propiedades físicas de lodo con As

Propiedades Físicas			
Parámetro	Definición	Determinación o Técnica	Materiales y/o equipos
Sólidos totales	Contenido total de sólidos en lodos	Norma Mexicana NMX-AA-034 Secado de muestra a 103-105°	C Balanza analítica; marca OHAUS, modelo GA200. Estufa; marca FELISA, modelo



Propiedades Físicas			
Parámetro	Definición	Determinación o Técnica	Materiales y/o equipos
			FE-145, cápsulas de porcelana.
Sólidos suspendidos (SST)	Materia en suspensión que existe en el líquido y que se retiene en un filtro de fibra de vidrio 1.58 µm.	Norma Mexicana NMX-AA-034 Secado de muestra remanente en el filtro a 103 - 105 °C	Balanza analítica; marca OHAUS, modelo GA200. Estufa; marca FELISA, modelo FE-145, crisoles.
Sólidos sedimentables	Contenido total de sólidos en lodos. Sólidos que sedimentan fácilmente por gravedad y se expresan en mL/L	Norma Mexicana NMX-AA-004	Se determina en un cono Imhoff durante 15 min se remueve, y después de 45 min se registra el volumen
Densidad	$Densidad = \frac{Masa}{Volumen}$	Standard test methods for density D792 ASTM, ISO 1183	Picnómetro, Balanza analítica; marca OHAUS, modelo GA200. Estufa de baja temperatura; marca FELISA, modelo FE-145
Índice de Willcomb	Características del floculo, a través del índice de Willcomb	Comparador para estimar el tamaño del floculo producido en la coagulación (según WRA)	Comparador de WRA para evaluar el tamaño del floculo 
Potencial Z	Análisis de la distribución de tamaño de partícula y potencial Z, incorporado los accesorios y medición y submicromicas.	Es una técnica usada para medir el movimiento de las partículas cargadas bajo un campo eléctrico que utiliza el efecto Doppler	Equipo utilizado fue marca MICROTRAC, MODELO PMX500

### 2.6.1 Técnica de Resistencia específica a la filtración (REF)

Esta prueba consiste en la filtración de un volumen (V) dado de lodo bajo una presión de vacío (P) hasta que la torta es formada, posteriormente se quiebra esta torta, como resultado de una caída de presión ( $\Delta P$ ), esto se realiza en un aparato conformado por un embudo Büchner de 9 cm de diámetro, papel filtro de celulosa (Whatman núm. 1) con retención de 8 mm (tamaño de poro), una probeta de 250 mL con salida kitasato, debidamente graduado, una trampa de vacío, mangueras, cronómetro y una bomba de vacío, la cual se pueda ajustar la presión.

En primer lugar, se determinan los sólidos totales (ST), que se encuentran en la muestra inicial y en segundo lugar, se determina el porcentaje de humedad del lodo ( $c_i$ ) con la ecuación 2-1:

$$\% \text{ de humedad } (c_i) = \left[ \left( \frac{1000 - ST}{1000} \right) \right] * 100 \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Posteriormente se instala el equipo como lo muestra la Figura 2.8 se pesa el papel filtro para colocarse dentro del embudo, este se debe de humedecer, después se ajusta la presión de la bomba de 400 a 520 mm de columna de mercurio, se aplica una presión de vacío y se vacía sobre éste un volumen de 100 ml de lodo, al vaciar se registra el tiempo con un cronómetro, el filtrado es colectado dentro de la probeta donde el volumen filtrado es registrado como una función del tiempo (t), los datos obtenidos de la prueba se grafican como  $t/V$  versus  $V$ , al graficar se obtendrá el valor de la pendiente (b), después se determina el porcentaje de humedad en la torta ( $c_f$ ) como se muestra en la ecuación 2-2, con estos datos se realiza la ecuación 2-3 para obtener el parámetro C y a partir de esta ecuación calcular resistencia específica a la filtración (r) con la ecuación 1-3. El tiempo requerido para alcanzar el rompimiento de la torta es frecuentemente tomado como una medida de la filtrabilidad del lodo.

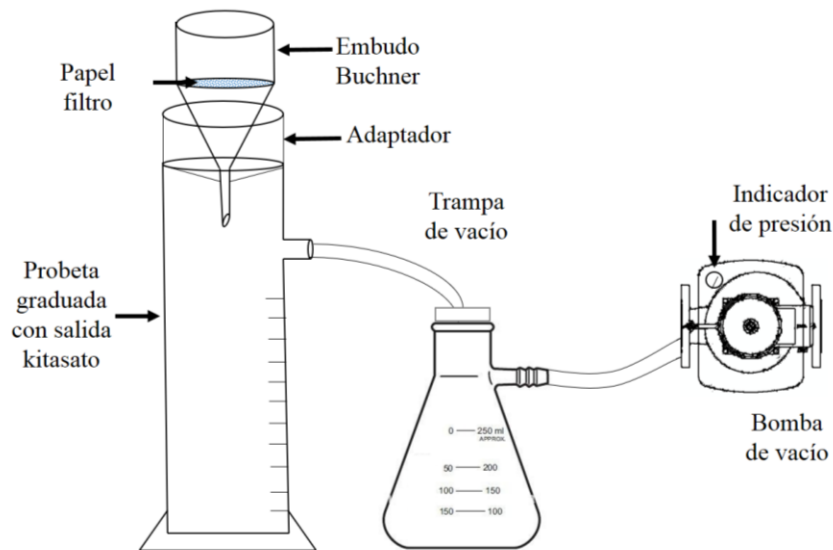


Figura 2.8 Dispositivo para determinar la REF (Cornwell, *et al.*, 1987)

$$\% \text{ de humedad en la torta } (c_f) = \left[ \left( \frac{STH - STS}{STH} \right) \right] * 100 \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Donde:

STH=sólidos en la torta humedad (g)

STS=sólidos en la torta seca (g)

$$C = \frac{1}{\frac{C_i}{100 - C_i} - \frac{C_f}{100 - C_f}} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

### 2.6.2 Tiempo a la filtración (tF)

Esta prueba consiste en colocar una muestra de lodo en un embudo Büchner con un papel filtro Whatman núm. 1, como soporte, aplicando vacío y midiendo el tiempo requerido para reducir el volumen de la muestra inicial.

### 2.6.3 Compresibilidad

Consiste en medir la resistencia específica a la filtración ( $r$ ) a diferentes presiones ( $P$ ) 420, 460 y 520 mm de columna de mercurio, comparar y obtener una deshidratación de la torta de lodos. Al modificar la presión se produce una diferencia en esta prueba.

### 2.6.4 Porcentaje de humedad

Para esta prueba se utilizó, Balanza de humedad, Marca OHAUS, con un intervalo de temperatura: 35 a 205°C, una variación de temperatura:  $\pm 1^\circ\text{C}$  Rango de tiempo: 0 a 180 minutos Capacidad: 200 g.

En primer lugar, se coloca el platillo de aluminio dentro de la balanza al mismo tiempo de tarar a cero gramos. Posteriormente se vierten al platillo una muestra de lodo (20 g). Después la muestra se seca a una temperatura constante (103 a 105°C) durante 180 min, se registra el peso del lodo a intervalos de 5 minutos hasta evaporar toda el agua, y se detiene la medición de materia seca cuando no hay pérdida de masa. Posteriormente se calcula el porcentaje de humedad con la ecuación 2-4:

$$\text{Porcentaje de humedad} = \left( P_i - \frac{P_t}{P_i} \right) 100 \quad \text{Ecuación 2-4}$$

Dónde:

$P_i$  = Peso inicial de la muestra de lodo (g)

Pt = Peso del lodo a cada intervalo de tiempo (g)

## 2.7 Diseño experimental

### 2.7.1 Selección de intervalos de valores para las propiedades analizadas

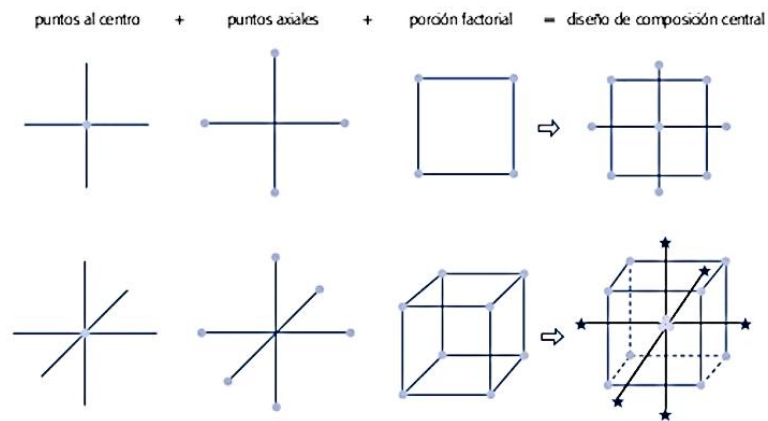
Las pruebas de coagulación floculación de agua con arsénico se establecieron por estudios previos por Garrido (2013), es decir dosificación de coagulante ( $\text{FeCl}_3$ ): relaciones de  $\text{Fe(III)}_{\text{dosificado}}/\text{As(V)}_{\text{removido}}$ : 1:20, 1:30, 1:40; Polímero catiónico: C49HMW: 0.5, 1.0 y 1.5 mg/L, pHs: 6.5, 7.0 y 7.5, y gradientes de velocidad de igual manera la concentración de arsénico, de 0.050 a 0.150 mg/L, debido a que estas concentraciones son las que se han reportado en los últimos años en municipios del estado de Morelos.

### 2.7.2 Diseño experimental

El diseño experimental que se utilizó para las pruebas de coagulación floculación de agua con arsénico fue el Diseño Central Compuesto (DCC), es el más utilizado en la búsqueda de segundo orden debido a su gran flexibilidad: se puede construir a partir de un diseño factorial completo  $2^k$ - $p$  agregando puntos sobre los ejes y al centro. Este diseño se compone de tres tipos de puntos:

1. Una réplica de un diseño factorial en dos niveles, completo o fraccionado. A esta parte de DCC se le llama porción factorial.
2. En  $n_0$  puntos o repeticiones al centro del diseño, con  $n_0 \geq 1$ .
3. Dos puntos sobre cada eje a una distancia  $\alpha$  del origen. Estos puntos se llaman porción axial o estrella. La manera en que se ensamblan y el DCC resultante se muestra en la figura para casos de dos o tres factores.

Es debido a lo anterior, que se eligen dos valores para cada factor, que representan los niveles 1 y -1 (que conforman el diseño factorial), y tres valores restantes que corresponden al punto central y al diseño tipo estrella ( $+\alpha$  y  $-\alpha$ ). Los factores utilizados fueron 3 para ambas etapas de optimización.



**Figura 2.9** Representación y construcción de los DCC para  $k= 2$  y 3 factores

Dentro las ventajas que tiene este diseño experimental permite observar los efectos principales de cada factor y sus interacciones simples y dobles.

## CAPÍTULO 3

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Optimización de las variables de respuesta en la obtención del lodo con arsénico

Se determinaron las condiciones óptimas de obtención de lodo proveniente del proceso de coagulación floculación en la remoción de arsénico de agua para consumo humano, según las condiciones de operación descritas en el apartado 2.1. En la Tabla 3.1 se observan los valores obtenidos de las variables de respuesta, Sólidos sedimentables (SSED) y concentración final de As(V) en el sobrenadante para diferentes concentraciones.

**Tabla 3.1** Resultados de la matriz con respecto a las variables de respuesta SS y As en el sobrenadante

N° de ensayo	Concentración de As(V): 0.050 mg/L		Concentración de As(V): 0.100 mg/L		Concentración de As(V): 0.150 mg/L	
	SSED (mL/L)	[As(V)] en el sobrenadante (mg/L)	SSED (mL/L)	[As(V)] en el sobrenadante (mg/L)	SSED (mL/L)	[As(V)] en el sobrenadante (mg/L)
1	3	0	3	0.007	2	0
2	4	0	4.5	0	2	0
3	10	0	7	0.005	3	0
4	8	0	7.5	0.001	7	0
5	6	0.008	5	0.009	3	0
6	6.5	0	8	0.003	3	0
7	7	0	4	0	3	0
8	8	0	10	0	5	0
9	8	0	7	0.001	7	0
10	2	0	7.5	0	3	0
11	7.5	0	7	0.001	7	0
12	9.5	0	7.5	0	8	0
13	3	0.008	3	0	1.5	0
14	7.5	0	5	0	4	0
15	5	0.006	4	0	1	0.003
16	8	0	7.5	0	8	0
17	7.5	0	5	0	1	0
18	8	0	8	0.001	3	0

Además de las variables de respuesta anteriormente mencionadas en el lodo obtenido, se determinaron los siguientes parámetros de calidad del lodo: Índice de Willcomb, sólidos en las formas totales, suspendidos y disueltos, conductividad eléctrica, color aparente y verdadero, pH final. Los resultados aparecen en el Anexo A.

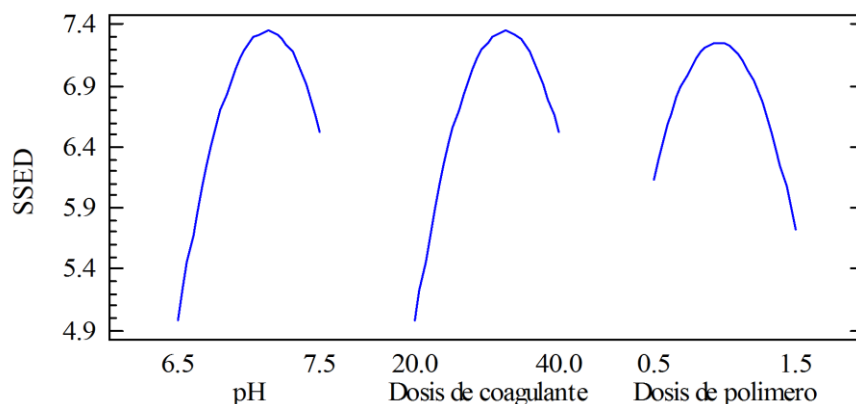
Las características físicas y químicas del lodo obtenido con la concentración 0.050 mg/L de As(V), muestran en el análisis de Índice de Willcomb un intervalo de 4-8, este es significativamente visual en la formación de los flocs, ya que las combinaciones principalmente de concentración baja de polímero y alta de coagulantes como es el caso de la combinación 17 y 18 tienen bajo desempeño en la formación y sedimentación del floc. Para las combinaciones de los ensayos 13 y 15 se muestra que la remoción de arsénico depende de la concentración tanto del coagulante como del polímero, ya que al ser bajo uno u otro la remoción es baja y muestra valores de 0.006-0.008 mg/L en el sobrenadante. El comportamiento de sólidos sedimentables y totales, muestra en las diferentes combinaciones de los números de ensayo que depende de la concentración de polímero, concentración de coagulante y del pH, ya que a mayor concentración de coagulante se obtuvo más cantidad de sólidos.

En cuanto a la concentración de As(V) 0.100mg/L, el pH en la matriz experimental visualmente no disminuye considerablemente en comparación de la concentración 0.050 mg/L. El comportamiento en el índice de Willcomb muestra valores que van de los 4 a los 6, teniendo en general en todas las combinaciones un floc bien formado y uniformemente distribuido, sedimenta muy lentamente o no sedimenta en su totalidad, este comportamiento deficiente en la formación de floc lleva a visualizar que la concentración de arsénico modifica el resultado bajo estas condiciones establecidas.

Para la matriz experimental de la concentración de As(V) a 0.150 mg/L, se observó que el comportamiento de todas sus características y propiedades muestra una tendencia más uniforme en las variables de respuesta estudiadas. En cuanto a todas las combinaciones, de acuerdo al índice de Willcomb se pudo observar que la formación del floc es buena y sedimenta fácilmente. Para la concentración de arsénico se obtuvo una concentración en el sobrenadante de 0.003 mg/L, para todos los ensayos. El color a diferencia de las anteriores concentraciones disminuyó considerablemente, esto se le relaciona a una adecuada floculación y sedimentación de los flocs de buen tamaño. El comportamiento de sólidos sedimentables y totales, muestran en las diferentes combinaciones de los ensayos que dependen de la concentración de coagulante, concentración polímero, cantidad de sólidos y pH, ya que bajo las combinaciones de los puntos centrales muestra un mayor número de sólidos sedimentables, estos sólidos muestran como diferencia una mejor cantidad promedio. Por estas razones y el comportamiento en el análisis experimental es seleccionada esta concentración posteriormente, analizando las variables de respuesta en el diseño experimental se obtuvieron los valores óptimos de esta etapa de obtención de lodo.

Los resultados de las pruebas experimentales para la optimización de variables de respuesta en la obtención del lodo fueron sometidos a un análisis estadístico en el programa STATGRAPHICS a continuación se presenta el análisis de los resultados para identificar los factores óptimos que tienen influencia significativa en la obtención del lodo con arsénico.

Los valores óptimos son los siguientes: A: pH: 7,20; B: Dosificación de  $\text{FeCl}_3$ : 34,33 mg/L; C: Dosificación del polímero: 0,89 mg/L para una concentración de As 0,150 mg/L. (Figura 3.1).



**Figura 3.1** Efectos principales para la optimización de los factores experimentales estudiados

En la Tabla 3.2, el análisis de la ANOVA nos proporciona la variabilidad entre los factores experimentales y variables analizadas de As(V) para una concentración de 0.150 mg/L, estos factores por separado se analizaron para cada uno de los efectos. Para cada prueba se muestra la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. Los efectos significativos son aquellos cuyo valor -P sea menor a 0.05, (Gutiérrez & Vara, 2008). Con respecto al análisis experimental, tres efectos AA, BB y CC (Figura 3.2) tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%.

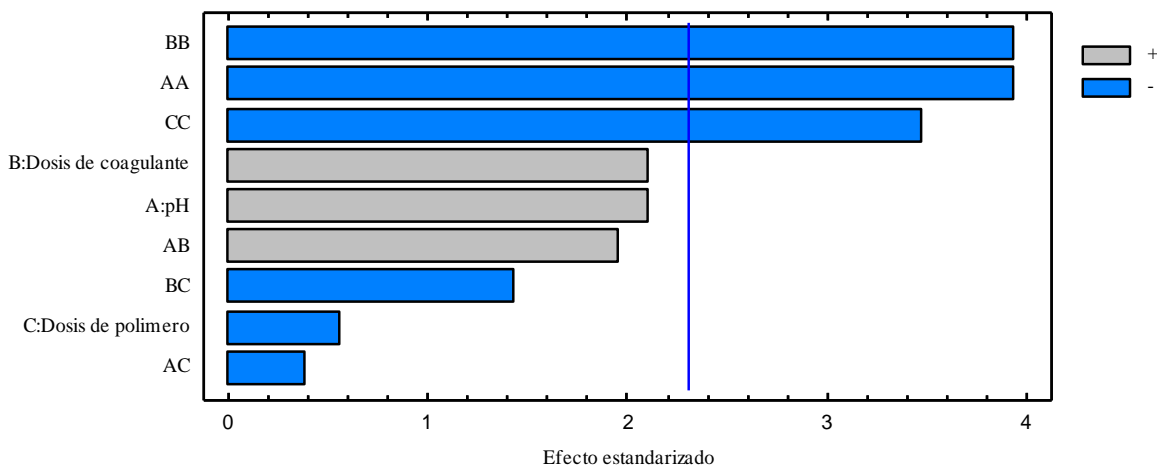
**Tabla 3.2** Análisis de Varianza para la obtención de lodos

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón n-F	Valor-P
A: pH	8.07284	1	8.07284	4.41	0.0690
B: Dosis de coagulante	8.07288	1	8.07288	4.41	0.0690
C: Dosis de polímero	0.581534	4	0.581534	0.32	0.5885



Fuente	Suma de Cuadros	GI	Cuadrado Medio	Razón n-F	Valor-P
AA	28.4071	1	28.4071	15.51	0.0043
AB	7.03125	1	7.03125	3.84	0.0857
AC	0.28125	1	0.28125	0.15	0.7054
BB	28.4072	1	28.4072	15.51	0.0043
BC	3.78125	1	3.78125	2.07	0.1886
CC	22.1005	1	22.1005	12.07	0.0084
Error total	14.6489	8	1.83111		
Total (corr.)	98.2361	17			

En la tabla ANOVA se observa cuáles son los factores que tienen influencia significativa, comparándolos con el diagrama de Pareto, (Figura 3.2), se muestran los valores-P resaltando en rojo los cuales son estadísticamente diferentes, en este caso las interacciones BB AA Y CC. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 85.0881% de la variabilidad. El estadístico R-cuadrada ajustado ( $R_{aj}^2$ ), que es un valor adecuado para comparar, es 68.31%. este valor se acerca considerablemente al 70% lo que indica que este modelo predice el comportamiento del lodo con arsénico, (Gutiérrez & Vara, 2008). El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 1.35318, estos nos muestran la variabilidad dentro de las muestras. El error medio absoluto (MAE) de 0.771573 es el valor promedio de los residuos que nos indica la cuantificación de la desviación en el análisis experimental.

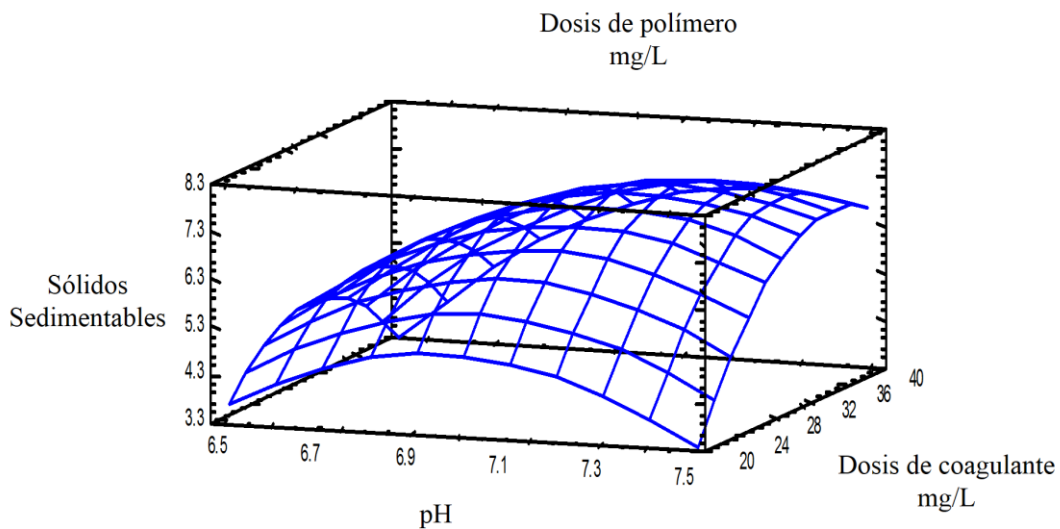


**Figura 3.2** Diagrama de Pareto de efectos estimados para As(V) a 0.150 mg/L en el proceso de obtención de lodo

En la Tabla 3.3 se muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Así como el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande fue de 1.0782, lo que comprueba que no presenta una diferencia estadísticamente significativa entre los factores analizados, (Figura 3.3).

**Tabla 3.3** Efectos estimados para la optimización de As(V)

Efecto	Estimado	Error Estándar.	V.I.F.
promedio	7.2491	0.675599	
A: pH	1.53768	0.732337	1.0
B: Dosis de coagulante	1.53769	0.732339	1.0
C: Dosis de polímero	-0.412707	0.732338	1.0
AA	-2.99716	0.760945	1.0782
AB	1.875	0.956846	1.0
AC	-0.375	0.956846	1.0
BB	-2.99719	0.760953	1.0782
BC	-1.375	0.956846	1.0
CC	-2.64362	0.760948	1.0782



**Figura 3.3** Grafica de superficie de respuesta estimada para los valores optimizados para la concentración de As: 0.150 mg/L. Con una  $R^2 = 85.09\%$  y una  $R^2$  (ajustada por g.l.) = 68.31%

### 3.2 Propiedades físico-químicas del lodo obtenido a condiciones óptimas

Se realizaron propiedades físicas y químicas del lodo optimizado proveniente del proceso de coagulación-floculación, con una concentración de As(V) de 0.150 mg/L, (Tabla 3.4). Las propiedades físicas y químicas se muestran en Anexo A-6.

**Tabla 3.4** Resultados de las propiedades físicas y químicas realizadas al lodo óptimo

Parámetro	Unidades	Valor óptimo inicial
Índice de Willcomb		6-8
Sólidos totales	g/L	0.48
Sólidos sedimentables	mL/L	7.59
Sólidos en la torta húmeda	g/L	2.904
Sólidos en la torta seca	g/L	0.405
Humedad del lodo ( $c_i$ )	%	99.95
Humedad de la torta ( $c_f$ )	%	86.07
Humedad (c)	g/cm <sup>3</sup>	5.02E-4
Densidad (25°C)	g/mL	1.0100
Densidad (70°C)	g/mL	0.9749
Potencial Z	mV	-57.1
pH		6.7
Arsénico en el sobrenadante	mg/L	0
Hierro	mg/L	655.9

El comportamiento del lodo con arsénico en condiciones óptimas, muestra un valor de Índice de Willcomb entre 6 y 8 ya que el floc tiene un tamaño relativamente grande, pero se precipita con lentitud, en cuanto a la cantidad de sólidos sedimentables se obtuvo 7.59 mL/L lo que nos hizo coagular una mayor cantidad de coloides, para obtener una cantidad considerable de lodo necesario para su análisis en las siguientes etapas experimentales. El porcentaje de 99.95% de humedad en el lodo nos predijo la complejidad de disminuir la cantidad de agua en el lodo para una mejor disposición, esto comprueba el valor obtenido de densidad sea muy parecido al del agua. El potencial zeta es una manera adecuada de optimizar la dosificación de coagulante en el agua y en tratamientos de desagüe por coagulación. Los sólidos suspendidos más difíciles de remover son los coloides. Por su tamaño de 1-10  $\mu\text{m}$ , se separan y no floculan fácilmente tanto a la sedimentación como a la filtración. Los valores de potencial Z en la coagulación buscan disminuir o eliminar la carga, de esta manera no existirán fuerzas repulsivas y se obtendrá una mejor optimización. El valor obtenido de

potencial Z en la etapa de coagulación floculación bajo condiciones óptimas fue de -57.1mV, lo que nos comprueba que no existe una sobre dosificación de coagulante, y las características del polímero utilizado en esta etapa justifican el valor del potencial Z, (Restrepo , 2009).

El cloruro férrico usado como coagulante, tiene ventajas al compararlo con otros, entre las que se destacan su efectividad en amplios rangos de pH y temperatura, pero, sobre todo, genera iones trivalentes de mayor peso molecular facilitando la floculación, el valor de hierro obtenido en el lodo de esta etapa fue de 655.9mg/L este valor justico la concentración dosificada para la remoción de As(V), siendo esta cantidad esencial para el proceso de coagulación.

A continuación, se discuten el efecto de las características físicas como Resistencia específica a la filtración (REF), compresibilidad y tiempo de filtración (tF) en la deshidratación del lodo, estas propiedades se obtuvieron con las Ecuación 1-1, 1-3, 2-1 y 2-3.

### 3.2.1 Resistencia específica a la filtración (REF), del lodo obtenido sin acondicionamiento

Para calcular la REF en primer lugar se grafica  $t/V$  vs  $V$  según la ecuación 1-2, para obtener el valor de la resistencia específica a la filtración,  $r$ , a diferentes presiones de vacío: 420, 460 y 520 mm Hg. Las propiedades físicas de tiempo y volumen se muestran en el anexo A-4.

$$\frac{t}{V} = \left( \frac{\mu r c}{2PA^2} \right) V + \frac{\mu R_m}{AP}$$

Los valores experimentales obtenidos que se observan en Figura 3.4, se ajustaron a una regresión lineal (Tabla 3.5) en que se considera, que la resistencia inicial del medio filtrante,  $R_m$ , generalmente es despreciable, por lo que el segundo término de la ecuación 1-2 se aproxima al cero; de la pendiente,  $b$ , (Ecuación 1-2) y reemplazando los valores de: área de filtro 63.6174 cm<sup>2</sup>, viscosidad estimada 0.001 poise, concentración de sólidos totales,  $c$ , para cada una de las presiones se obtienen los valores de la resistencia específica a la filtración,  $r$ , (Tabla 3.5).

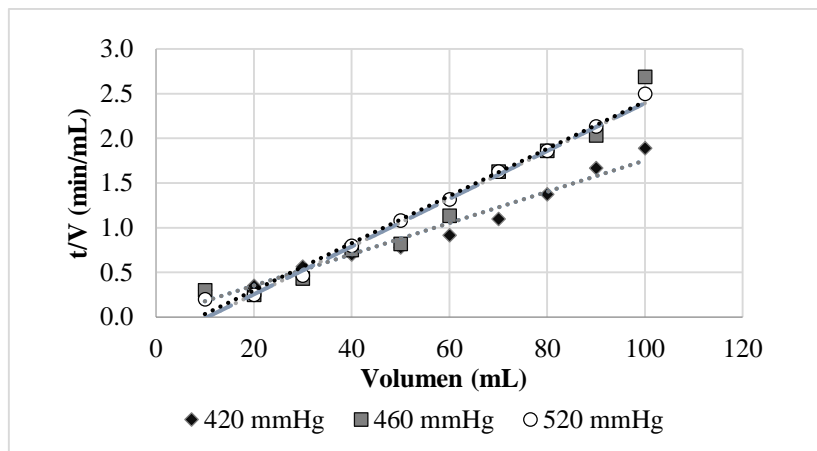


Figura 3.4 Interacción de tiempo y volumen para cada una de las presiones

Tabla 3.5 Valores de la pendiente a diferentes presiones

Presiones (mm Hg)	Ecuación	R <sup>2</sup>	$b = \frac{\mu r c}{2PA^2}$ (s/cm <sup>6</sup> )	r (cm/g)
420	$t/V = 0.0182V + 0.0541$	0.9739	0.0541	1.53548E+13
460	$t/V = 0.0269V + 0.3645$	0.979	0.3645	2.57204E+13
520	$t/V = 0.0272V + 0.3062$	0.9987	0.3062	2.90709E+13

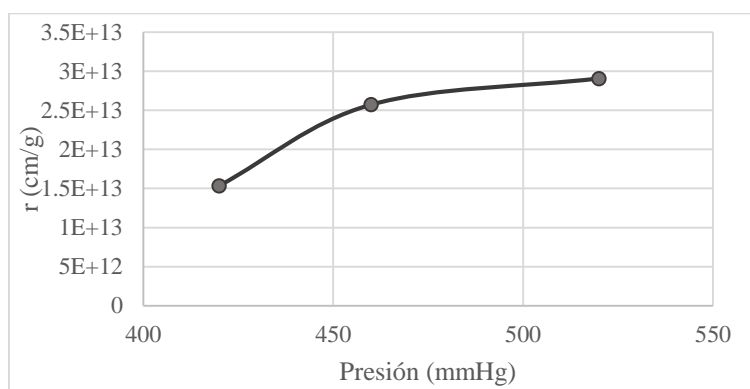
En la Tabla 3.5 se muestra que el valor mayor para  $r$  es a una presión de vacío de 520 mm Hg, quiere decir que para los 100 mL del lodo, a diferentes presiones de vacío pierde el agua hasta que se forma una torta, la cual se quiebra como resultado de una mayor caída de la presión, Figura 3.5.



Figura 3.5 Torta quebrada húmeda y torta quebrada seca, para una presión de vacío de 520 mmHg

### 3.2.2 Compresibilidad en el proceso de obtención del lodo

En la Figura 3.6 se observa el comportamiento de la compresibilidad para cada resistencia específica a la filtración,  $r$ , para las tres presiones de vacío. Al aumentar la presión la deshidratación en la torta es mayor, ésta es provocada por el aplastamiento del lodo en el filtro cerrando sus poros. Estudios realizados por Sørensen (1993) considera valores excelentes de  $r$  para lodos espesados y acondicionados con aluminio, entre  $1.8 \cdot 10^{12}$  -  $2.7 \cdot 10^{12}$  cm/g, para esta etapa los lodos solamente están espesados por gravedad, porque el valor de  $r$  es mayor,  $2.91 \cdot 10^{13}$  para 520 mm Hg, debido a que no está acondicionado aún.



**Figura 3.6** Comportamiento de la resistencia específica a la filtración a diferentes presiones en la obtención del lodo

### 3.2.3 Tiempo a la filtración (TF) del lodo obtenido sin acondicionamiento

El tiempo a la filtración se calculó al identificar en la prueba de resistencia específica a la filtración, con cronometro en mano, registrando el tiempo cuando el 50% del volumen total de la muestra pasó por el filtro. Esta prueba se realizó por triplicado para comprobar el valor obtenido, este tiempo se registra en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6** Registro del tiempo a la filtración en el proceso de obtención del lodo óptimo.

Volumen inicial (Vi)	Tiempo a la filtración
100 mL	107 s

### 3.2.4 Curva de evaporación

El porcentaje de humedad como característica química del lodo inicial se calculó con la Ecuación 2-4. En este proceso se estableció el peso de la muestra perdiendo peso de agua a temperatura

constante de la muestra de lodo en el proceso de la optimización del lodo. A partir de estas curvas se observó que el secado de los lodos muestra la pérdida de agua constantemente hasta un punto de quiebre, (Figura 3.7).

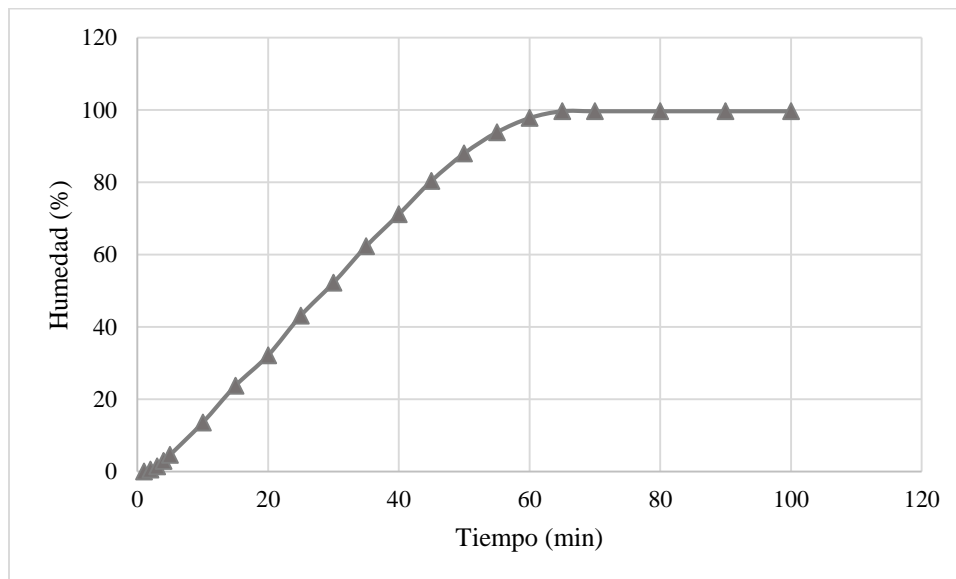


Figura 3.7 Curva de evaporación en el proceso de obtención del lodo.

Los resultados del análisis de humedad y sólidos en el lodo obtenido, demuestran que éste está constituido por el 99.70% de agua y el 0.30% de sólidos, como se observa en el Anexo A-5. En este sentido la muestra de lodo está constituida en su mayoría por agua libre, ya que, durante el primer periodo de evaporación, se observa una tendencia constante, esto indica que el agua contenida en el lodo puede ser fácilmente liberada por un mecanismo de filtración. Estos porcentajes de agua y sólidos son menores a estudios realizados para lodos con Fe, Mn y Al, (Piña & Huerta, 2013) de este modo el manejo de lodos con As es más delicado.

### 3.3 Espesamiento

Para obtener el volumen de lodos optimizados de la coagulación floculación para realizar los procesos de espesamiento, acondicionamiento y deshidratación se trataron 12 m<sup>3</sup> de agua de pozo del IMTA con una concentración de As(V) de 0.150 mg/L. Se utilizó un tanque de mezcla rápida con una capacidad de 200 L obteniendo 8.5 L de lodo, (Figura 3.8).



**Figura 3.8** Floculador diseñado para obtener y espesar lodo optimo

El lodo espesado que se obtuvo contenía 350 mL/L de SSED, 3 g/L de ST, y un valor de índice de Willcomb de 8, de esta manera se utilizó el lodo con As para las etapas de acondicionamiento y deshidratación.

### 3.4 Acondicionamiento

#### 3.4.1 Resultados de la selección de polímeros para el proceso de acondicionamiento

Para el acondicionamiento químico de los lodos obtenidos del proceso de espesamiento por gravedad durante (12 h), se realizó un cribado con los cinco polímeros descritos en la Tabla 2.6, utilizando una dosis de 300 mg/L de los cuales se seleccionaron los polímeros (P1: Bufloc 5290 y P2: Fo4650SSH) seleccionados según las variables de respuesta: Concentración final de As en el sobrenadante (0 mg As/L) y SSED de los lodos producidos (350-380 mL/L respectivamente). Con respecto a la resistencia específica del lodo, el menor valor se obtuvo para el P2, (Tabla 3.7).

**Tabla 3.7** Cribado con cinco polímeros de origen catiónico y aniónico, seleccionando los dos mejores

Variable	Bufloc 5426	Bufloc 5290 (P1)	Bufloc 5631	Fo4490 UHM	Fo4650 SSH (P2)
Características	Aniónico	Aniónico	Aniónico	Catiónico	Catiónico
pH	3.48	3.33	4.39	6.73	3.43
As remanente (mg/L)	0.008	0	0.006	0.005	0
SSED (mL/L)	373.3	350	325	345	380
tF (s)	80	153	195	204	167
r (cm/g)	1.261E+14	7.74129E+13	4.7687E+13	5.5895E+13	4.7687E+13



Respecto al tiempo a la filtración los polímeros seleccionados no fueron los mayores, esto nos indica que tienen una menor resistencia a la filtración.

### 3.4.2 Optimización de las condiciones de estudio para el proceso de acondicionamiento.

Posteriormente con los polímeros P1 y P2 se planteó un diseño experimental central compuesto,  $N=2^3$ , en que se obtuvieron los valores óptimos de las variables de estudio: A: Dosificación de polímero 284 mg/L B: pH: de 6.4; y C: Tiempo: 2 min, en la Tabla 2.8 se muestra la matriz experimental utilizada.

**Tabla 3.8** Resultados de la matriz con respecto a las variables de respuesta SSED y As en el sobrenadante para el P1 Y P2; Concentración inicial de As(V) 0.015 mg/L

N° de ensayo	Polímero 1		Polímero 2	
	Sólidos sedimentables (mL/L)	Concentración de As(V) en el sobrenadante (mg/L)	Sólidos sedimentables (mL/L)	Concentración de As(V) en el sobrenadante (mg/L)
1	250	0.016	200	0
2	250	0	200	0
3	250	0	205	0
4	230	0	200	0
5	200	0	260	0
6	240	0	195	0
7	320	0	200	0
8	250	0.009	290	0
9	260	0	205	0
10	240	0.012	260	0
11	260	0	200	0
12	260	0	200	0
13	240	0	260	0
14	260	0	205	0
15	250	0.017	265	0
16	260	0	260	0.017
17	260	0	200	0
18	250	0	200	0

### 3.4.3 Análisis estadístico ANOVA para el Polímero 1

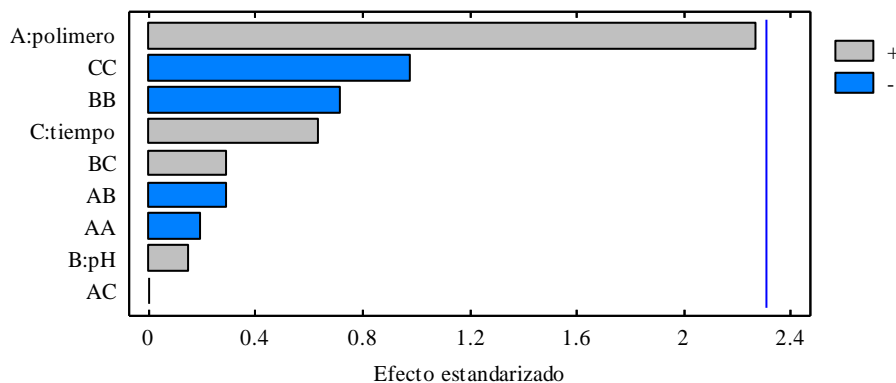
En la Tabla 3.9, el análisis de la ANOVA nos proporciona la variabilidad entre los factores experimentales y variables analizadas de As(V) para una concentración de 0.150 mg/L, para SSED en el polímero 1, cada uno de los efectos prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra su error estimado. En este caso, 0 efectos tienen un valor-P

menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

**Tabla 3.9** Interacciones del análisis ANOVA para el polímero 1

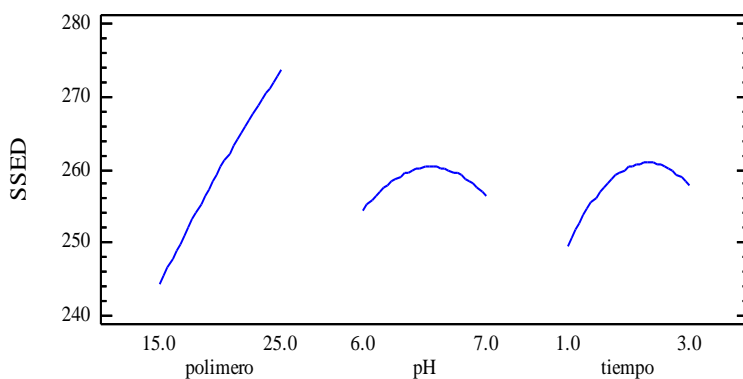
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: polímero	2982.35	1	2982.35	5.14	0.0531
B: pH	13.6151	1	13.6151	0.02	0.8820
C: tiempo	236.384	1	236.384	0.41	0.5410
AA	22.5101	1	22.5101	0.04	0.8487
AB	50.0	1	50.0	0.09	0.7765
AC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BB	299.941	1	299.941	0.52	0.4925
BC	50.0	1	50.0	0.09	0.7765
CC	557.246	1	557.246	0.96	0.3556
Error total	4638.76	8	579.846		
Total (corr.)	8694.44	17			

En estos factores por separado se analizaron para cada uno de los efectos. Para cada prueba se muestra la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, tres efectos A (Polímero), B (pH) y C (Tiempo), (Figura 3.9) no tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%, esto se refiere que no hay diferencias estadísticamente significativas. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%, y respecto a la  $R^2$  de obtuvo un valor estadísticamente bajo.



**Figura 3.9** Diagrama de Pareto estandarizada para SSED del polímero 1

Al probar la significancia estadística de los efectos, la Figura 3.10 muestra las diferencias de los efectos principales en los factores estadísticos para el polímero 1.



**Figura 3.10** Efectos principales para la optimización de los factores experimentales estudiados para P1

En la Figura 3.10 se observa que la concentración del polímero para el polímero 1 muestra un comportamiento con tendencia de aumento en su concentración, aunque no sea reflejado como diferencia estadística significativa entre cada factor.

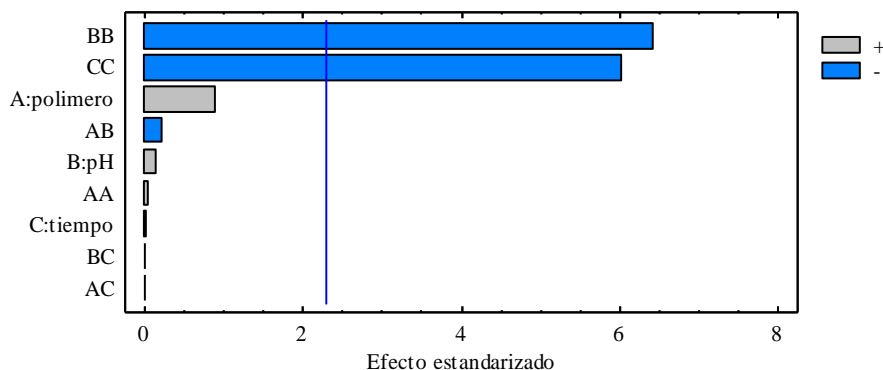
### 3.4.4 Análisis estadístico ANOVA para el Polímero 2

El análisis de la ANOVA proporciona la variabilidad entre los factores experimentales y variables analizadas de As(V) para una concentración de 0.150 mg/L, para SSED cada uno de los efectos prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra su error estimado. En este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%, (Tabla 3.10).

**Tabla 3.10** Análisis estadístico ANOVA para el Polímero 2

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: polímero	186.397	1	186.397	0.82	0.3904
B: pH	5.1777	1	5.1777	0.02	0.8835
C: tiempo	0.18525	1	0.18525	0.00	0.9779
AA	0.481659	1	0.481659	0.00	0.9643
AB	12.5	1	12.5	0.06	0.8200
AC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BB	9361.93	1	9361.93	41.40	0.0002
BC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CC	8184.86	1	8184.86	36.20	0.0003
Error total	1808.89	8	226.111		
Total (corr.)	17712.5	17			

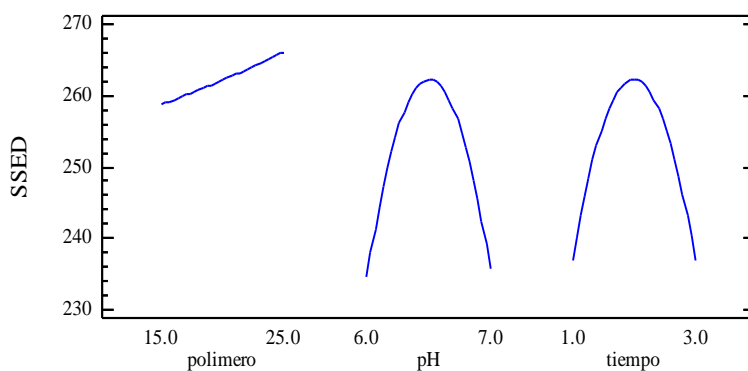
El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 89.8% de la variabilidad en SSED. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 78.3%. lo que indica que este modelo predice el comportamiento del lodo con arsénico, (Gutiérrez & Vara, 2008). El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 15.037. El error medio absoluto (MAE) de 8.40443 es el valor promedio de los residuos, con este análisis, estos factores por separado se analizaron para cada uno de los efectos. Para cada prueba se muestra la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 2 efectos, B (pH) y C (Tiempo) (Figura 3.11) tienen una valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95% Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%.



**Figura 3.11** Diagrama de Pareto estandarizada para SSED con el polímero 2

Al probar la significancia estadística de los efectos, la Figura 3.12 muestra las diferencias de los efectos principales en los factores estadísticos para el polímero 2.

Este análisis al mostrar diferencias estadísticamente significativas para BB y CC, en la Figura 3.12 y en el momento de realizar el ensayo fue visualmente notablemente que el tiempo de agitación si aumentaba rompería el floc.



**Figura 3.12** Efectos principales para la optimización de los factores experimentales estudiados para P2.

En la Figura 3.12 el punto optimizado es visiblemente marcado para pH y tiempo, logrando identificar como efectos principales la concentración de polímero, el cual muestra una tendencia para aumentar su concentración. Posteriormente se analizó la calidad del lodo con respecto a las propiedades físicas y químicas del lodo optimizado proveniente del proceso acondicionamiento para los dos polímeros como se muestran en la Tabla 3.12.

De acuerdo a los resultados del análisis de varianza, únicamente el polímero 2 muestra diferencias estadísticamente significativas, con un valor de  $P < 0,05$ , con un intervalo de confianza del 95%, con interacciones entre BB y CC variables con efectos significativos, sin embargo, el comportamiento del P1 no muestra diferencias estadísticamente significativas en sus factores experimentales.

**Tabla 3.11** Condiciones óptimas en la etapa de acondicionamiento para los polímeros seleccionados.

Factores	Óptimo	
	P1	P2
pH	6.4	6.2
Dosis (mg/L)	284	284
Tiempo (min)	2.3	2.0

**Tabla 3.12** propiedades físicas y químicas del lodo en el acondicionamiento

Parámetro	Proceso de acondicionamiento		
	Unidades	Polímero 1 Bufloc 5240	Polímero 2 Fo465055H
<b>Físicas</b>			
Índice de Willcomb		6-8	6-8
Sólidos totales	g/L	6.028	5.443

Parámetro	Proceso de acondicionamiento		
	Unidades	Polímero 1 Bufloc 5240	Polímero 2 Fo465055H
Sólidos sedimentables	mL/L	320	290
Sólidos en la torta húmeda	g/L	3.17	3.63
Sólidos en la torta seca	g/L	0.56	0.59
Humedad del lodo ( $c_i$ )	%	99.39	99.45
Humedad de la torta ( $c_f$ )	%	82.65	83.75
Humedad (c)	g/cm <sup>3</sup>	6.3E-3	5.7E-3
Densidad g/mL (25°C)	g/mL	1.0108	1.0121
Densidad g/mL (70°C)	g/mL	0.9713	0.9795
Potencial Z (mV)	mV	-45.3	-40.4
<b>Químicas</b>			
pH		6.1	6.2
Arsénico en el sobrenadante (mg/L)	mg/L	0	0
Hierro	mg/L	2,980.75	2,240.37

La concentración de sólidos en los polímeros, muestran para el polímero 1, una mayor cantidad a diferencia del polímero 2, de igual manera el comportamiento y resistencia del floc fue mejor para P1 teniendo una menor cantidad de humedad.

El aumento de la concentración de hierro con respecto al lodo inicial es 4.54 veces (P1) y 3.42 veces (P2). El pH es ligeramente ácido para la etapa de acondicionamiento.

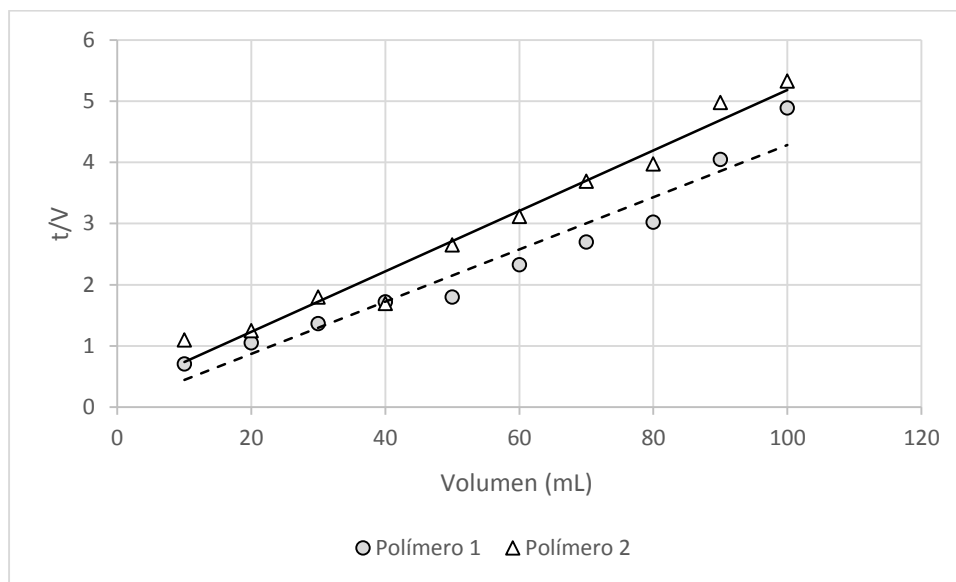
### 3.4.5 Resistencia específica a la filtración (REF), en el proceso de acondicionamiento.

La (REF) se calculó con un determinado volumen (V) del lodo, este análisis se realizó bajo presiones de vacío en donde se disminuye la cantidad de agua, hasta que se forma una torta, el tiempo medio de esta prueba nos indica el Tiempo a la filtración TF para cada polímero, en la Tabla 3.13 se muestran los valores de sólidos en la torta húmeda (STH) y sólidos en la torta seca (STS).

**Tabla 3.13** Obtención de datos para calcular la Resistencia Específica a la Filtración con los dos polímeros

Polímero	P (mmHg)	TF (min)	r (cm/g)	Ecuación	R <sup>2</sup>	$b = \frac{\mu r c}{2PA^2}$ (s/cm <sup>6</sup> )	STH (g)	STS (g)
1	580	1.80	3.78052E+12	t/V= 0.0426V + 0.0183	0.9402	0.0426	3.1756	0.5573
2	570	2.65	4.3077E+12	t/V= 0.0494V + 0.2423	0.9721	0.0494	3.6282	0.5908

Posteriormente se realizó REF al lodo óptimo obtenido en la etapa de acondicionamiento con los dos polímeros seleccionados y el comportamiento obtenido entre ellos fue muy similar para ambos polímeros mostrando el polímero 2 mayor Resistencia específica a la filtración, los resultados obtenidos en esta prueba nos indica que el acondicionamiento con polímero beneficia al comportamiento de la filtración del lodo, (Figura 3.13).



**Figura 3.13** Interacción de tiempo y volumen para los dos polímeros óptimos en la etapa de acondicionamiento

### 3.4.6 Curva de evaporación para los polímeros optimizados en la etapa de acondicionamiento

El porcentaje de humedad se calculó con la ecuación (2-4), se observa en la (Figura 3.14) la interacción de porcentaje de humedad, de los dos polímeros elegidos bajo condiciones óptimas.

Las características físicas de los lodos acondicionados con los dos tipos de polímeros (P1, P2) mejoran significativamente en: Índice de Willcomb, sólidos totales y sedimentables, sólidos en la torta húmeda y seca. Con respecto a los porcentajes de humedad en la torta seca ( $c_f$ ) antes y después del acondicionamiento son bajos, para el lodo producido en la coagulación floculación es de 86.7% y aumenta para P1:82.65% y P2:83.75%.

Por lo que se debe de disminuir la humedad en la torta para una mejor deshidratación. La fracción de la humedad superficial es la más importante en la deshidratación, debido a que ésta no puede ser removida mecánicamente a menos que se aplique un acondicionamiento previo. Las curvas de evaporación para la matriz de P1 y P2 se para cada número de ensayo de la matriz se muestran en Anexo B-6. El comportamiento de la pérdida de agua es en su mayoría a partir de los 95 minutos de secado.

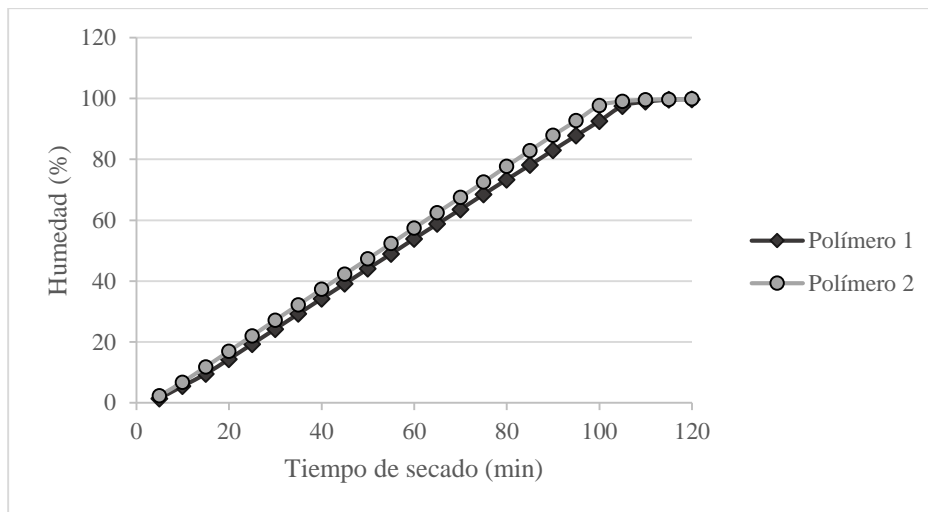


Figura 3.14 Curva de evaporación en el proceso de acondicionamiento

### 3.5 Comparación de resultados obtenidos con diferentes tipos de lodo realizados en otros estudios.

El comportamiento de los análisis realizados en los diferentes procesos experimentales del presente estudio, muestran una relación con otras investigaciones, es importante identificar que las propiedades y generalidades del lodo inicial serán las que definirán las condiciones necesarias para tomar en cuenta al realizar una optimización, a continuación, se realiza un análisis comparativo con otras investigaciones las cuales se refieren a lodo con Al y lodo con Fe y Mn, provenientes del tratamiento del agua potable, (Piña Soberanis & Rivera Huerta, 2013), Tabla 3.14 y Figura 3.15, 3.16 y 3.17.



Tabla 3.14 Análisis comparativo de resultados de diferentes tipos de lodo

Análisis	Tipo de lodo	Proceso obtención de lodo				
		Sedimentación	Espesamiento	Acondicionamiento químico		
				Polímero 1	Polímero 2	Polímero 3
ST (g/L)	Presente estudio con As(V)	0.48	3.0	6.028 <sup>1</sup>	5.443 <sup>2</sup>	-
	Lodo con Al	1.315	15.140	23.730 <sup>3</sup>	32.120 <sup>4</sup>	29.175 <sup>5</sup>
	Lodo con Fe y Mn	7.865	35.505	23.875 <sup>3</sup>	23.558 <sup>4</sup>	22.908 <sup>5</sup>
REF (cm/g)	Presente estudio con As(V)	2.34E+13	-	3.78052E+12 <sup>1</sup>	4.3077E+12 <sup>2</sup>	-
	Lodo con Al	2.77E+12	1.26E+12	1.20E+11 <sup>3</sup>	7.81E+10 <sup>4</sup>	6.92E+10 <sup>5</sup>
	Lodo con Fe y Mn	1.97E+10	1.34E+10	1.11E+10 <sup>3</sup>	1.75E+10 <sup>4</sup>	2.29E+10 <sup>5</sup>
tF (s)	Presente estudio con As(V)	107	-	108 <sup>1</sup>	159 <sup>2</sup>	-
	Lodo con Fe y Mn	27	39	27 <sup>3</sup>	23 <sup>4</sup>	26 <sup>5</sup>

<sup>1</sup>Bufloc 5290; <sup>2</sup>Fo4650SSH; <sup>3</sup>XP-4800; <sup>4</sup>Bufloc-5368; <sup>5</sup>VT-N300

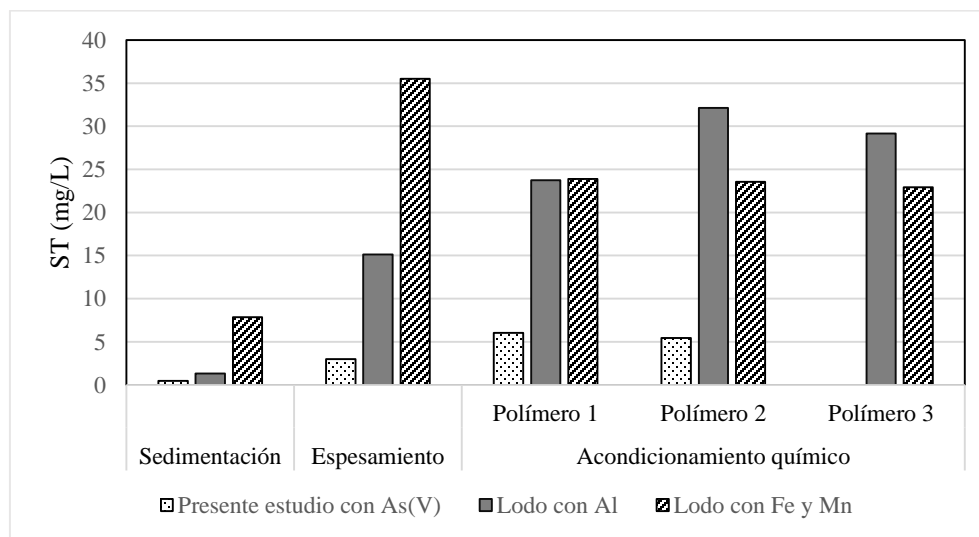
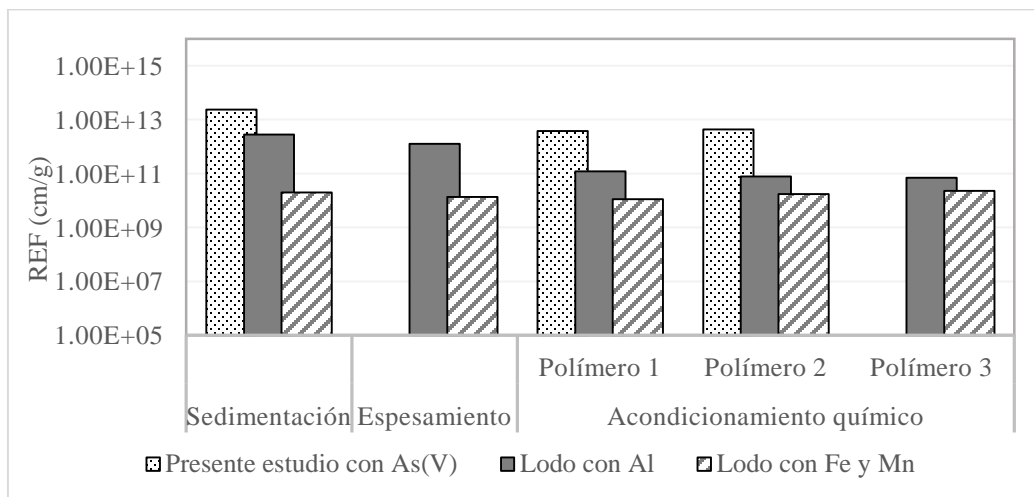


Figura 3.15 Comparación de ST en diferentes procesos de tratamiento con lodos de As(V), Al y Fe con Mn

En la Figura 3.15 se muestra el comportamiento de los lodos en los diferentes procesos respecto a los sólidos totales; para los lodos con Fe y Mn del proceso de sedimentación al de espesamiento se

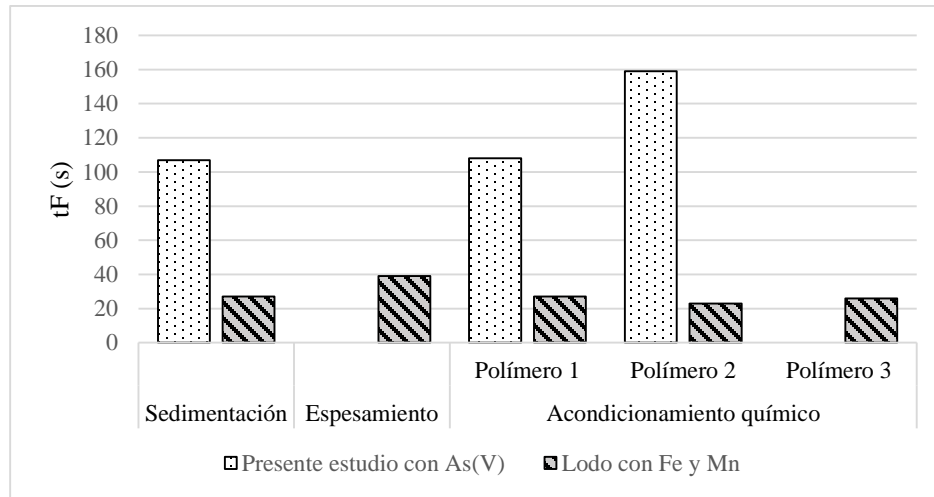
obtienen valores 77.85%, para lodos con As(V) 84% y para lodos con Al un incremento del 91.31%, se observa que el porcentaje de ST en el lodo del proceso de sedimentación al de espesamiento aumenta, debido al asentamiento por compresión de las partículas, las cuales se van continuamente añadiendo a la estructura por sedimentación tipo (IV), por lo tanto aumentan los sólidos totales. El mayor porcentaje de sólidos en esta etapa fue en lodos con Al. En el proceso de espesamiento al acondicionamiento los sólidos incrementan para los lodos con As(V) en promedio de sus polímeros un 48.4%, mientras que para los lodos con Al fue de 45.72% y para los lodos con Fe y Mn disminuyeron un 51%. Obteniendo mayor porcentaje para lodos con (As). Se observa que los lodos con arsénico muestran incremento en la concentración de ST para cada proceso de tratamiento de lodo.

En cuanto a la REF se observa que disminuye en el lodo espesado, y posteriormente aumenta con el acondicionamiento químico, debido al incremento de porcentaje de sólidos para cada proceso de tratamiento, mostrando una tendencia similar para los diferentes polímeros en los tres tipos de lodos en la etapa de acondicionamiento, (Figura 3.16).



**Figura 3.16** Comparación en el comportamiento de la REF para lodos con As(V), Al y Fe con Mn en las diferentes etapas de tratamiento

El estudio del tiempo a la filtración ( $t_F$ ) para lodos nos muestra la resistencia que presenta el lodo al ser filtrado, al comparar estos valores con diferentes tipos de lodo podemos identificar en la Figura 3.17 la diferencia de tiempos para lodos con As y lodos con Fe y Mn. El tiempo a la filtración es mayor para lodos con As en comparación con lodos Fe y Mn y ambos están directamente relacionados con el tipo de polímero utilizado en el tratamiento.



**Figura 3.17** Comparación en el comportamiento en el análisis de tF para lodos con As(V) y Fe con Mn

El tF y REF en los diferentes tipos de lodo, nos permite analizar comportamiento de la pérdida de humedad. Al comparar la REF de los lodos de (Al), con los lodos de (Fe) y (Mn), se observa que los lodos de (Al) presentan una mayor REF independiente a la concentración de ST, en cambio el comportamiento de los lodos con As(V), muestra una mayor REF y tF a pesar de que tiene menor cantidad de ST, esto es debido a la composición del lodo y la distribución que presenta cada partícula en el filtro, ocasionando el incremento de tiempo en la filtración del lodo.

### 3.6 Deshidratación

#### 3.6.1 Filtro banda

La deshidratación del lodo acondicionado se llevó a cabo en un filtro banda (Bootest), (Figura 3.18) bajo condiciones óptimas, (Tabla 3.9).



**Figura 3.18** Filtro banda, para estudiar la deshidratación de lodo

En la Figura 3.19 se muestra la cinética de desaguado de lodo posterior a su acondicionamiento con P1 y P2, estos ensayos se realizaron con el lodo homogéneo y el lodo espesado. El P1 espesado muestra una mejor cinética siendo su valor menor en tiempo de filtración.

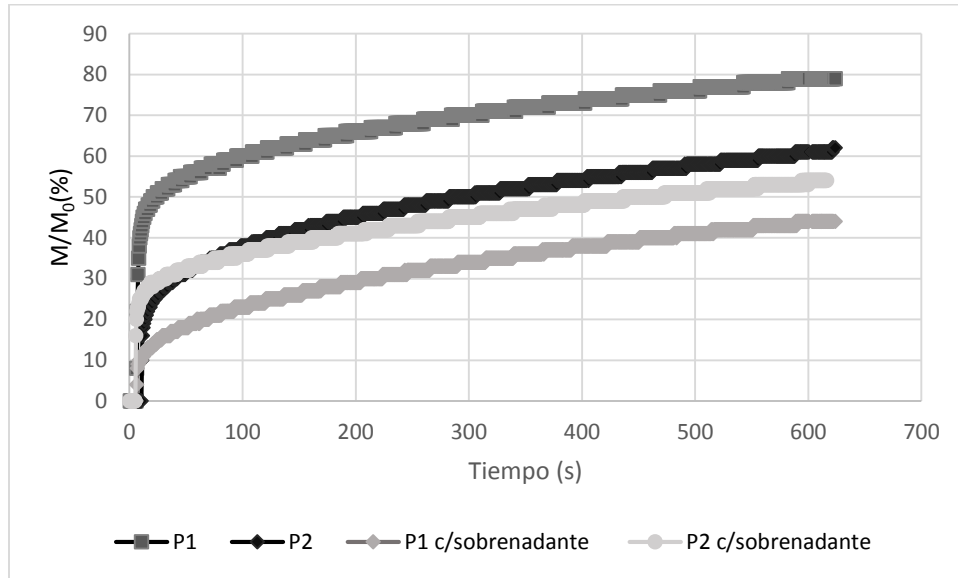


Figura 3.19 Curva de desaguado en filtro banda Bootest.

Posteriormente se realizaron los cálculos para determinar el valor de desagüe ( $E_g$ ), de la siguiente manera;

$P_1$  se refiere a la concentración máxima de sólidos en el lodo.

$$P_1 = \frac{Si_f}{Si_0} \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Donde;

$Si_f$  = Cantidad de sólidos totales inicial (g/L)

$Si_0$  = Cantidad de sólidos totales final (g/L)

El valor de  $P_2$  se obtiene realizando una cinética de liberación de agua, (Figura 3.19). Para ello se grafica  $M/M_0$ ,  $M$ =Masa de lodo filtrada,  $M_0$ = Masa de lodo inicial. Con ello se obtiene el valor de ( $t_{90}$ ).

$$P_2 = \frac{t_{90}}{60} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde;

$t_{90}$  = 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.

El valor de  $P_3$  tiene como objetivo que el volumen filtrado contenga un valor inferior a 1% de sólidos que al inicio.

$$P_3 = \frac{SM_r}{Si_0} \quad \text{Ecuación 3-3}$$

Donde;

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

$Si_0$  = Cantidad de sólidos totales final, (g/L).

$$Eg = \ln \frac{P1}{P2^\alpha * P3^\beta} = \ln \left( \frac{\frac{Si_f}{Si_0}}{\left(\frac{t_{90}}{60}\right)^3 \left(\frac{SM_r}{Si_0}\right)^{\frac{1}{4}}}\right) \quad \text{Ecuación 3-4}$$

Al realizar los ensayos para determinar el desaguado de lodo (Eg), se determinó la cantidad de sólidos totales retenidos en la tela de polipropileno estilo NFMM 281 con una permeabilidad de 40 ft<sup>3</sup>/ft<sup>2</sup>\*min y sólidos suspendidos totales en el volumen drenado, los resultados se obtuvieron con las Ecuación 3-1, 3-2, 3-3 y 3-4. En Tabla 3.15 se muestran los resultados obtenidos en el proceso de deshidratación. Se observa que la mejor deshidratación por filtro banda se obtuvo con lodo espesado con P1.

**Tabla 3.15** Resultados obtenidos en el proceso de deshidratación para filtro banda

Análisis	P1	P2	P1 c/sobrenadante	P2 c/sobrenadante
Peso de platillo	0.3822	0.5475	0.536	0.4239
Platillo+M	24.96	35.96	56.87	49.803
Platillo cte	3.66	3.12	1.9698	1.7432
Mi%	0.48	0.48	0.48	0.48
Mf %	13.34	7.26	2.55	2.67
Masa del lodo (g)	500	500	500	500
Masa del floculante (g)	28.4	28.4	28.4	28.4
Masa (g) 100%	422.05	327.38	237.79	288.87
Masa (g) 90%	379.84	294.65	214.01	259.98
M/M0	0.719	0.558	0.405	0.492
t90	339.49	425.82	468.29	402.26
P2	5.658	7.097	7.805	6.704
P1	27.784	15.134	5.302	5.566
Sólidos suspendidos (g/kg)	0.2	1.0	0.9	0.9
P3	0.04	0.21	0.18	0.20

Análisis	P1	P2	P1 c/sobrenadante	P2 c/sobrenadante
Eg	-1.1	-2.8	-4.1	-3.6

En la obtención del valor de desaguado de lodo se observa que el  $t_{90}$  está entre 339.49 s y 468.29 s, estos valores son muy elevados, ya que se pretende obtener en 60 s el 90% de lodo drenado. Estos resultados se obtuvieron bajo condiciones óptimas de acondicionamiento. Este tiempo puede disminuir aumentando la concentración de sólidos en el lodo y modificando el tamaño de permeabilidad de la malla filtrante. Las características del lodo con As, muestra un comportamiento delicado y difícil de desaguar.

### 3.6.2 Centrifugación

En la deshidratación por centrífuga, (Figura 3.20). En la (Tabla 3.16) se observa el incremento de sólidos para cada proceso, que se realizó respecto a la disminución de volumen desde la obtención del lodo inicial hasta la centrifuga.



Figura 3.20 Equipo de centrifugación para la deshidratación de lodo

Como se observa en la Tabla 3.16 el acondicionamiento del lodo con el polímero P1, mejoró el proceso de deshidratación obteniéndose un lodo con 0.6% de sólidos totales, posteriormente la deshidratación con filtro banda 0.93% de sólidos totales. Al centrifugar el lodo acondicionado, se obtuvo una concentración de 22.48 %. Este porcentaje de sólidos permite obtener una torta de lodo fácil de transportar y manejar para un uso o disposición final.

**Tabla 3.16** Incremento de sólidos totales en la etapa de deshidratación

Sólidos totales (g/L)						
Lodo inicial	Acondicionamiento		Filtro banda		Centrifugación	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2
0.48	6.03	5.44	9.33	8.74	22.48	18.42

El acondicionamiento del lodo se emplea para mejorar el rendimiento de la deshidratación, en cuanto a la filtración es un procedimiento usado para la deshidratar o separar sólido-líquido, estos resultados demuestran claramente el aumento de sólidos para cada etapa, la centrifugación es la más eficiente para obtener la mayor cantidad de lodo.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES

- En conclusión, se optimizaron las condiciones de lodos provenientes del proceso de coagulación floculación en la remoción de arsénico, con un intervalo de confianza del 95% a 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, para continuar con ellos en la siguiente etapa de análisis de espesamiento.
- 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 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.

### **RECOMENDACIONES**

- Se recomienda utilizar los 2 mejores polímeros, para acondicionamiento químico del lodo, previo a una deshidratación.
- Se sugiere este proceso como alternativa de tratamiento para disminución de volumen y disposición de residuos con As.
- Se recomienda seguir investigando con diferentes permeabilidades en mallas para obtener en 60 s el 90% de lodo drenado.
- Se recomienda seguir estudiando el comportamiento del lodo utilizando polímeros con diferentes características.

---

---

## REFERENCIAS

- Amy G., Edwards M., Brandhuber P., McNeill L., Benjamin M., Vagliasindi F., Carlson K., y Chwirka J., (1999). Arsenic treatability options and evaluation of residuals management issues
- ATSDR. (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (2007). Toxicological Profile for Arsenic August 2007 Division of Toxicology and Human Health Sciences, disponible en línea en: <http://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp.asp?id=22&tid=3> (consultado el 19 de febrero de 2016).
- APHA, A y Federation, W., (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. 19, Washington, DC, USA.
- Barahona, A., y González, S. (1987). Estudio a nivel de planta piloto sobre abatimiento de arsénico del agua de Taltal, *Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Viña del Mar, Chile, pp 880-96.
- Barraqué, C. (1979). Manual técnico de agua, Degremont SA, Cuarta Edición, Francia, pp 1216.
- Cárdenas, Y. A. (2000). Tratamiento de aguas Coagulación y floculación, *Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico*, Lima, Perú, pp 44.
- Carmona, M. D. (2007). El arsénico y la salud, pp 91 Disponible en línea en <https://www.analesranf.com/index.php/mono/article/viewFile/600/617> (consultado 09 de Octubre de 2016)
- Chakraborti, D., Mukherjee, S., Saha, K., Chowdhury, U., Rahman, M., y Sengupta, M. (2003). Arsenic toxicity from homeopathic treatment. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 41(7), 963-967.
- Chwirka, J. C., Chwirka, J. D., Colvin, C., Gomez, J. D., y Mueller, P. A. (2004). Arsenic removal from drinking water using the coagulation/microfiltration process. *Journal American Water Works Association*. 96(3), 106-114.
- Clifford, D., y Lin, C. (1991). Arsenic (III) and Arsenic (V) Removal from Drinking Water in San Ysidro, New Mexico. Cincinnati OH, USEPA. US Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory
- Coackley, P., y Allos, R. (1962). The drying characteristics of some sewage sludges. *Journal of the Institute of Sewage Purification*, 6, 557-563.
- CONAGUA, C. N. (2007). Información proporcionada por la Subgerencia de Explotación y Monitoreo Geohidrológico de la Gerencia Explotación y Monitoreo Geohidrológico de la Gerencia de Aguas Subterráneas, México.
- COREMI. (2004). Consejo de Recursos Minerales. Monografía Geológico Minera del Estado de Guerrero., Consejo de Recursos Minerales, Pachuca, Hidalgo, México.
- Cornwell, D. A., Bishop, M. M., y Gould, R. G. (1987). Water Treatment Plant Waste Management. Handbook of Practice. American Water Works Association Research Foundation. pp. 431.
- Di, B. L. (1993). Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. Associação. *Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio de Janeiro, Brasil Vol. 1, pp 1020.
- Edwards, M. (1994). Chemistry of Arsenic Removal During Coagulation and Fe-Mn Oxidation, *Journal. AWWA*, 86(9): 64-78.
- EPA. (1997). Arsenic in Drinking Water. Washington D.C. EPA: Treatment Technologies. de Treatment, Washington D.C. USA.
- Esparza, M. C. (2006). Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos, *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*. International Congress Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America, disponible en línea en <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd51/remocion-agua.pdf> (consultado 10 de Septiembre de 2016).

- Fernández C. A., (2011). Seminario de Tecnologías de Remoción de Arsénico en Agua, Centro de estudios Transdisciplinarios del Agua Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Fernández Acuña, S. I. (2015). Tratamiento y disposición de aguas residuales de plantas de tratamiento de agua potable en Chile. *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas departamento de Ingeniería Civil*, Santiago de Chile, Chile.
- Fields, K., Sorg, T., Chen, A., y Wang, L. (2000). *Arsenic removal from drinking water by iron removal plants* National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Flanagan, S. J. (2012). Arsenic in tube well water in Bangladesh: health and economic impacts and implications for arsenic mitigation. *OMS Organización Mundial de la Salud*. Disponible en línea en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/> (consultado el 5 de marzo del 2015)
- García, S. I. (2011). Programa Nacional de Prevención y Control de las Intoxicaciones. Buenos Aires, Argentina.
- Garrido Hoyos, S., Avilés, M., Ramírez, A., Grajeda, C., Cardozo, S., y Velásquez, H. (2013). Comparing two operating configurations in a full-scale arsenic removal plant: *Case study: Guatemala. Water. 5(2)*, pp. 834-851.
- Gupta, S. K., y Chen, K. Y. (1978). "Arsenic Removal by Adsorption". *Journal of Water Pollution Control Federation (JWPCF)*, 50(3), pp. 493-506. Disponible en línea en [http://web.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EO/TAO-47.pdf](http://web.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EO/TAO-47.pdf) (consultado el 02 de Agosto de 2016).
- Gutiérrez, H., & Vara, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill Interamericana. ISBN-13:978-970-10-6526-6, México.
- Hathway, S., y Frederick, R. (1987). Removing Arsenic from Drinking Water. *Journal American Water Works Association (AWWA)*. Washington, DC USA. pp. 61-65.
- Hendricks, D. W. (2006). Water Treatment Unit Processes: Physical and Chemical. CRC press, *Taylor y Francis*, New York, USA. pp. 1266.
- Ingallinella, A. M., Pacini, V. A., Fernández, R. G., Vidoni, R. M., y Sanguinetti, (2011). Simultaneous removal of arsenic and fluoride from groundwater by coagulation-adsorption with polyaluminum chloride. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46(11), 1288-1296.
- Johnson, P. N. y Amirtharajah, A (1983). Ferric chloride and alum as single and dual coagulants. *Journal (American Water Works Association)*, 75(5), pp. 232-239.
- Kavanagh, A. B. (1980). The dewatering of activated sludge: Measurements of specific resistance to filtration and capillary suction time. *Water pollution control*, 79(3), 388-398.
- Knocke, W. y. Wakeland, D. L., (1983). Fundamental characteristics of water treatment plant sludges. *Journal (American Water Works Association)*, pp. 516-523.
- Konstantinos C.M., Dibyendu. S., Rupali D., (2006). Evaluating a drinking-water waste by-product as a novel sorbent for arsenic. *Chemosphere* 64: 730-741.
- LENNTECH. Propiedades químicas del Arsénico - Efectos del Arsénico sobre la salud - Efectos ambientales del Arsénico. *Water Treatment Solutions*, Disponible en línea en <http://www.lennotech.es/periodica/elementos/as.htm#ixzz4VTNJYcNc> (consultado el 26 de agosto de 2016).
- Letterman, R. (2002). American Water Works Association. *Water quality and treatment*. McGraw Hill. Madrid, España.
- Litter M.I., Morgada, M. E., y Bundschuh J., (2010). Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption. *Environmental Pollution*. 158(5), 1105-1118.
- Litter, M. I., Sancha, A. M., y Ingallinella, A. M., (2010). IBEROARSEN. Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas. *CYTED*. Argentina.

- 
- 
- Miliarium. (2008). Tecnologías de eliminación del arsénico. Ingeniería Civil y Medio Ambiente, disponible en línea en <http://www.miliarium.com/bibliografia/Monografias/Arsenico/MetodosReduccionArsenico.asp> (consultado el 05 de Abril de 2016)
- Narváez-Suárez, D. (2009). Evaluación de zeolitas sintetizadas a partir de residuos de carbón en la remoción de arsénico en agua para consumo humano. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional, IPN, México. pp. 88.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. Norma Oficial Mexicana Protección Ambiental. -Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 15 de agosto del 2003. México.
- NOM-052-SEMARNAT-2005. Norma Oficial Mexicana establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 2006. México.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Norma Oficial Mexicana, establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 11 de noviembre del 2005. México.
- Perrazo, C., y del Pilar, T. (2012). Caracterización de los residuos generados en el tratamiento de aguas arsenicales por el método de coagulación-adsorción. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Argentina. pp. 202.
- Petrusevski, B., Sharma, S., Schippers, J. C., y Shordt, K., (2007). Arsenic in drinking water International Water and Sanitation Centre, 17(1), 36-44.
- Piña Soberanis, M., y Rivera Huerta, M. (2013). Lineamientos para la optimización del diseño, construcción y operación de la tecnología para remoción de hierro y manganeso en agua potable. convenio IMTA - CONAGUA. Morelos, México.
- Pirnie, M. (2000). Technologies and costs for removal of arsenic from drinking water. *Technologies and costs for removal of arsenic from drinking water*. EPA. pp.815.
- Ramírez, J. L. P., 2012. Remoción de arsénico del agua para uso y consumo humano mediante diferentes materiales de adsorción, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 104.
- Restrepo, O. (2009). Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Colombia. pp. 109.
- Ryker, S. J. (2001). Mapping arsenic in groundwater. *Geotimes, Science for a changing world*, 46(11), 34-36.
- Sandoval Yoval, L., Motellano P. L., Piña S. M., Sánchez G. L., (2001). Selección del tren de tratamiento para deshidratar y reducir el volumen del lodo de plantas potabilizadoras. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 16(4), pp. 91-105.
- Smollen, M. y Kafaar A., (1994). Electroosmotically Enhanced Sludge Dewatering: Pilot-Plant Study. *Water Science Technology*, 30(8), pp. 159-168.
- Sørensen, P. B., y Hansen, J. A. (1993). Extreme solid compressibility in biological sludge dewatering. *Water Science and Technology*.28(1), pp. 133-143.
- Syed, R. Q. (2000). *Water Works Engineering, Planning, desing and operation*. Prentice Hall PTR Upper Saddle River. Dallas Texas, USA.
- WHO. (2001). World Health Organization. Environmental Health Criteria 224 Arsenic and Arsenic Compounds, Geneva 2, pp. 114.

## ANEXOS

### Anexo A

#### Características y propiedades físicas y químicas del lodo en la etapa de coagulación floculación

A-1 Características y propiedades físicas y químicas del lodo obtenido con una concentración inicial de arsénico (V) de 0.050mg/L

Numero de matriz de ensayo	Físicas							Químicas
	<sup>1</sup> IW	<sup>2</sup> ST (g/L)	<sup>3</sup> SST (g/L)	<sup>4</sup> SdT (g/L)	<sup>5</sup> CE (mS/cm)	<sup>6</sup> CA (Pt-Co)	<sup>7</sup> CV (Pt-Co)	<sup>8</sup> pHf
1	6	1.221	0.006	1.215	0.26	12	5	6.56
2	6	0.31	0.009	0.301	0.21	26	3	6.11
3	6	0.45	0.016	0.434	0.3	22	2	5.62
4	8	0.382	0.008	0.374	0.24	18	8	5.63
5	8	0.374	0.005	0.369	0.28	23	3	5.63
6	8	0.442	0.006	0.436	0.33	9	3	7.19
7	6	0.425	0.01	0.415	0.3	18	3	6.068
8	6	0.901	0.008	0.893	0.29	15	3	6.822
9	8	0.846	0.008	0.838	0.25	18	8	5.89
10	8	0.306	0.012	0.294	0.3	26	8	7.368
11	8	0.429	0.012	0.417	0.29	18	10	5.67
12	8	0.386	0.008	0.378	0.29	19	6	6.7
13	4	0.365	0.005	0.36	0.28	15	6	5.7
14	6	0.336	0.005	0.331	0.28	20	6	5.31
15	4	0.342	0.004	0.338	0.29	16	6	5.73
16	6	0.403	0.006	0.397	0.23	18	8	5.41
17	6	0.504	0.003	0.501	0.3	8	4	5.49
18	8	0.516	0.007	0.509	0.31	21	4	5.48

<sup>1</sup>IW: Índice de willcomb, <sup>2</sup>ST: Sólidos totales, <sup>3</sup>SST: Sólido suspendidos totales, <sup>4</sup>SdT: Sólidos disueltos totales, <sup>5</sup>CE: conductividad eléctrica, <sup>6</sup>CA: Color aparente, <sup>7</sup>CV: Color verdadero, <sup>8</sup>pHf: pH final.

A-2 Características y propiedades físicas y químicas de lodo obtenido con una concentración inicial de arsénico (V) de 0.100mg/L

Numero de matriz de ensayo	Físicas							Químicas
	<sup>1</sup> IW	<sup>2</sup> ST (g/L)	<sup>3</sup> SST (g/L)	<sup>4</sup> SdT (g/L)	<sup>5</sup> CE (mS/cm)	<sup>6</sup> CA (Pt-Co)	<sup>7</sup> CV (Pt-Co)	<sup>8</sup> pHf
1	4	0.326	0.186	0.14	0.28	34	5	7.154
2	4	0.378	0.208	0.17	0.33	9	3	7.462
3	6	0.435	0.285	0.15	0.3	14	2	6.902
4	6	0.469	0.309	0.16	0.3	8	2	6.888
5	6	0.411	0.271	0.14	0.28	16	3	7.758
6	8	0.397	0.227	0.17	0.33	11	2	7.207

Numero de matriz de ensayo	Físicas							Químicas
	<sup>1</sup> IW	<sup>2</sup> ST (g/L)	<sup>3</sup> SST (g/L)	<sup>4</sup> SdT (g/L)	<sup>5</sup> CE (mS/cm)	<sup>6</sup> CA (Pt-Co)	<sup>7</sup> CV (Pt-Co)	<sup>8</sup> pHf
7	4	0.397	0.247	0.15	0.3	10	4	6.222
8	6	0.467	0.317	0.15	0.29	6	2	6.902
9	6	0.323	0.153	0.17	0.33	10	2	6.98
10	6	0.383	0.223	0.16	0.3	6	5	6.87
11	6	0.4	0.25	0.15	0.29	10	2	6.959
12	4	0.416	0.266	0.15	0.29	6	5	6.953
13	6	0.337	0.187	0.15	0.28	9	15	6.688
14	6	0.358	0.218	0.14	0.28	4	0	6.929
15	6	0.355	0.205	0.15	0.29	14	1	6.735
16	6	0.423	0.273	0.15	0.28	8	0	6.799
17	6	0.406	0.246	0.16	0.3	17	3	6.487
18	6	0.46	0.3	0.16	0.31	10	1	6.735

<sup>1</sup>IW: Índice de willcomb, <sup>2</sup>ST: Sólidos totales, <sup>3</sup>SST: Sólido suspendidos totales, <sup>4</sup>SdT: Sólidos disueltos totales, <sup>5</sup>CE: conductividad eléctrica, <sup>6</sup>CA: Color aparente, <sup>7</sup>CV: Color verdadero, <sup>8</sup>pHf: pH final.

A-3 Características y propiedades físicas y químicas de lodo obtenido con una concentración inicial de arsénico (V) de 0.150mg/L

Numero de matriz de ensayo	Físicas							Químicas
	<sup>1</sup> IW	<sup>2</sup> ST (g/L)	<sup>3</sup> SST (g/L)	<sup>4</sup> SdT (g/L)	<sup>5</sup> CE (mS/cm)	<sup>6</sup> CA (Pt-Co)	<sup>7</sup> CV (Pt-Co)	<sup>8</sup> pHf
1	0	0.315	0.145	0.17	0.33	7	0.17	7.2
2	0	0.336	0.176	0.16	0.31	18	0.16	5.81
3	0	0.41	0.25	0.16	0.32	14	0.16	6.846
4	0	0.483	0.323	0.16	0.31	8	0.16	5.46
5	0	0.457	0.297	0.16	0.31	28	0.16	6.781
6	0	0.448	0.278	0.17	0.34	16	0.17	6.09
7	0	0.39	0.23	0.16	0.32	7	0.16	6.728
8	0	0.328	0.158	0.17	0.33	21	0.17	5.65
9	0	0	0.04	0.17	0.33	6	0.17	7.004
10	0	0.324	0.164	0.16	0.31	10	0.16	6.34
11	0	0.466	0.296	0.17	0.33	12	0.17	6.779
12	0	0.514	0.344	0.17	0.34	9	0.17	5.82
13	0	0.393	0.183	0.21	0.4	4	0.21	6.19
14	0	0.433	0.263	0.17	0.33	17	0.17	6.03
15	3	0.427	0.267	0.16	0.31	39	0.16	6.22
16	0	0.438	0.268	0.17	0.32	12	0.17	6.1
17	0	0.479	0.289	0.19	0.37	10	0.19	5.86
18	0	0.529	0.359	0.17	0.33	1	0.17	5.41

<sup>1</sup>IW: Índice de willcomb, <sup>2</sup>ST: Sólidos totales, <sup>3</sup>SST: Sólido suspendidos totales, <sup>4</sup>SDT: Sólidos disueltos totales, <sup>5</sup>CE: conductividad eléctrica, <sup>6</sup>CA: Color aparente, <sup>7</sup>CV: Color verdadero, <sup>8</sup>pHf: pH final.

A-4 Propiedades físicas de tiempo y volumen para la obtención de REF a diferentes presiones

420 mmHg		
Volumen (mL)	Tiempo (s)	t/V
10	3	0.30
20	7	0.35
30	17	0.57
40	28	0.70
50	39	0.78
60	55	0.92
70	77	1.10
80	110	1.38
90	150	1.67
100	189	1.89

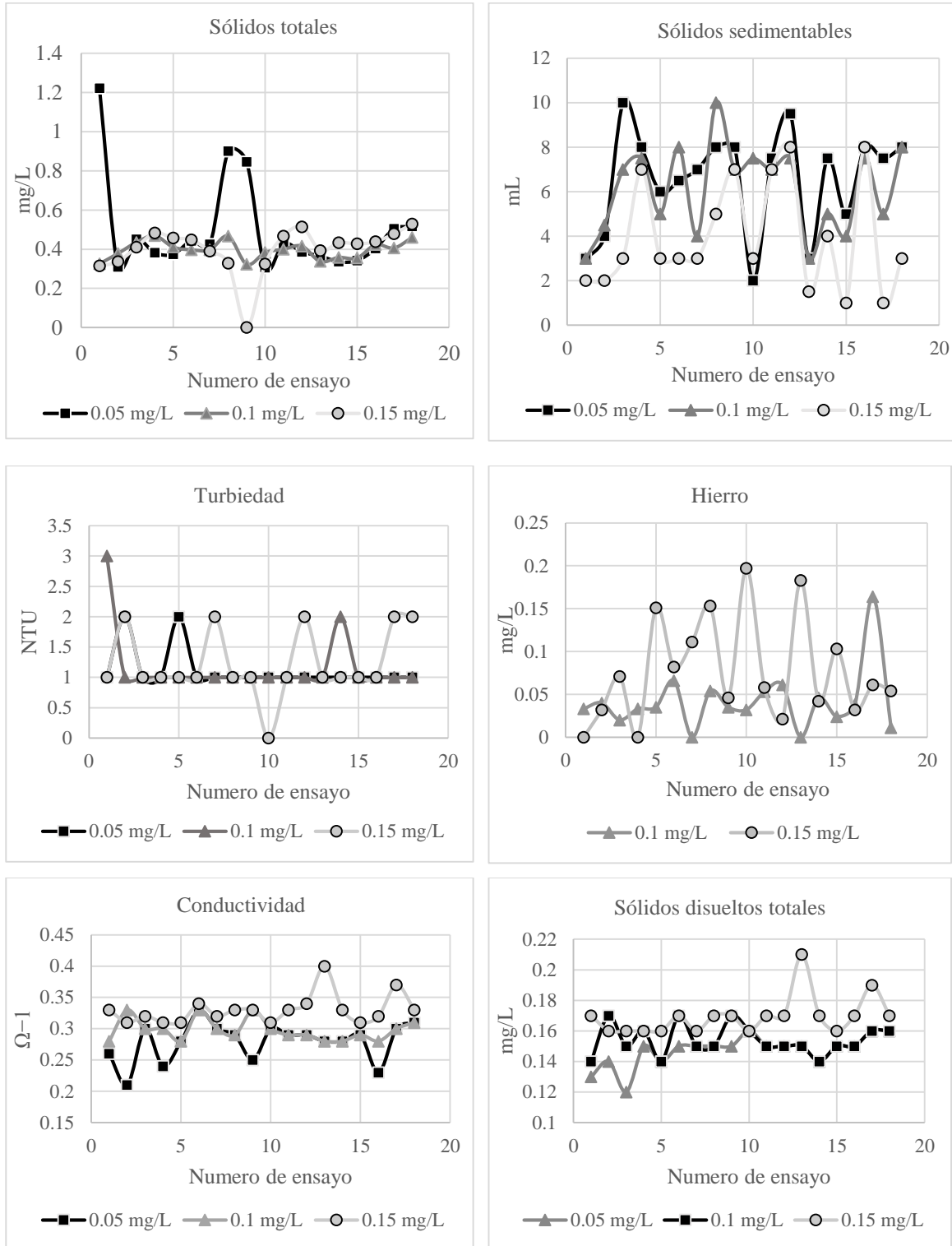
460 mmHg		
Volumen (mL)	Tiempo (s)	t/V
10	3	0.30
20	5	0.25
30	13	0.43
40	30	0.75
50	41	0.82
60	68	1.13
70	114	1.63
80	149	1.86
90	183	2.03
100	269	2.69

520 mmHg		
Volumen (mL)	Tiempo (s)	t/V
10	2	0.20
20	5	0.25
30	14	0.47
40	32	0.80
50	54	1.08
60	79	1.32
70	114	1.63
80	149	1.86
90	192	2.13
100	250	2.50

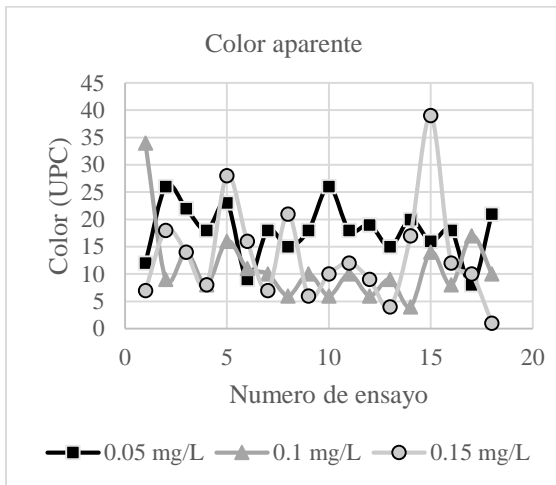
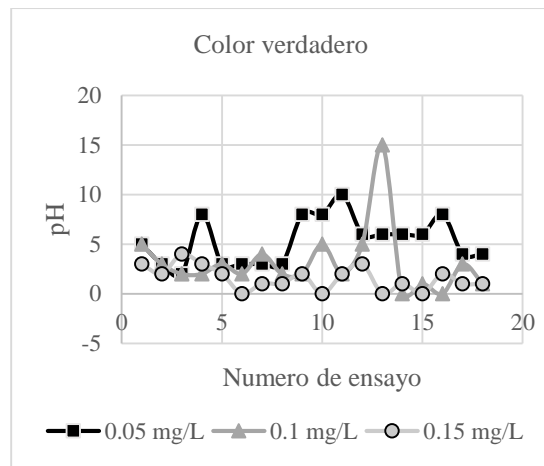
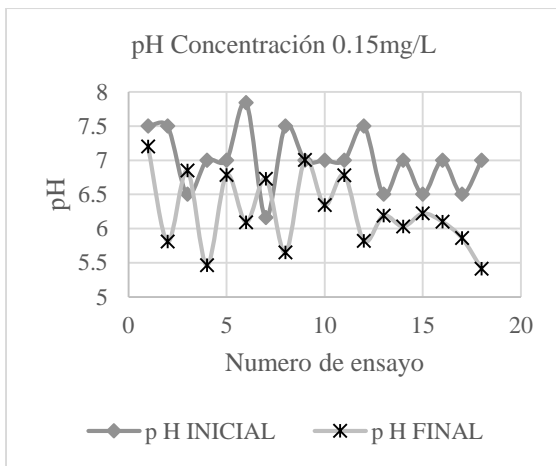
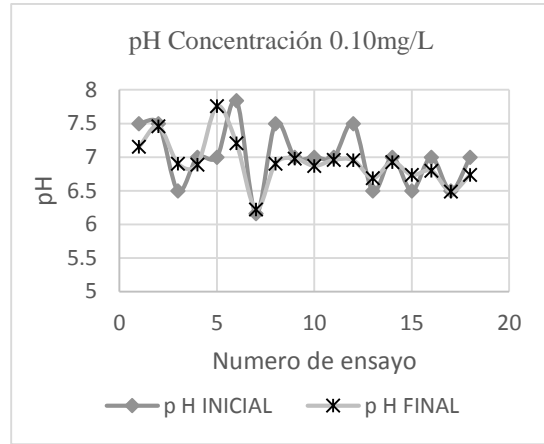
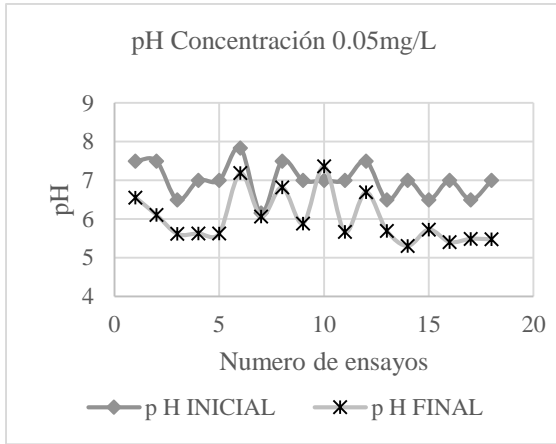
A-5 Datos de % de humedad y % de sólidos

Tiempo (min)	Pf (g)	Pi (g)	Humedad (%)	Sólido (%)
1	20	20.01	0.05	99.95
2	19.9	20.01	0.55	99.45
3	19.72	20.01	1.45	98.55
4	19.42	20.01	2.95	97.05
5	19.09	20.01	4.60	95.40
10	17.3	20.01	13.54	86.46
15	15.26	20.01	23.74	76.26
20	13.58	20.01	32.13	67.87
25	11.38	20.01	43.13	56.87
30	9.56	20.01	52.22	47.78
35	7.54	20.01	62.32	37.68
40	5.77	20.01	71.16	28.84
45	3.92	20.01	80.41	19.59
50	2.4	20.01	88.01	11.99
55	1.23	20.01	93.85	6.15
60	0.44	20.01	97.80	2.20
65	0.06	20.01	99.70	0.30
70	0.06	20.01	99.70	0.30
80	0.06	20.01	99.70	0.30
90	0.06	20.01	99.70	0.30
100	0.06	20.01	99.70	0.30

A-6 Comparativo de las propiedades físicas y químicas del lodo obtenido a diferentes concentraciones







## Anexo B

### Resultados del análisis estadístico y propiedades físicas y químicas del lodo en la etapa de acondicionamiento

A continuación, las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo para el polímero 1.

B-1 Efectos estimados y las interacciones para P1

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	260.298	12.0223	
A: Polímero	29.5552	13.032	1.0
B: pH	1.99694	13.032	1.0
C: Tiempo	8.32078	13.032	1.0
AA	-2.66799	13.5411	1.0782
AB	-5.0	17.0271	1.0
AC	0.0	17.0271	1.0
BB	-9.739	13.5411	1.0782
BC	5.0	17.0271	1.0
CC	-13.2747	13.5412	1.0782

Errores estándar basados en el error total con 8 g.l.

En continuidad se muestran, las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo para el polímero 2.

B-2 Efectos estimados y las interacciones para P1

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	262.293	7.50746	
A: Polímero	7.38879	8.13795	1.0
B: pH	1.23147	8.13795	1.0
C: Tiempo	0.232934	8.13797	1.0
AA	0.390271	8.45585	1.0782
AB	-2.5	10.6328	1.0
AC	0.0	10.6328	1.0
BB	-54.41	8.45585	1.0782
BC	0.0	10.6328	1.0
CC	-50.8751	8.45592	1.0782

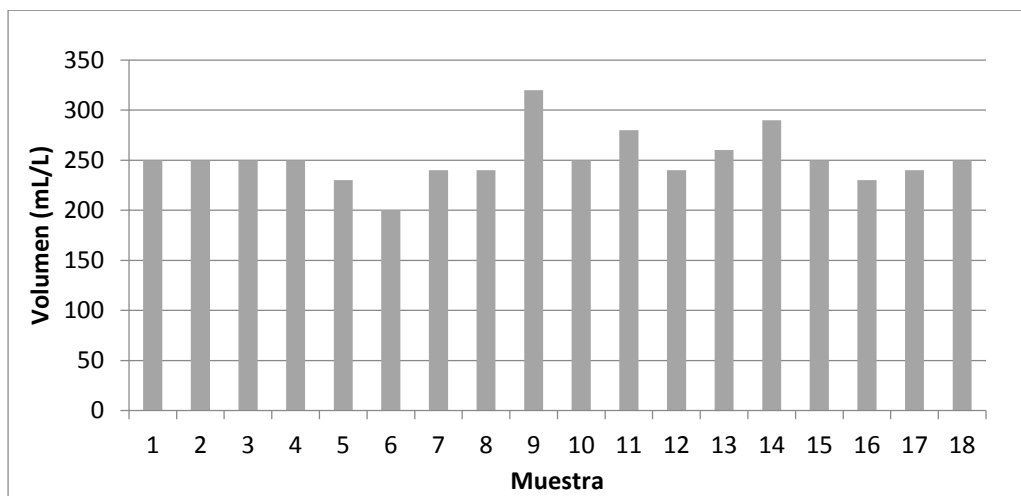
Errores estándar basados en el error total con 8 g.l.

B-3 Valores obtenidos para la obtención de REF

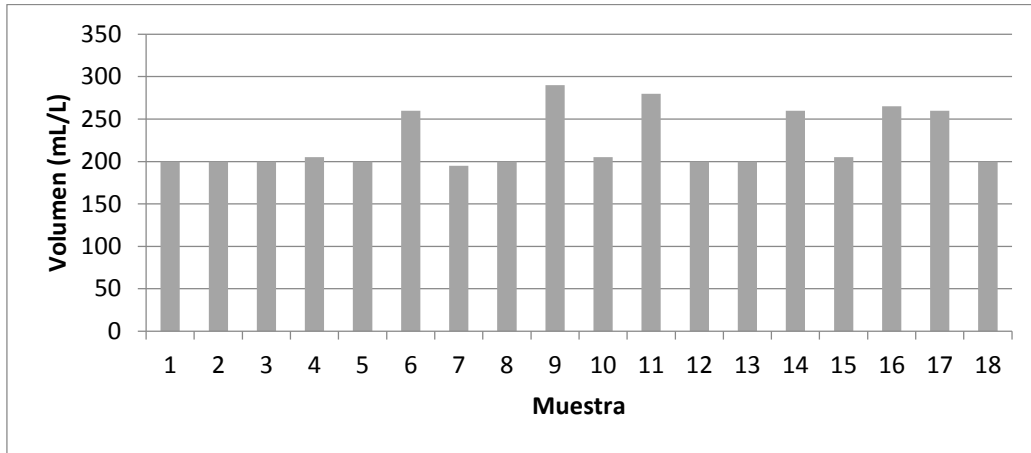
Volumen (mL)	Tiempo (s)	t/V Polímero 1	t/V Polímero 2
10	11.00	0.71	1.1
20	21.00	1.05	1.25
30	41.00	1.37	1.8
40	61.80	1.72	1.695
50	80.40	1.80	2.652
60	129.00	2.33	3.12
70	181.20	2.70	3.69428571
80	241.80	3.02	3.975
90	330.60	4.05	4.98
100	610.20	4.89	5.33

A continuación, se muestran las interacciones de sólidos sedimentables y curvas de evaporación respecto a los polímeros seleccionados para la etapa de acondicionamiento y deshidratación

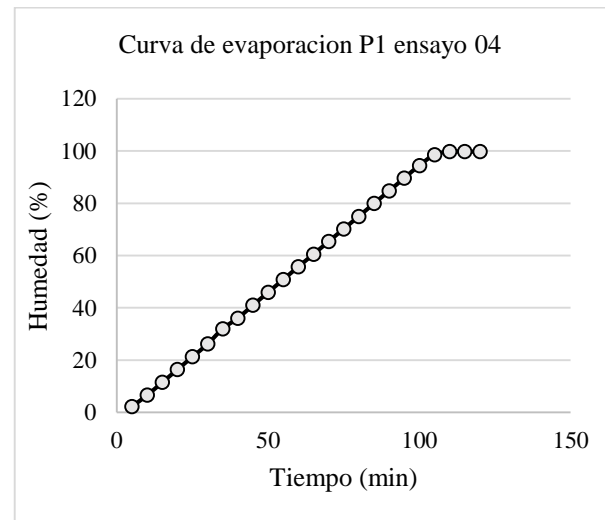
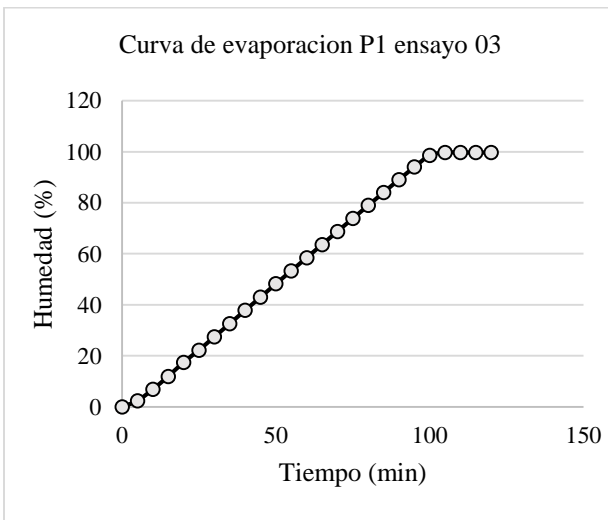
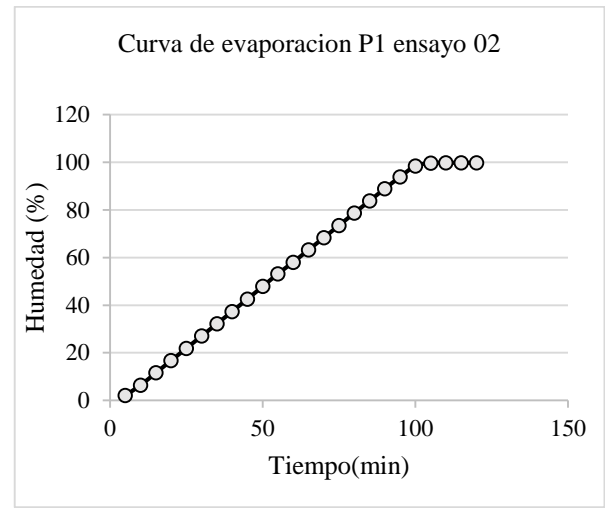
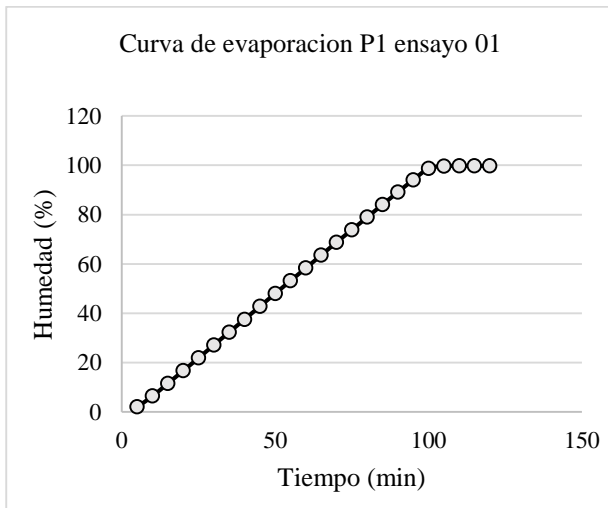
B-4 Sólidos sedimentables (mL/L) para P1

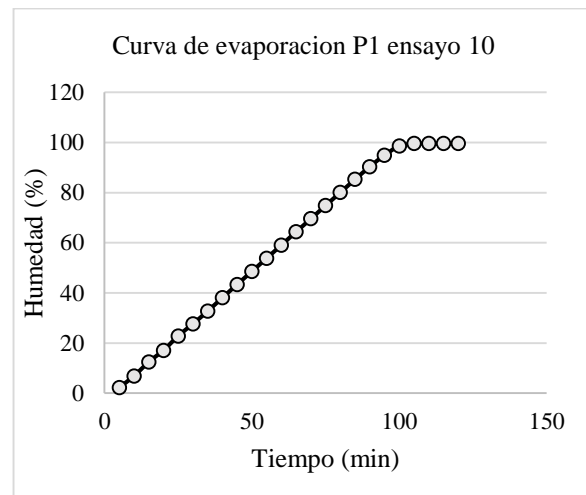
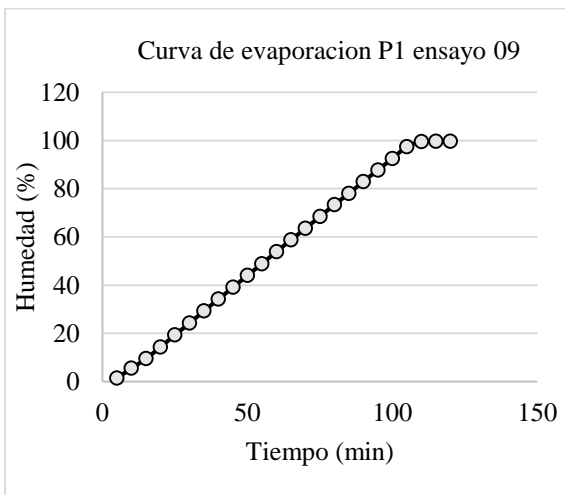
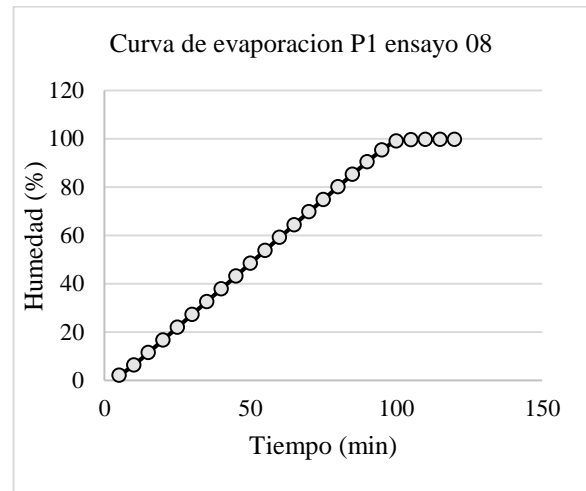
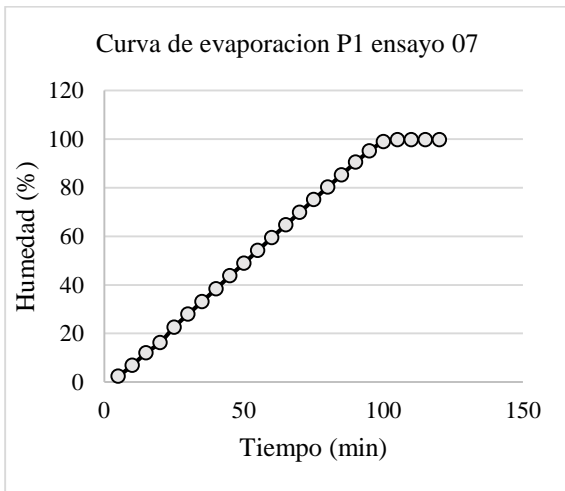
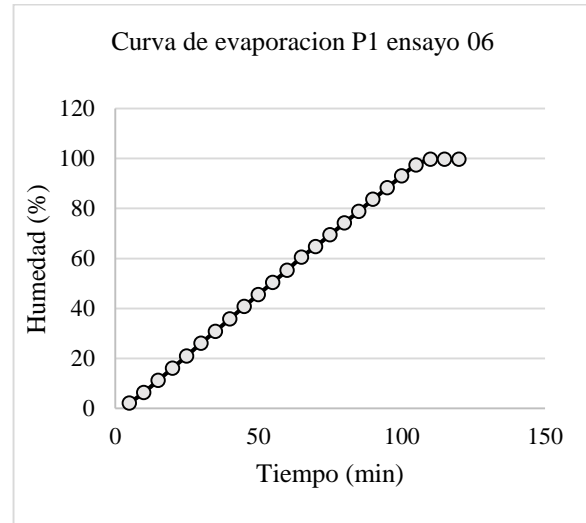
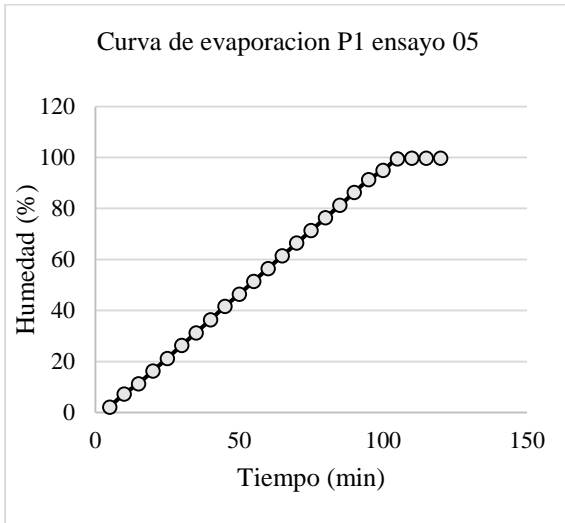


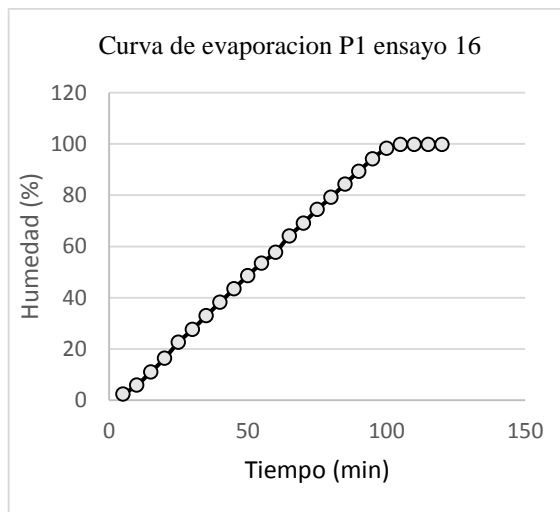
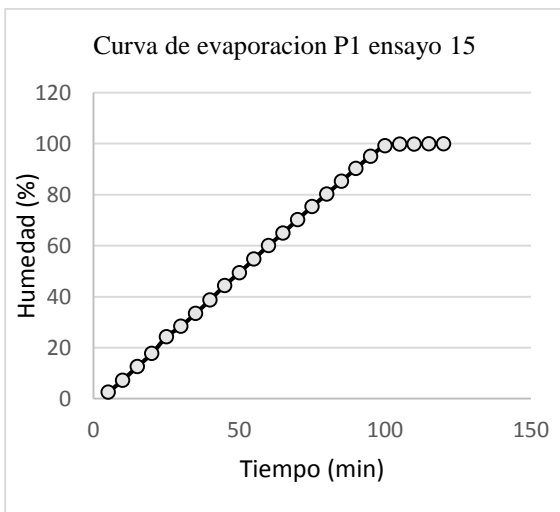
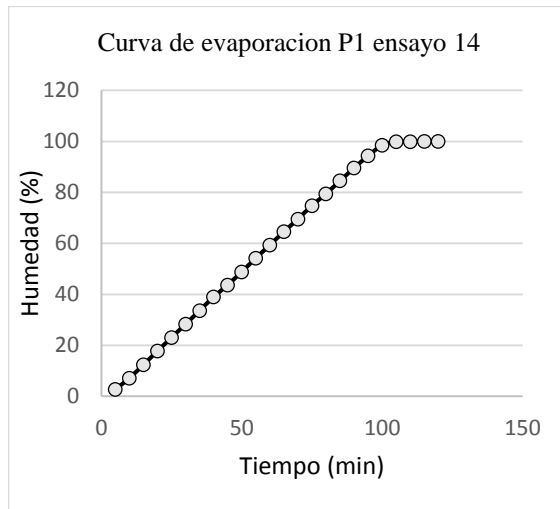
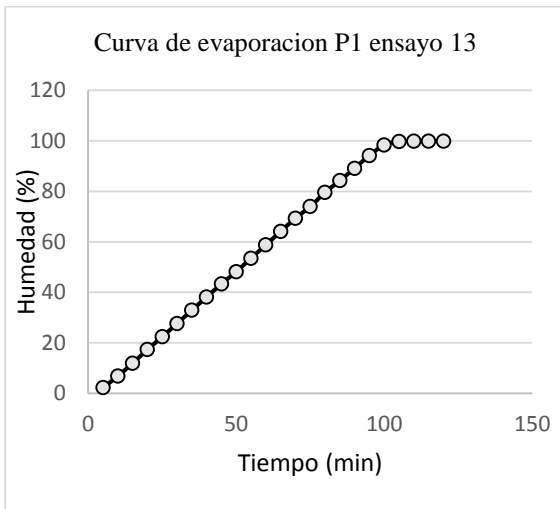
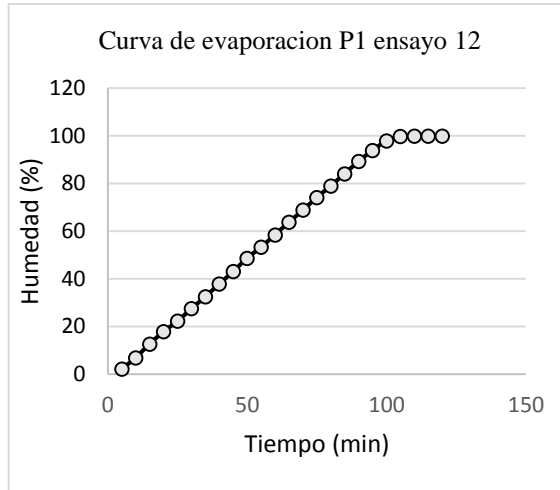
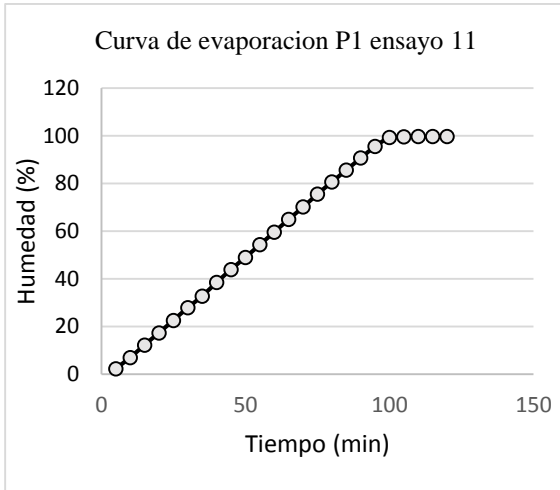
B-5 Sólidos sedimentables (mL/L) para P2

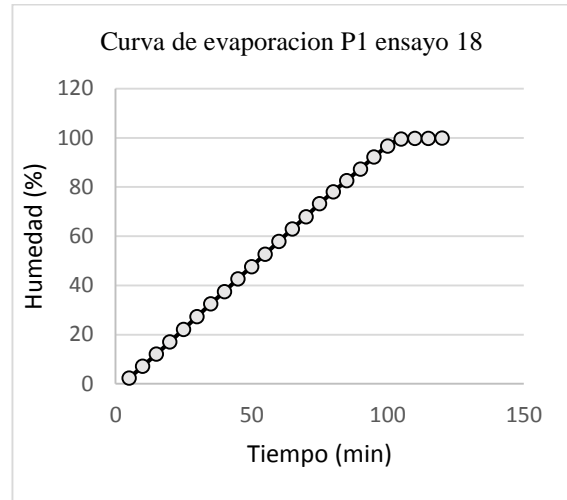
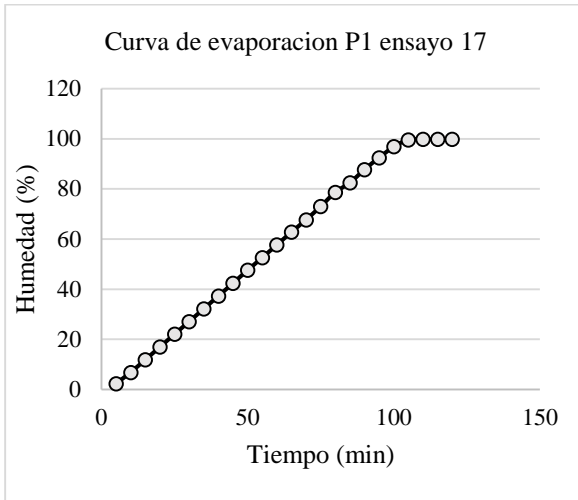


B6 Curvas de evaporación para los ensayos realizados para P1

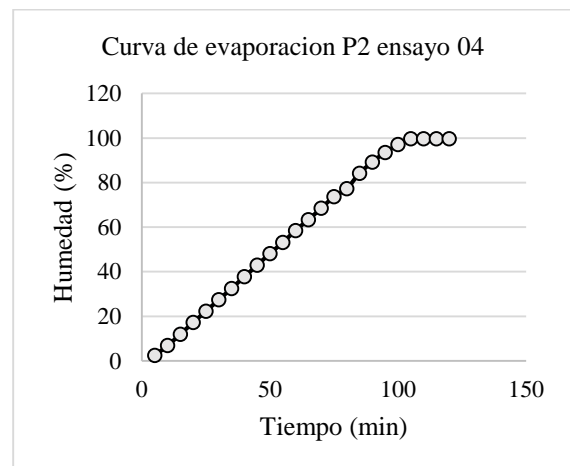
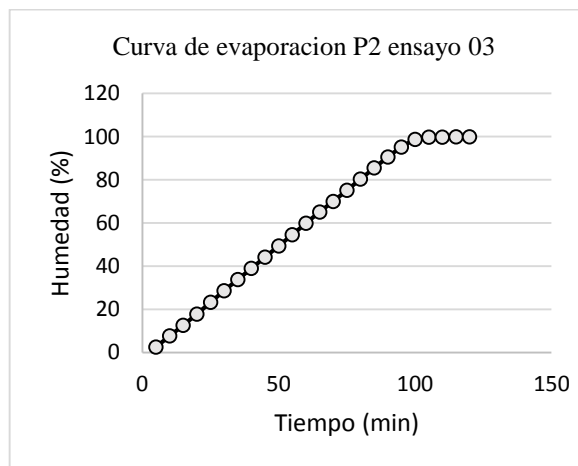
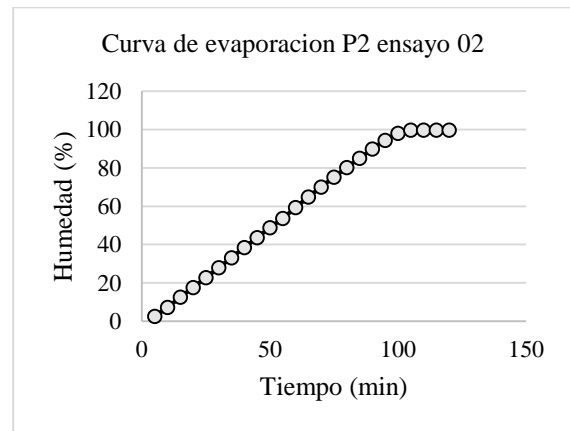
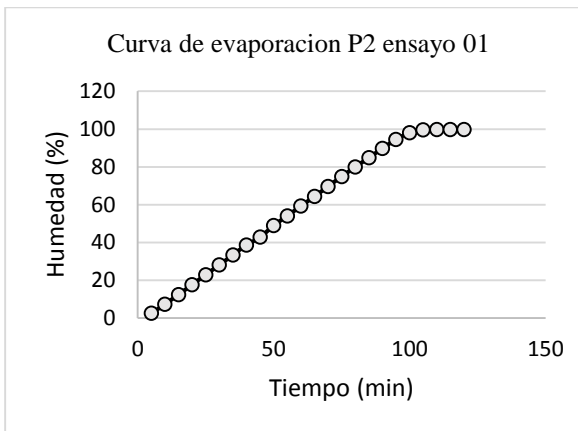


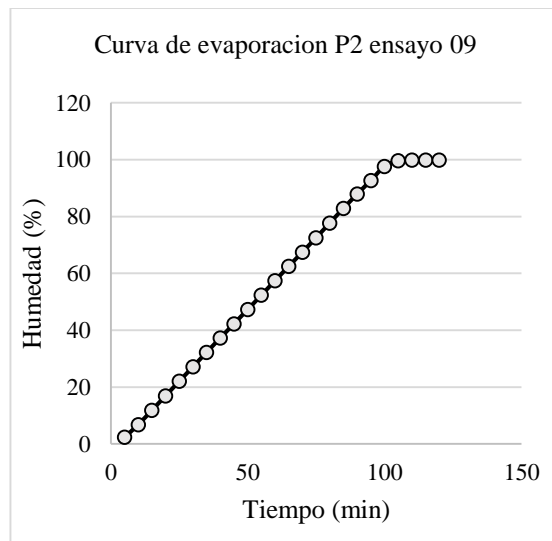
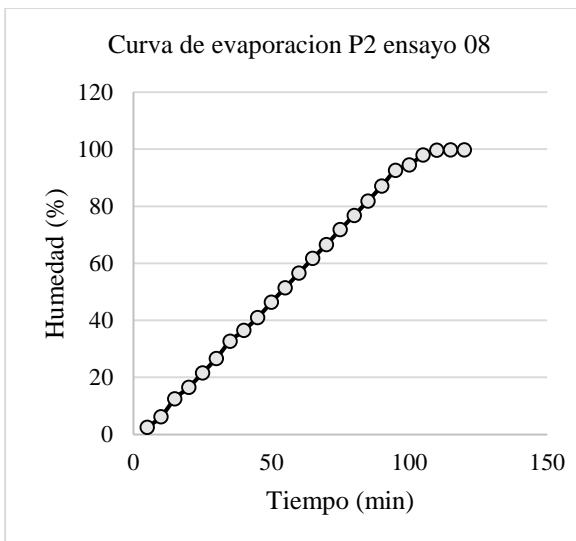
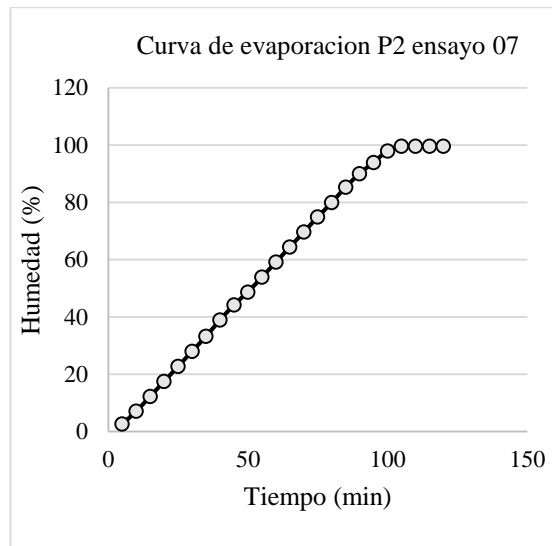
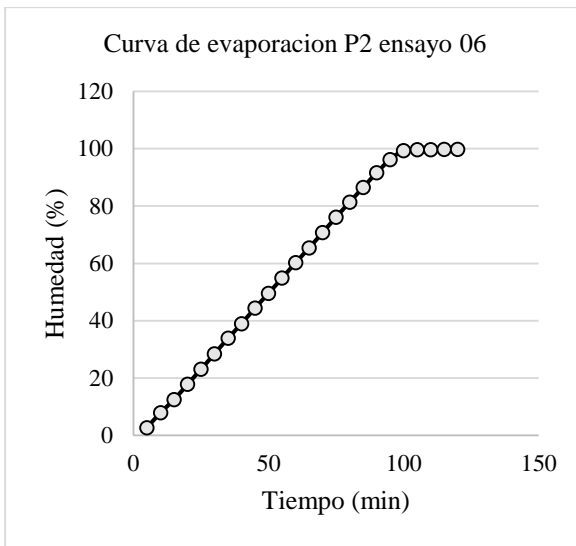
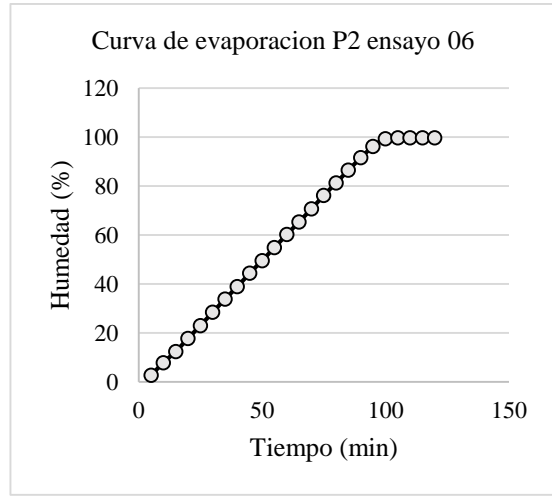
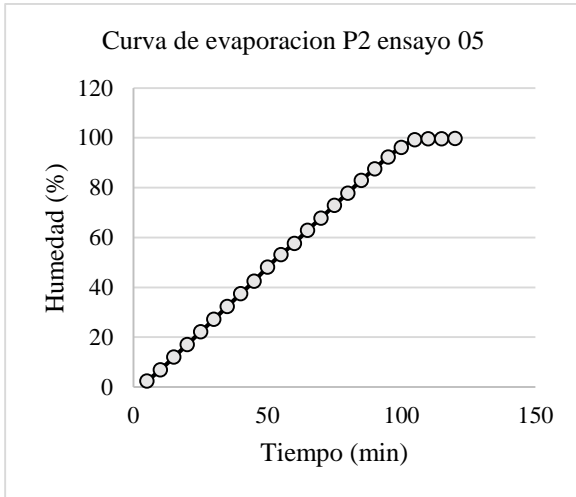




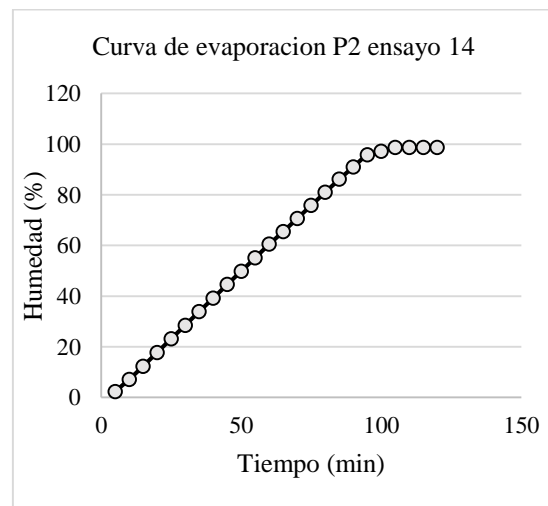
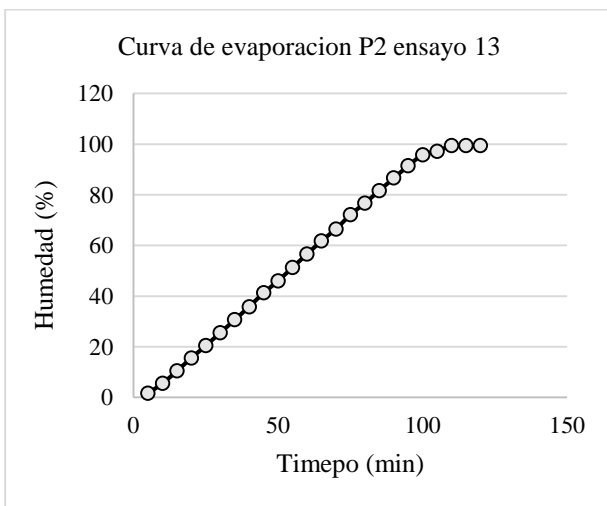
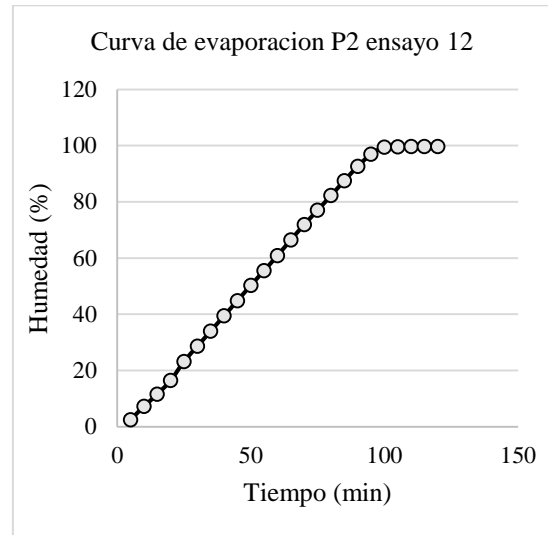
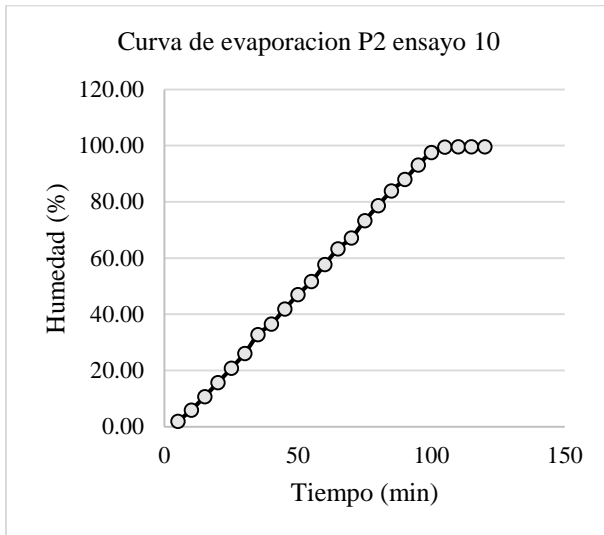
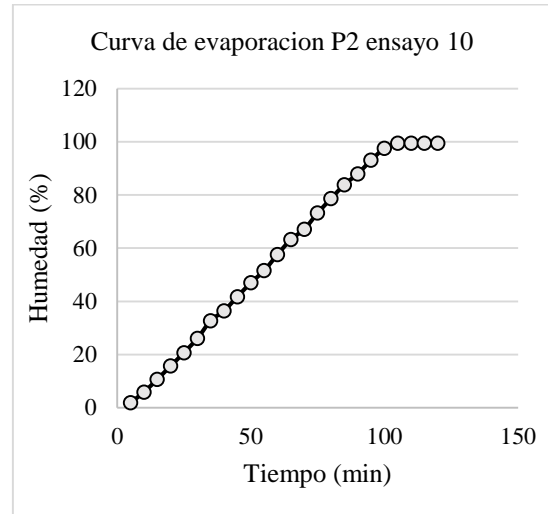
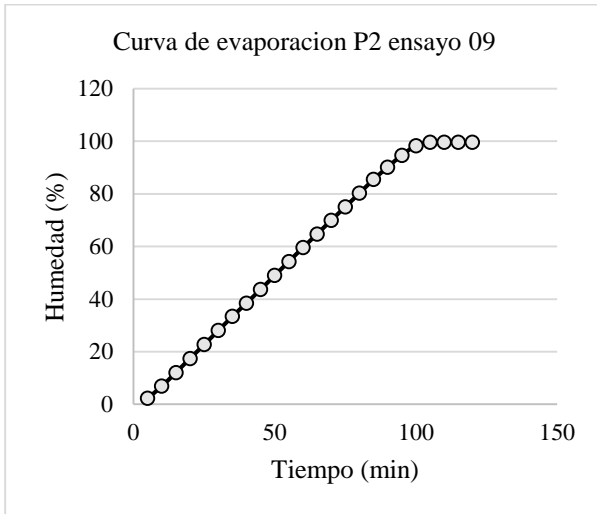


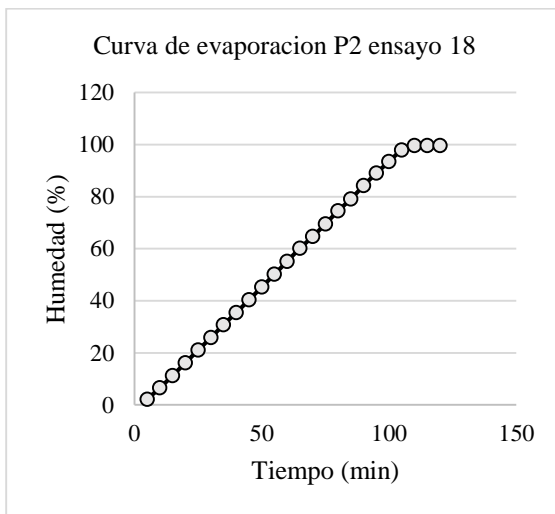
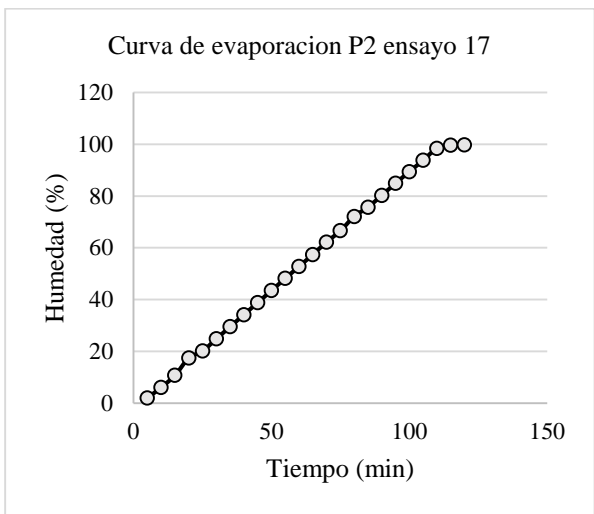
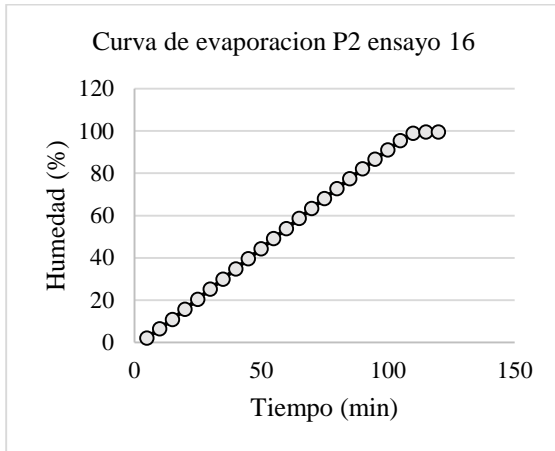
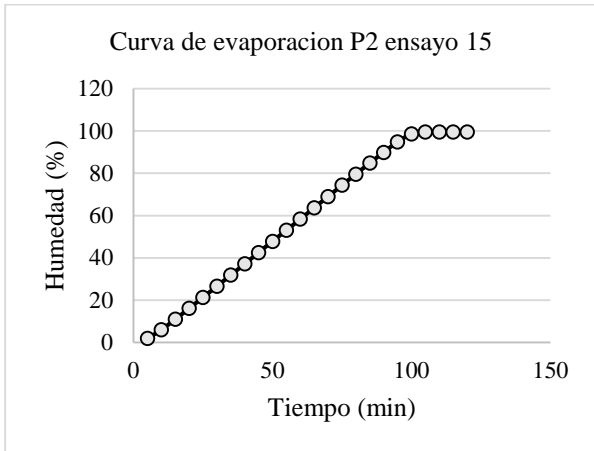
B7 Curvas de evaporación para los ensayos realizados para P2





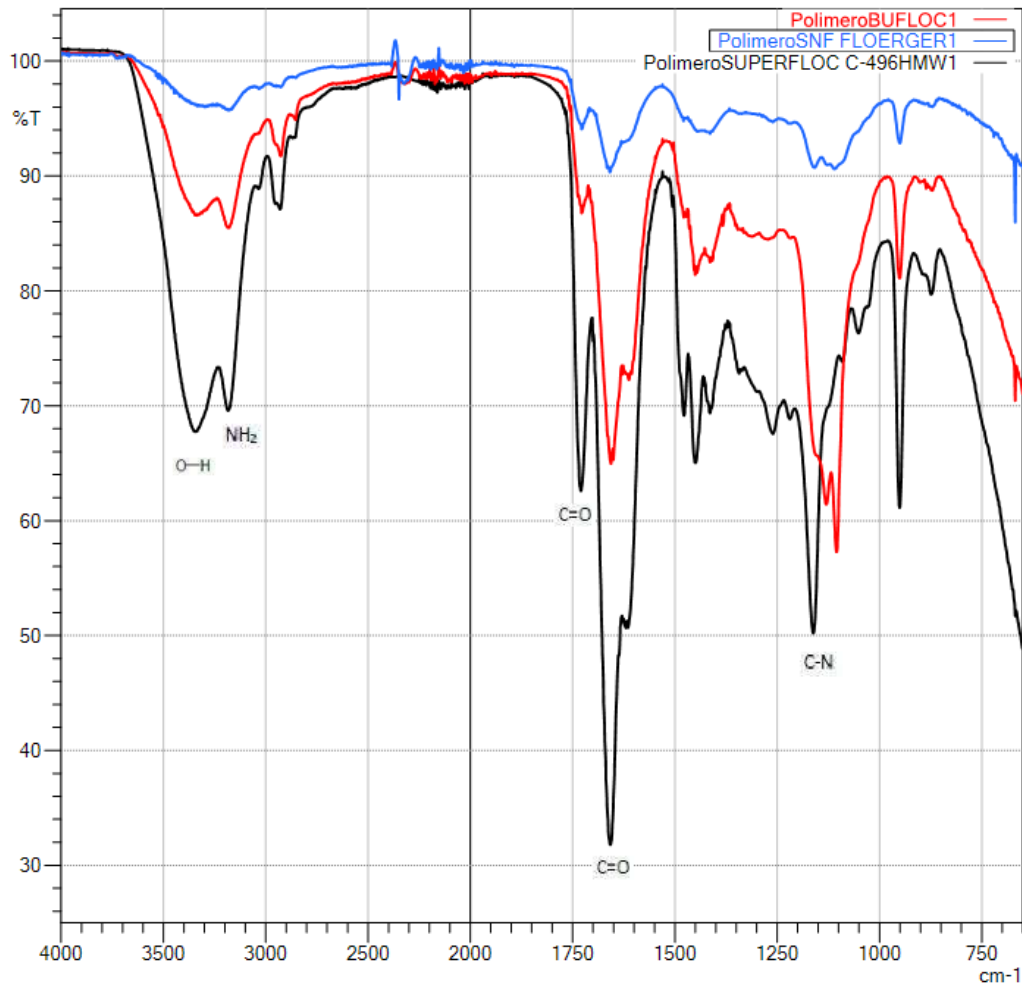




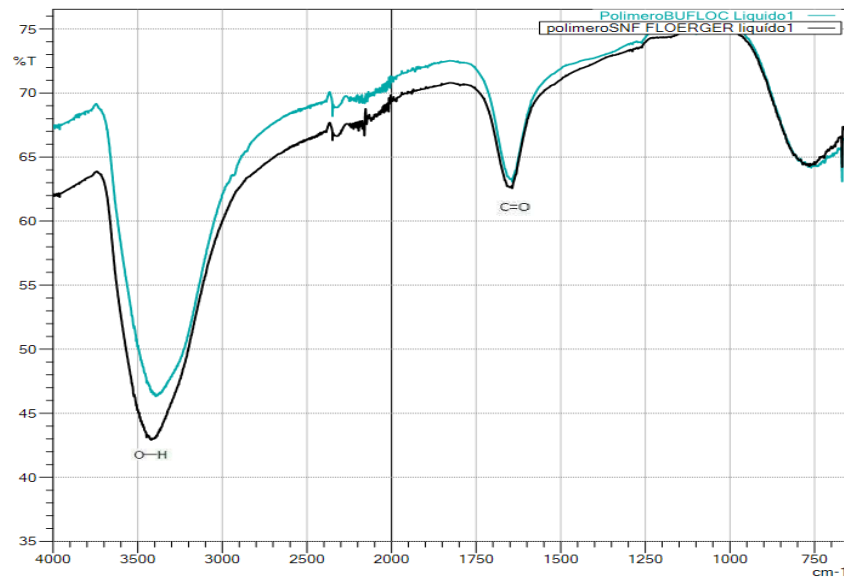


A continuación, se muestran las gráficas de análisis en Espectrofotometría Infrarrojo para identificación de grupos funcionales en los polímeros estudiados.

B-8 Comparación de los 3 polímeros utilizados en las etapas de tratamiento de lodo



B-9 Comparación de la solución de cada polímero utilizado en la etapa de acondicionamiento.



B-10 Comparación del lodo con de cada polímero optimo utilizado en la etapa de acondicionamiento.

