

127

2 Ejes



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO PARA REMOVER ARSENICO Y PLOMO DEL AGUA POR COAGULACION, SEMBRADO E INDUCCION MAGNETICA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERA QUIMICA PRESENTA: LOURDES DEL CARMEN TRUJILLO SAGEL



TESIS CON FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTO

A Dios...

A José María Trujillo Miranda (+) Tío Chema por el estímulo y confianza que me dio durante la carrera para ser alguien, gracias por su apoyo.

A mi padre Raúl Trujillo Miranda por el ser el guía y camino que me llevó a ser lo que soy. Gracias a ti papi, por tu amor, estímulo y confianza.

A mi madre Semidia S. de Trujillo gracias por ser mi mejor amiga, y hermana, por la comprensión, amor, apoyo, confianza...

A mis hermanos: Raúl, por ser comprensivo y cariñoso. Carlos Raúl, por ser paciente y tolerante. Rita Inés, por ser mi amiga sin condiciones. Iset Zuleyka, por compartir tu alegría. Iván Raúl, por la esperanza, cariño y estímulo. Gracias a todos por crearme y apoyarme en mis metas

A mis sobrinos: Arlene, Luis Raúl, Ana Paola, Ericka Inés, María Laura y Rodolfo Alberto por la inocencia y alegría. A mis cuñados: Oderay, Luis y Eric por compartir buenos ratos conmigo.

Al Consejo Técnico de la Facultad de Química por su dictamen.

A la familia Díaz Barriga por el apoyo incondicional y por el

trato familiar, gracias maestra Rosario y Don Pepe. A Charo por ser mi hermana en México y Toño por los ratos que compartimos.

Al maestro Ramón Tejeda Castillo por su colaboración incondicional en este trabajo.

Al M. en I. José L. Martínez Palacios, por su ayuda en el Instituto de Ingeniería por los conocimientos transmitidos sobre tratamiento de agua e incineración. Gracias, Ingeniero.

A Laura Cabrera Castillo por el apoyo en el análisis de este trabajo. Gracias Laura, por tu comprensión.

A Grisela Franco, por su apoyo, tolerancia y amistad.

A mis amigos: Martín, Lulú, Gabriel, Jorge, Demetrio, Eva, Tavi, Yadira, Susana, Pancho, Socorro, Don Pedro, Quetzalcóatl, Rafa y Lucho por estar siempre conmigo en los malos y buenos ratos, gracias.

Un reconocimiento a todos mis amigos, que no puedo enlistar, con quienes comparto este logro, por aportar siempre algo importante en mi vida.

LA PERSEVERANCIA DEL SER HUMANO EN UNA
META SE LOGRA SIEMPRE Y CUANDO ESTE
CONCIENTE DE LO QUE DESEA. NO IMPORTA
CUANTO TARDE.



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUÍMICA

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: PROF. GUILERMINA BURILLO AMEZCUA.
VOCAL: PROF. ROMÁN TEJEDA CASTILLO.
SECRETARIO: PROF. JESÚS GONZÁLEZ PÉREZ.
1ER. SUPLENTE: PROF. JOSÉ AGUSTÍN TEXTA MENA.
2DO. SUPLENTE: PROF. AMANDO JOSÉ PADILLA RAMÍREZ.

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

INSTITUTO DE INGENIERÍA. SECCIÓN AMBIENTAL.

ASESOR DEL TEMA: ING. JOSÉ LUIS MARTÍNEZ PALACIOS.



SUSTENTANTE: LOURDES DEL CARMEN TRUJILLO SAGEL.



ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO PARA REMOVER ARSENICO Y PLOMO
DEL AGUA POR COAGULACION, SEMBRADO E INDUCCION MAGNETICA.

INDICE

	PÁGINA
Figuras	I
Tablas	III
Simbología	V
	IX
1. INTRODUCCION	1
2. ANTECEDENTES SOBRE COAGULACION E INDUCCION MAGNETICA DE ALTO GRADIENTE.	
2.1 Generalidades	5
2.2 Procesos convencionales	10
2.2.1 Coagulación - Floculación	10
2.2.2 Sedimentación	19
2.3 Sembrado magnético	30
2.3.1 Semilla magnética	31
2.3.2 Matriz ferromagnética	33

2.4 Separación magnética de alto gradiente (SMAG)	35
2.5 Balance total de fuerzas con inducción magnética	49

3. CONDICIONES EXPERIMENTALES

3.1 Generalidades	56
3.2 Condiciones de pruebas	57
3.3 Calidad de agua	57
3.4 Soluciones	59
3.5 Dispositivo experimental	61
3.6 Diseño experimental	64

4. EXPERIMENTACION Y RESULTADOS

4.1 Experimentación	69
4.1.1 Procedimiento de la prueba	69
4.1.2 Determinaciones analíticas	71
4.2 Resultados	72
4.2.1 Arsénico	73
4.2.2 Plomo	79
4.2.3 Análisis estadístico de arsénico y plomo	86
4.2.4 Pruebas complementarias	88
4.2.5 Análisis comparativos	90

5. CONCLUSIONES	94
6. BIBLIOGRAFIA	97
ANEXOS	104

FIGURAS

- 2.1 Susceptibilidad magnética de los elementos.
- 2.2 Distribución del tamaño y clasificación de las partículas contenidas en el agua.
- 2.3 Formas coloidales.
- 2.4 Modelo de la doble capa.
- 2.5 Modelos de las teorías de la doble capa.
- 2.6 Formación de flóculos.
- 2.7 Fuerzas actuantes en una partícula.
- 2.8 Factores de fricción para flujo laminar y turbulento.
- 2.9 Campo magnético rotatorio.
- 2.10 Separador magnético rotatorio.
- 2.11 Carga móvil en dirección perpendicular a un campo magnético uniforme.
- 2.12 Campo externo magnético.
- 2.13 Fuerzas de las partículas y arreglo de matriz.
- 2.14 Coordenadas en un plano X-Z.
- 3.1 Esquema del agua pretratada.
- 3.2 Balance de masa sobre el gasto y dosis de coagulante.
- 3.3 Diagrama de flujo del sistema general.
- 3.4 Característica de la columna.
- 3.5 Esquema eléctrico.
- 4.1-4.22 Figuras de remoción del arsénico y plomo.

TABLAS

- 2.1 Clasificación de los materiales según sus características magnéticas.
- 3.1 Condiciones experimentales.
- 3.2 Calidad del agua de prueba.
- 3.3 Diseño experimental para las pruebas de tratamiento de agua.
- 3.4 Diseño de un experimento factorial de tres variables.
- 3.5 Diseño de un experimento de cuatro variables.
- 4.1 Resultados de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} para una concentración inicial de 0.5 mg/l y gasto de 150 ml/min.
- 4.2 Resultados de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} para una concentración inicial de 0.5 mg/l y gasto de 300 ml/min.
- 4.3 Resultados de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} para una concentración inicial de 1.0 mg/l y gasto de 150 ml/min.
- 4.4 Resultados de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} para una concentración inicial de 1.0 mg/l y gasto de 300 ml/min.
- 4.5 Resultados de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} para una concentración inicial de 1.5 mg/l y gasto de 150 ml/min.
- 4.6 Resultados de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} para una concentración inicial de 1.5 mg/l y gasto de 300 ml/min.
- 4.7 Comportamiento de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} en concentración de 0.5 mg/l.

- 4.8 Comportamiento de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} en concentración de 1.0 mg/l.
- 4.9 Comportamiento de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} en concentración de 1.5 mg/l.
- 4.10A Resultados de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} para una concentración inicial de 0.5 mg/l y gasto de 150 ml/min con alta intensidad magnética.
- 4.10B Resultados de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} para una concentración inicial de 1.0 mg/l y gasto de 300 ml/min con alta intensidad magnética.
- 4.11 Pruebas globales de As^{+5} y Pb^{+2} .
- 4.12 Cálculos estadísticos de As^{+5} y Pb^{+2} .
- 4.13 Resultados estadísticos de As^{+5} .
- 4.14 Resultados estadísticos de As^{+5} y Pb^{+2} .
- 4.15 Resultados estadísticos de Pb^{+2} .
- 4.16 Resultados estadísticos de As^{+5} .
- 4.17 Resultados estadísticos de Pb^{+2} .
- 4.18 Resultados estadísticos de Pb^{+2} .
- 4.19 Resultados estadísticos de As^{+5} .
- 4.20 Resultados estadísticos de As^{+5} .

SIMBOLOGIA

A	= área
A_p	= área proyectada
a, b_o	= radio de la partícula
A_H	= constante de Hamaker
b, r	= radio de la malla
B	= magnitud del vector campo magnético o inducción magnética
\vec{B}	= vector de campo magnético
C_D	= coeficiente de arrastre
C_{io}	= concentración iónica inicial
\vec{D}	= vector de campo eléctrico
d_c	= distancia entre los dos centros de la partícula coloidal.
d_s	= distancia entre las superficies de las partículas
d, d_p	= diámetro de la partícula
\vec{E}	= vector de campo eléctrico
ϵ	= constante dieléctrica
F_f	= Fuerza de flotación
F_G	= Fuerza gravitacional
F_D	= Fuerza de arrastre
F_r	= Fuerza radial
F_θ	= Fuerza polar
F_T	= Fuerza total

F_R	= Fuerza eléctrica
F_A	= Fuerza potencial de London Van der Waals
F_M	= Fuerza magnética
F_x	= Fuerza magnética en dirección X
F_y	= Fuerza magnética en dirección Y
F_z	= Fuerza magnética en dirección Z
F_i	= diferencia de la fuerza impulsada hacia abajo
g	= aceleración de la gravedad
G	= flujo másico
\vec{H}, H	= vector de campo magnético o intensidad magnética
H_r	= campo magnético radial
H_θ	= campo magnético polar
H_o	= campo magnético externo
H_i	= intensidad del campo magnético
ϕ	= flujo magnético
J, M	= magnetización
κ	= susceptibilidad magnética
m	= masa
\vec{m}	= momento magnético
m_p	= masa de la partícula
N_{Re}	= número de Reynolds
P_o	= porosidad de la matriz o partícula
S	= $\frac{\rho_s}{\rho_f} = \frac{\text{densidad del sólido}}{\text{densidad del fluido}}$

V	= volumen
v_p	= velocidad de la partícula
\vec{v}	= velocidad
V_p	= volumen de la partícula
V_r	= energía potencial repulsiva
x	= distancia del centro de la malla hacia la pared del cilindro
Z	= potencial zeta
z_i	= especie iónica
ω	= movilidad de la partícula
μ	= viscosidad absoluta
ϕ_0	= potencial eléctrico
ρ	= densidad
ρ_p	= densidad de la partícula
ρ_f	= densidad del fluido
ψ	= inducción magnética intrínseca
σ	= magnetización específica
χ	= susceptibilidad magnética
λ	= valor relativo del diámetro y el espesor de la doble capa
χ_m	= susceptibilidad magnética molar
β	= permeabilidad magnética
θ	= ángulo
η	= viscosidad cinemática
τ	= distancia recíproca de Debye-Hückel
φ	= ángulo potencial

- φ_1 = superficie equipotencial de la partícula
 φ_2 = superficie equipotencial de la malla
 δ_L = espesor laminar
 δ_T = espesor turbulento

1. INTRODUCCION

Los elementos químicos, ya sean solubles o insolubles formando sales, se encuentran distribuidos naturalmente en mayor o menor proporción en diferentes partes del planeta, que el hombre, en su afán por el avance tecnológico, los explota y redistribuye modificando parte de sus características naturales.

Al modificar las características naturales, caso específico de los metales pesados, explotarlos industrialmente por mucho tiempo y descargar residuos indiscriminadamente en cuerpos de agua se pone de manifiesto el deterioro ecológico que ocasionan al medio ambiente y al propio ser humano. A partir de estas manifestaciones de toxicidad, los países desarrollados, quienes inician esta revolución industrial, se abocan al desarrollo de tecnologías

de tratamiento y sus gobiernos a establecer normas que restrinjan las emisiones de tales contaminantes.

Paralelo con el avance tecnológico se han ido desarrollando infinidad de procesos, la mayoría aplicados a la producción en la industria. Conforme se conceptualiza la interacción e importancia que tiene el desarrollo tecnológico con la protección del medio ambiente, se orientan algunos procesos para recuperar residuos o para disminuir la contaminación. La contaminación es el proceso de la degradación del medio ambiente en la que el gobierno establece medidas de controles como las normas oficiales, la EPA, etc para cada proceso de las industrias e investigaciones. El tratamiento del agua es uno de los casos específicos; siendo éste el principal vehículo de transporte en los procesos industriales, se han requerido de múltiples estudios, ya sea de recuperación de desechos o de saneamiento.

Aparentemente, por la poca o nula atención prestada por el hombre a la protección del medio ambiente, la contaminación parece manifestarse repentinamente; sin embargo, debido a la capacidad de dilución del medio ambiente es lenta y de efecto retardado.

Como consecuencia de tal problemática ambiental, y medidas cada vez más estrictas de control, se requiere del estudio de sistemas de tratamiento más complejos, porque los convencionales adquieren mayores limitaciones de aplicación.

Conforme se avanza en el desarrollo tecnológico ya no resulta suficiente estudiar los procesos en forma aislada desde el punto de vista exclusivo de producción de un producto. Tal situación se vuelve más complicada cuando el sistema se estudia dentro de un contexto general como lo es el medio ambiente en que se encuentra.

Desde el punto de vista del control de la contaminación ambiental, no es posible seguir analizando los procesos y el tratamiento con las operaciones tradicionales de principio del siglo pasado. Es importante iniciar estudios donde se vinculen o involucren operaciones unitarias de aplicación potencial en otros campos de la investigación.

El trabajo presente, orientado a la potabilización de agua contaminada con metales pesados, plantea la posibilidad de remoción de arsénico y plomo mediante la inducción del campo magnético de alto gradiente.

La separación magnética se ha aplicado con éxito en la separación de minerales y en desulfuración de carbón. También se ha utilizado en la remoción de virus y bacterias que combinado con sembrado magnético en medios acuosos mejora su aplicación. ⁽¹¹⁾

De esta manera se ha presentado la oportunidad de aplicar la inducción magnética en combinación con los procesos de floculación, coagulación, sedimentación y el sembrado como alternativa de tratamiento de agua que contiene arsénico y plomo en solución.

El estudio consiste básicamente en acelerar el proceso de sedimentación al coagular con sales de hierro, mediante sembrado e inducción magnética. Los resultados obtenidos se comparan con aquellos observados en procesos de tratamiento mediante coagulación-sedimentación. El estudio se divide en tres partes principales; la primera consiste en una evaluación sobre los aspectos teóricos del tema; la segunda se orienta al desarrollo experimental y, por último, la evaluación de los resultados y conclusiones.

2. ANTECEDENTES SOBRE COAGULACION E INDUCCION MAGNETICA DE ALTO GRADIENTE (SMAG).

En este capítulo se recopila información bibliográfica relevante sobre los procesos de coagulación-floculación, sedimentación e inducción magnética. El propósito del mismo es dar un plantamiento global general sobre los principios, características y aplicaciones de esos procesos.

2.1 Generalidades

En tratamiento de aguas, la coagulación es el proceso de desestabilización de las partículas coloidales, que puede conseguirse por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas. Es el proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas, iniciándose el proceso en el

momento de dosificarse el coagulante. Los coagulantes, al ser agregados al agua, reducen las fuerzas que tienden a mantener separadas las partículas en suspensión. Este proceso se utiliza para la remoción de turbiedad producida por compuestos orgánicos o inorgánicos que no sedimentan rápidamente, en la eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles a la coagulación; así también se aplica en la remoción de algas y placton en general.

El proceso de la coagulación-floculación en las plantas de tratamiento se realiza separadamente adicionando primero el coagulante, luego la dispersión del coagulante (mezcla rápida), y por último la aglomeración de partículas (mezcla lenta)⁽²⁾.

La coagulación y la floculación dependen de las características físicas y químicas del agua cruda, tales como la alcalinidad, el potencial de hidrógeno, la turbiedad, el tamaño y forma de las partículas, etc.

En la sedimentación se realiza la separación de los sólidos más densos que el agua, que tienen una velocidad de caída tal que puedan llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo aceptable. La filtración, en cambio, separa aquellos sólidos que tienen una densidad muy cercana a la del agua, o que han sido resuspendidos por cualquier causa y que, por su lenta sedimentación no son removidos en el proceso anterior⁽²⁾.

Resumiendo, la coagulación, floculación y sedimentación son los procesos físicos y químicos de tratamiento convencional más socorridos en el

saneamiento del agua. Sin embargo, a pesar de todas sus ventajas, conforme existe mayor protección del medio ambiente las restricciones de aplicación aumentan, lo que hace necesario recurrir (investigar) otros procesos que puedan ser más eficientes y selectivos.

En los inicios del estudio del magnetismo se creyó que los materiales, ⁽³⁾ en presencia de un imán, simplemente eran o no atraídos. Con el avance de las investigaciones en este campo y tomando en cuenta las propiedades físicas y químicas de éstos, son clasificados como ferromagnéticos sustancias que tienen la propiedad de imantarse en un campo magnético y de conservar una imantación remanente fuera de dicho campo; ferrimagnéticos materiales muy parecido a los ferromagnéticos conservan una magnetización residual de Curie o de Néel con temperaturas superiores a la crítica se comportan en forma semejante a los materiales paramagnéticos como ferromagnéticos además son muy difícil de distinguir con las dos propiedades técnicas de medición; diamagnéticos son cuerpos que al ser sometido a campos magnéticos se imantan muy poco con la particularidad de hacerlo en el sentido inverso del campo inductor por cuya razón estos cuerpos son repelados por los imanes y los paramagnéticos son sustancias que poseen cierta propiedad de producir una gran concentración de líneas de fuerza magnética, tanto en su interior como en el campo magnético que la rodea cuando se colocan dentro de él. (tabla 2.1).

TABLA 2.1

CLASIFICACION DE LOS MATERIALES SEGUN SUS
CARACTERISTICAS MAGNETICA⁽⁴⁾.

<u>PARAMAGNETICO</u>	<u>FERROMAGNETICO</u>	<u>FERRIMAGNETICO</u>	<u>DIAMAGNETICO</u>
O ₂	Fe	Fe ₃ O ₄	Bi, Si
Li	Co	FePO ₄ ·2H ₂ O	S, N, P
Na	Ni	MnCO ₃	Cu, N, P
Al	CrO ₂	Mn(OH) ₂	Br
Mg	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	Pb, Hg, Sb
K	CrS	Mn ₂ O ₃	SiO ₂
Ca	CoO	α MnS	CaCO ₃
Mn	Co ₂ O ₃	NiO	Zn(OH) ₂
Cr	Co ₃ (PO ₄) ₂	Ti ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Tierra raras	CuO	Zn	H ₂ O
Ba	FeCO ₃ (siderita)	FeS (pirrotita)	Gases raros
NO	FeS (pirrotita)	Fe ₃ O ₄ (magnetita)	NaCl
Fe	FeS (pirita)	Oxidos de Fe y Mn	Silicato de
Silicatos de F	Sales de Mn con	α Fe ₂ O ₃ (Hematita)	Al, Ca, K, Na
Mg, Al, Ca	As, Bi, P, S y Sn	α FeOOH (Goetita)	Kaolinita

En el desarrollo de los propios estudios^(5,6) ha sido difícil definir las características magnéticas de los materiales, ya que cada investigador tiene su patrón de referencia para cuantificar la susceptibilidad (fig.2.1). De acuerdo con las estructuras atómicas el material se identifica en una clasificación específica; sin embargo, al formar nuevos compuestos o sales puede reclasificarse^(3,7).

2.2 Procesos convencionales

2.2.1 Coagulación-Floculación.

En la coagulación-floculación, el coloide es el elemento fundamental del proceso de tratamiento. Tiene dimensiones que varían entre $1 \mu\text{m}$ y $1000 \mu\text{m}$ y, si hay suspensiones gruesas, las partículas o gotas suspendidas tienen tamaños iguales o mayores de $1000 \mu\text{m}$. (fig. 2.2).

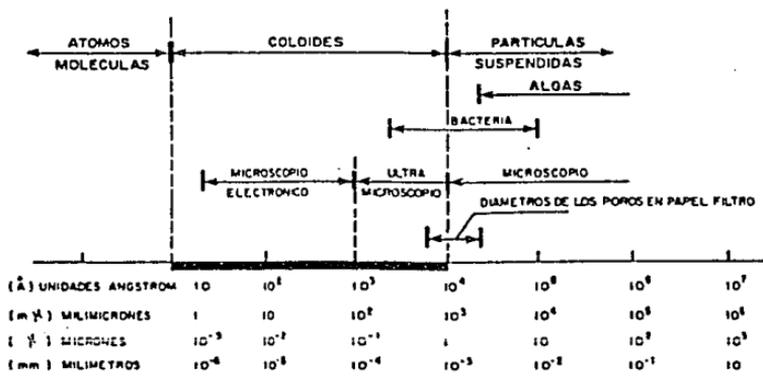


Fig. 2.2 Distribución del tamaño y clasificación de las partículas contenidas en el agua ⁽²⁾.

Los coloides tienen propiedades características que los distinguen en forma precisa. La forma del coloide tiene relación directa con sus propiedades, a pesar que no se ha hecho una clasificación adecuada de las formas coloidales. Algunos ⁽²⁾ los clasifican en isométricas y anisométricas. (fig. 2.3)



anisométricas



isométricas

Fig. 2.3 Formas coloidales ⁽²⁾.

Después de desestabilizadas, las partículas coloidales se trasladan en el líquido para hacer contacto unas con otras y aglutinarse. A este proceso se define como floculación, en el cual influye el movimiento browniano o la agitación del líquido, causa principal de las colisiones.

Los coloides se aproximarán a una distancia menor que la barrera de energía si el potencial zeta disminuye hasta llegar al punto llamado isoeléctrico ⁽²⁾. Para que un coloide flocule, es decir, que se aglutine con otro, es necesario que la partículas se aproximen a una distancia menor que L (fig. 2.4) esto es, una distancia menor que la que existe entre el centro del coloide y la cresta de la resultante o barrera de energía, la cual varía con el pH.

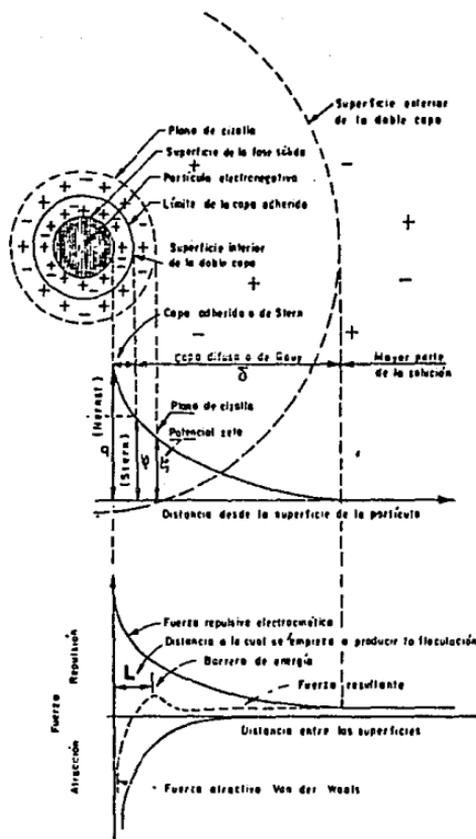


Fig. 2.4 Modelos de la doble capa⁽¹²⁾.

Se han propuesto varios modelos para explicar la doble capa eléctrica⁽⁹⁾, algunos se describen brevemente a continuación:

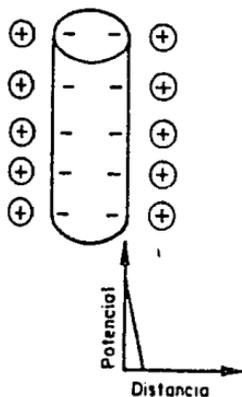
1. La teoría de Helmholtz supone que los iones positivos o contraiones del medio dispersante se acercarán a la superficie del coloide, tantos como sean necesarios para neutralizar su carga. De esa manera se formará una capa adherida alrededor del coloide, en la que caerá todo el potencial ψ (fig. 2.5 a).

2. Gouy y Chapman demostraron que la teoría de Helmholtz-Nerst no era adecuada, porque la agitación térmica del líquido tiende a separar los iones positivos de la superficie del coloide, formando una capa difusa alrededor de ella, donde el potencial cae lentamente, a una distancia, δ , dentro del líquido que la rodea. (fig. 2.5 b).

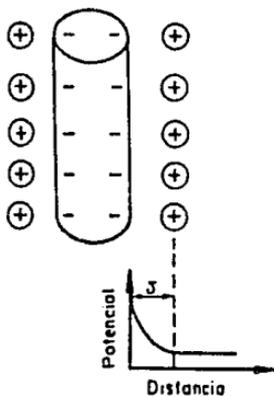
3. Stern concluyó que era necesario aceptar la posibilidad de la coexistencia de las teorías de Helmholtz y Gouy, tomando en cuenta la formación de una capa adherida y una capa difusa alrededor del coloide (fig. 2.5 c) donde considera que el potencial cae rápidamente en la capa adherida y lentamente en la capa difusa.

El aumento de la concentración del electrolito al mezclarse los contraiones de la capa difusa o de Gouy - Chapman, la compresión de la doble capa disminuye la magnitud de las fuerzas repulsivas eliminando la barrera de energía. De acuerdo con la ley de Schulze-Hardy⁽¹⁰⁾, la concentración del electrolito necesaria para realizar la coagulación depende de la carga de los iones, es decir, que es mejor cuando mayor sea su valencia^(11,12).

(a) HELMHOLTZ



(b) GOUY-CHAPMAN



(c) STERN

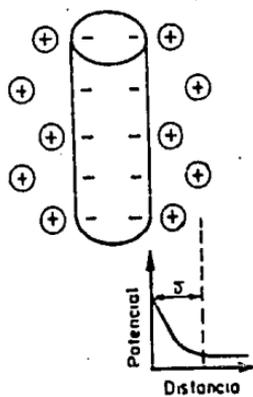


Fig. 2.5 Modelos de las teorías de la doble capa ⁽²⁾.

- a) Helmholtz.
- b) Gouy y Chapman.
- c) Stern.

La precipitación de un coloide la propicia el ión del electrolito añadido que tenga una carga opuesta a las partículas coloidales. El efecto de dicho ión se incrementa tanto más cuanto mayor sea el número de las cargas que poseen.

El modelo del puente químico⁽¹³⁾ explica la relación (estequiométrica) que existe entre la cantidad de superficie disponible o cantidad de coloide y la cantidad de coagulante agregado.

O'Melia⁽¹⁴⁾ explica, aunque el modelo del puente químico ignora el efecto de las cargas eléctricas, la estequiometría y la sobredosis, es decir, que la desestabilización de las partículas coloidales por las sales del ión metálico no se puede describir completamente.

La coagulación se puede llevar a cabo en varias fases simultáneas: como la hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existente en la suspensión; por la precipitación y formación de compuesto químicos que se polimerizan; mediante la adsorción de las cadenas poliméricas en la superficie de los coloides; o por adsorción mutua entre los coloides y la acción de barridos.

Al agregar un coagulante al agua este se hidróliza y se puede producir la desestabilización de las partículas por simple adsorción específica de los productos de hidrólisis, en donde la capa doble del coloide esta rodeada de cargas negativas o por la interacción química de la superficie en los grupos ionizables.

En las agua naturales, los coloides se encuentran siempre cargados negativamente. Como consecuencia de la solvatación debe considerarse la partícula coloidal ionizada parcialmente en su superficie, que se desplaza bajo la acción de un campo eléctrico.

Se le llama potencial Z (Zeta) a la diferencia de potencial de la carga entre la superficie que separa las parte fija y móvil de la doble capa, por una parte y el seno del líquido, por otra.

El parámetro Z es un potencial electrocinético, su valor determina la magnitud de las fuerzas electrostática de repulsión entre las partículas, y por lo tanto, su probabilidad de adhesión.

Cuando una partícula se encuentra sometida a un campo eléctrico alcanza, casi instantáneamente el potencial zeta de la solución independientemente de la coagulación - floculación, ya que el equilibrio entre las fuerzas eléctricas de atracción y la fuerza de rozamiento debida a la viscosidad del medio establece la velocidad terminal. La ecuación siguiente establece la relación entre Z y la movilidad de la partícula:

$$Z = \frac{\lambda \omega \mu}{\epsilon} \quad 2.1$$

donde:

μ = viscosidad absoluta (dyne·s / m²)

ϵ = constante dieléctrica del medio (statcoulomb²/ dyne·m²)

ω = movilidad de la partícula (m^2 / volt·s)

Z = se expresa en (volt).

El factor λ es función de los valores relativos entre el diámetro de la partícula y el espesor de la doble capa iónica. Según Helmholtz, λ vale 4π para partículas grandes y, 6π , para partículas pequeñas esféricas representadas en la ecuación de Hückel.

Cuando dos partículas esféricas iguales de un coloide se aproximan una a otra por efecto del movimiento browniano, la efectividad de la colisión de las partículas dependerá del balance de las fuerzas (repulsivas y atractivas) que resulte de la interacción.

Las partículas que permanecen dispersas en el agua generalmente tienen características coloidales porque mantienen interacciones electrostáticas de repulsión. Su estabilidad depende del balance de fuerzas que actúan en el sistema, porque en la solución poseen una área superficial.

La atracción de dos partículas en una solución dependerá del balance de las fuerzas de atracción y repulsión durante la interacción. La repulsión sucederá cuando las dobles capas de las partículas se traslapan.

Cuanto más se extienda la capa doble en la solución, que dependerá de la fuerza iónica de la solución, será mejor para la estabilidad de las partículas dispersas. Haciendo el análisis de interacción de dos partículas esféricas, De Latour desarrolló la función de potencial ϕ y determinó que

la energía potencial repulsiva, V_r , está definida por la ecuación 2.2:

$$V_r \propto \phi_0^2 (b_0/d_c)^2 e^{-\lambda d_s} \quad 2.2$$

donde:

ϕ_0 = Potencial eléctrico de la superficie coloidal. (volt)

b_0 = Radio de las partículas esféricas. (m)

d_c = Distancia entre los dos centros de las partículas coloidales. (m)

d_s = Distancia entre la superficie de las partículas coloidales. (m)

λ = Valor entre el diámetro de la partícula y el espesor de la doble capa.

La característica importante de esa ecuación es que la energía repulsiva decrece cuando el factor λ aumenta. Dicho factor representado en la ecuación 2.3 depende de la fuerza iónica de la solución, que a su vez representa concentración y valencia de las especies iónica presentes en la solución:

$$\lambda \propto z_i (c_{i0})^{0.5} \quad 2.3$$

Si la concentración de iones es lo suficientemente grande para que la doble capa sea drásticamente comprimida, entonces las fuerzas atractivas en el sistema pueden ser dominantes y causar la aglomeración de partículas. En tal caso, la fuerza más importante de atracción entre dos partículas coloidales se debe a una interacción instantánea dipolo - dipolo inducido,

conocida como fuerza de London - Van der Waals.

El parámetro de la doble capa, $1/\lambda$, depende de la concentración de los iones del electrolito presentes en el sistema. Cuando el electrolito se dosifica el parámetro de $1/\lambda$ disminuye. Por este motivo, las fuerzas y energía repulsivas disminuyen cuando el factor de λ aumenta. En la sección del balance total se detallará la aplicación de estos parámetros.

2.2.2 Sedimentación.

La sedimentación es uno de los procesos más ampliamente usado en el tratamiento de agua, ya que mediante ese proceso se logra la separación de los sólidos más densos que el agua porque tienen una velocidad de caída tal que les permite sedimentar.

Al sedimentar, los coágulos hacen un efecto de barrido, atrapando en su caída nuevas partículas que se incorporan a los microfloculos en formación (fig.2.6). La aparición de hidróxidos metálicos insolubles en agua, al precipitar, pueden contribuir también y, en algunos casos, producir por sí solos el efecto de barrido. Las precipitaciones y reacciones que se llevan a cabo durante el proceso de coagulación son dependiente de la alcalinidad del agua, el pH, y la temperatura.

En términos generales la sedimentación se divide en dos etapas: sedimentación de partículas discretas, que es aquella en la cual los sólidos no cambian de densidad, tamaño o forma al descender en el líquido;

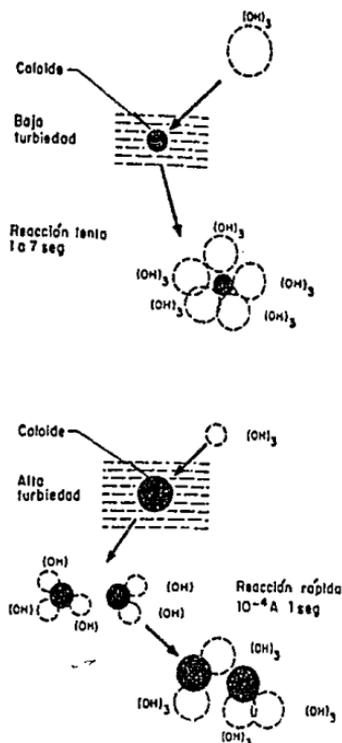


Fig. 2.6 Formación de flóculos⁽²⁾.

a) por efecto de barrido

b) por adsorción

y sedimentación de partículas aglomerables, aquella en que los sólidos al descender en el líquido se adhieren o aglutinan entre sí, cambiando su forma, tamaño y peso específico durante la caída⁽²⁾.

Las partículas (discretas y aglomerables) están sujetas a diferentes fuerzas (iónicas, Van der Waals, gravedad, flotación, etc.) cuando se encuentran en un líquido. Dependiendo del balance de esas fuerzas se define el estado de equilibrio final de éstas.

En un fluido estático una partícula que cae esta sometida a dos fuerzas la de flotación F_f , que es igual al peso del volumen de líquido desplazado por la partícula; de acuerdo con el principio de Arquímedes, la gravitacional F_g , es el peso de la partícula. (fig. 2.7)

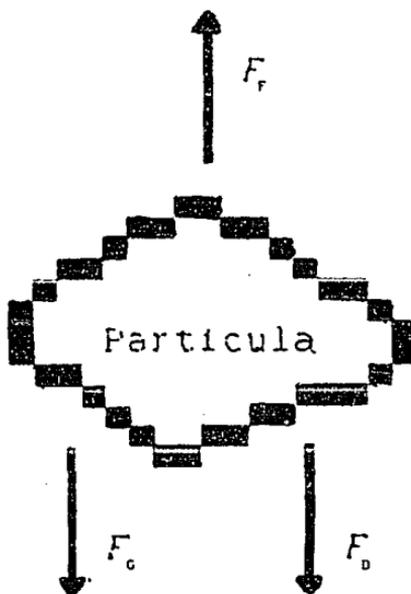


Fig. 2.7 Fuerzas actuantes en una partícula.

Las fuerzas actuantes de las partículas son las siguientes:

Fuerza gravitacional:

$$F_G = m g \quad 2.4$$

$$F_G = V_p \rho_p g \quad 2.5$$

Fuerza de flotación:

$$F_F = V_p \rho_f g \quad 2.6$$

Fuerza de arrastre:

$$F_D = \frac{C_D A_P \rho_f v_s^2}{2} \quad 2.7$$

El balance de la fuerza sobre una partícula discreta esta dado por la segunda Ley de Newton la suma de las fuerzas se evalúa con la siguiente ecuación:

$$m \frac{d \vec{v}_s}{dt} = \vec{F}_G + \vec{F}_F + \vec{F}_D \quad 2.8$$

donde:

m = masa de la partícula. (Kg)

\vec{v}_s = velocidad de la partícula. (m/s)

\vec{F}_G = Fuerza gravitacional. (N)

\vec{F}_F = Fuerza de flotación. (N)

\vec{F}_D = Fuerza de arrastre. (N)

C_D = coeficiente de arrastre o de fricción.

A_p = área proyectada de la partícula en dirección del movimiento. (m^2)

ρ_p = densidad del sólido o partícula. (kg/m^3)

ρ_f = densidad del fluido. (kg/m^3)

Como siempre existe un movimiento relativo entre la partícula y el fluido que la rodea, éste ejerce un arrastre sobre la primera. De las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6 la fuerza que está impulsando la partícula hacia abajo será la diferencia:

$$F_1 = F_G - F_F \quad 2.9$$

$$F_1 = g V_p (\rho_p - \rho_f) \quad 2.10$$

donde:

ρ_p = densidad del sólido. (kg/m^3)

ρ_f = densidad del fluido. (kg/m^3)

g = aceleración de la gravedad. (m/s^2)

V_p = volumen de la partícula. (m^3)

Cuando la fuerza de arrastre es igual a la gravitacional del sólido la partícula adquiere su velocidad de asentamiento o velocidad límite, que es constante durante el resto del descenso.

Para hallar esta velocidad se igualan las ecuaciones 2.7 y 2.10

$$g V_p (\rho_p - \rho_f) = C_D A_p \rho_f \left[\frac{v_s^2}{2} \right]$$

$$v_s = \left[\frac{2g}{C_D} \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \frac{V_p}{A_p} \right]^{1/2} \quad 2.11$$

en donde:

C_D = coeficiente de arrastre o de fricción.

A_p = área proyectada de la partícula en dirección del movimiento. (m^2)

ρ_f = densidad del fluido. (kg/m^3)

g = aceleración de la gravedad. (m/s^2)

ρ_p = densidad del sólido. (kg/m^3)

V_p = volumen de la partícula. (m^3).

v_s = velocidad del sólido. (m/s)

Un fluido es una sustancia incapaz de resistir fuerzas o esfuerzos de corte sin desplazarse, mientras que un sólido sí puede hacerlo^(15,16).

Los fluidos se clasifican generalmente en líquidos y gases. El más utilizado es el líquido que está sometido a fuerzas intermoleculares que lo mantiene unido de tal manera que su volumen es definido pero su forma no. Los líquidos son ligeramente compresibles y su densidad varía con la temperatura y la presión.

La relación de un esfuerzo cortante y gradiente de velocidad se conoce como relación newtoniana.

La fricción interna o los esfuerzos pueden generarse por la viscosidad de un fluido, como también la turbulencia provoca esfuerzos cortantes. La viscosidad es una propiedad de los fluidos que causa fricción. La importancia de la fricción en las situaciones físicas depende del fluido y de la configuración física o patrón de flujo.

Si la fricción es despreciable el flujo es ideal. La fricción puede originarse por viscosidad o por turbulencia. La viscosidad es una medida de la resistencia de fluido al corte cuando el fluido está en movimiento (un fluido no puede resistir esfuerzo de corte cuando el fluido está sin moverse y un sólido sí).

Es conveniente dividir los fluidos reales en diferentes regiones cada una de las cuales se pueden considerar ideal, viscosa o turbulenta.

Los términos flujos laminar y flujos viscosos se usan como sinónimo para indicar que un fluido fluye en láminas o capas, en oposición al flujo turbulento en donde las componentes de la velocidad tienen fluctuaciones turbulentas al azar que se imponen sobre sus valores medios. Lo que determina la clase de flujo es dado por la velocidad y la configuración o tamaño del conducto. A medida que aumenta la velocidad el flujo cambiará de laminar a turbulento pasando por un régimen de transición.

Para el caso particular de sólido esférico el área proyectada y el volumen están dados:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad V = \frac{\pi d^3}{6} \quad 2.12$$

Por lo tanto la relación de V y A es:

$$\frac{V}{A} = \frac{\pi d^3 / 6}{\pi d^2 / 4} = \frac{2}{3} d \quad 2.13$$

donde : d = diámetro de la partícula. (m)

De la ecuación 2.13 en la 2.11 se obtiene la ecuación 2.14:

$$v_s = \left[\frac{2g}{C_D} \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \frac{2}{3} d \right]^{1/2} \quad 2.14$$

$$v_s = \left[\frac{4g}{3C_D} \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} d \right]^{1/2} \quad 2.15$$

En la figura (2.8) se presenta una gráfica del coeficiente de arrastre C_D en función de N_{Re} en la forma de una curva continua. Para $N_{Re} > 0.5$ la constante C_D se aproxima a $C_D = 24 / N_{Re}$ de acuerdo con la Ley de Stokes donde: N_{Re} = número de Reynolds.

$$N_{Re} = \frac{v_a d}{\mu}$$

$$C_D = \frac{24 \mu}{v_a d}$$

2.16

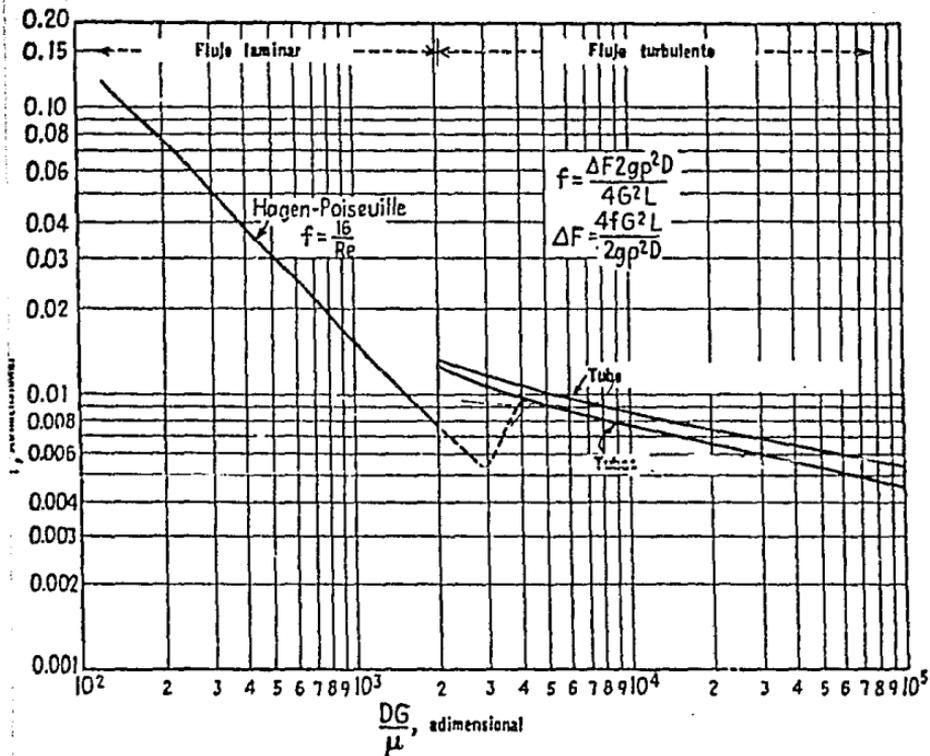


Fig 2.8 Factores de fricción para flujos laminar y turbulento⁽¹⁷⁾.

Sustituyendo la ecuación 2.16. en 2.15 se obtiene:

$$v_s = \left[\frac{4 g (\rho_p - \rho_f) d}{3 \left(\frac{24 \mu}{d v_s} \right) \rho_f} \right]^{1/2} \quad 2.17$$

$$v_s = \left[\frac{g (\rho_p - \rho_f) d^2}{18 \rho_f \frac{\mu}{v_s}} \right]^{1/2} \quad 2.18$$

en donde: $\frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} = (s - 1)$

$$v_s = \frac{g}{18 \mu} (s - 1) d^2 \quad 2.19$$

En la región de flujo viscoso el N_R es mayor a 0.2×10^3 y C_D se aproxima a 0.40

$$v_s = \left[3.3 g \left[\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right] \right]^{1/2} d \quad 2.20$$

En las partículas esféricas se sustituye la relación correspondiente por su diámetro. Si el flujo es laminar, según Stokes se aplica la ecuación 2.15 cuando el N_{Re} se encuentra en el intervalo de 2 a 500⁽¹⁷⁾.

Para remover las partículas entre .1 y 100 micras (μ) el N_{Re} debe mantenerse en un intervalo de 0.001 a 10. Por último en la región de transición o intermedia entre los dos extremos se calcula por la ecuación de coeficiente de fricción de Newton:

$$C_D = \frac{24}{N_{Re}} + \frac{3}{\left(N_{Re}\right)^{1/2}} + 0.34 \quad 2.21$$

existe la dificultad de que hay que conocer previamente v_s para encontrar N_{Re} y C_D . Sin embargo, cuando el N_{Re} es de 1-1000 se tiene:

$$C_D = \frac{18.5}{N_{Re}^{0.6}} \quad 2.22$$

y la velocidad de sedimentación es:

$$v_s = \left[2.32 (\rho_p - \rho_f) d^{1.6} \frac{\mu_o^{0.4}}{\rho_f} \mu_o^{0.6} \right]^{0.714} \quad 2.23$$

Las correlaciones anteriores para la velocidad de asentamiento son estrictamente aplicables sólo a fluidos newtonianos en los que la viscosidad es independiente del índice del esfuerzo cortante y la duración del mismo.

2.3 Sembrado magnético

El sembrado magnético consiste básicamente en introducir en una solución o suspensión partículas susceptibles al campo magnético, para que sirvan como medio indirecto de atrapamiento de elementos, sustancias o partículas que se deseen remover. De esa forma es posible precipitar elementos en solución, atraer al campo partículas susceptibles o indirectamente atraer partículas como flóculos, mediante el sembrado de una partícula (semilla) magnética atraída por el campo magnético.⁽¹⁰⁾

2.3.1 Semilla magnética

La semilla magnética puede estar caracterizada por diversos tipos de materiales entre los cuales se encuentran los óxidos de hierro los cuales se usan en los procesos de coagulación floculación y sedimentación, el fenómeno físico del atrapamiento de las partículas magnéticas se debe a las fuerzas que interactúan en el sistema. La semilla magnética puede ser de origen natural o sintética de diferentes grado de pureza. Hartig et al.⁽¹⁸⁾, el grado de pureza se determina con la frecuencia de colisión (ciclos).

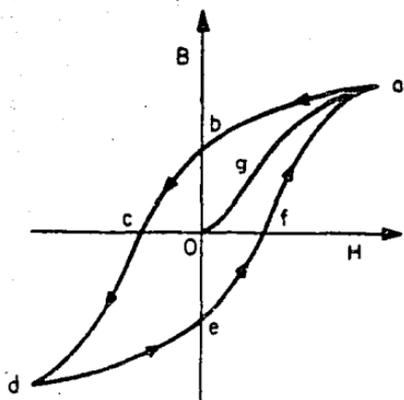


Fig. 2.9 Campo magnético y la magnetización^(B).

El estado magnético de un mineral, sea una partícula (semilla magnética) o cualquier material de hierro, depende del campo magnético al que se someta y del estado magnético del propio material. La dependencia del campo de la magnetización es posible describirla mejor tomando como base la fig 2.9, en la cual se relacionan el campo magnético y la magnetización.

Al inicio la partícula se encuentra desmagnetizada, conforme se aplica campo magnético su magnetización aumenta lentamente g; sin embargo, si el campo aplicado es pequeño y desaparece, la magnetización se vuelve cero.

Cuando se aplica un campo magnético fuerte que sea crítico, se experimenta un cambio importante en el comportamiento magnético de la partícula, es decir, existe magnetización de saturación, que al suspenderse el campo no

sigue la trayectoria de disminución como en el inicio; al fenómeno se le conoce como desarrollo de histéresis.

Al desaparecer el campo magnético bajo las condiciones anteriores la partícula quedará con una magnetización de saturación remanente, b. Cuando el campo se invierte la magnetización se vuelve cero y el valor de éste se conoce como fuerza coerciva o coercividad del material, c. Si se continúa induciendo un campo magnético puesto a la partícula, al valor aplicado en un comportamiento lineal de magnetización de la partícula se le llama coercividad remanente. Al cambio de campo magnético hasta la magnetización de saturación de la partícula se le conoce como ciclo de histéresis⁽⁸⁾.

Cada material, dependiendo de sus características mineralógicas y propiedades, tienen un comportamiento específico del ciclo de histéresis; así, por ejemplo, la magnetita, Fe_3O_4 , produce un ciclo de histéresis delgado y alargado; en cambio, la hematita, αFeO_3 , lo produce ancho y aplanado. El comportamiento de los ciclos de histéresis también depende de la variación del tamaño de las partículas, forma y estructura; aún la temperatura tiene cambios en la intensidad de la remanencia causada por el tamaño y cantidad de partículas.

Las características importantes de una semilla magnética son:

1. Que al aumentar su cantidad, suministra más sólidos en el proceso e incrementa la frecuencia de colisión de las partículas.
2. Que cuanto la fuerza magnética de la matriz es baja, el sistema lo

retiene; si aumenta la intensidad, la retención de las partículas se incrementa.

3. Que al adherirse en la matriz magnética se propicia la fuerza de interacción del sistema.

2.3.2 Matriz ferromagnética

La matriz es el medio que se utiliza para atrapar las partículas en sistemas aplicando inducción magnética.

Existen diferentes tipos de matrices: éstas pueden ser esferas, fibras, láminas planas, etc; las cuales se seleccionarán dependiendo de las características del mineral (sembrado) que se emplee según sea el caso en estudio⁽¹⁹⁾.

Si en la separación de partículas paramagnéticas el campo es suficientemente fuerte para lograr tal propósito, entonces se requiere inducir un gradiente de campo magnético. De esa forma las partículas paramagnéticas se depositarán en la matriz (zona de atrapamiento) independientemente del sembrado que se emplee.

Para seleccionar una matriz se deben tomar en cuenta las características siguientes:

- Que el gradiente de campo magnético sea máximo.
- Que colecciona un área superficial por unidad de volumen de la zona colección.

-Que exista una capacidad de limpieza de la matriz de las partículas ferromagnéticas con poco o ningún tiempo fuera de servicio del separador.

Que exista una relación de permeabilidad: flujo de fluido; se para ello se necesita alimentar el líquido a presión para tener una tasa de flujo adecuada.

-Que tenga una permeabilidad magnética para lo cual se requiere particularmente que en la zona de separación exista un espacio de tipo de circuito magnético de hierro, ya que una matriz muy permeable permite que una fuerza de mayor campo con menor consumo de energía.

Como existen muchas características para definir los diferentes tipos de matriz, en este caso se considera importante describir el tamaño y porosidad como parámetros que describen las características de la matriz.

Al mantenerse la porosidad constante y disminuir el tamaño característico de la matriz, suceden los cambios siguientes: el gradiente de campo promedio y máximo se incrementa en proporción inversa al tamaño característico, la fuerza magnética aumenta en proporción directa a la relación del tamaño de la matriz con el tamaño de la partícula; aumenta el área superficial de colección; se dificulta la limpieza de la matriz; la relación permeabilidad:flujo disminuye en proporción directa al cuadrado del tamaño de la matriz y, por último, la permeabilidad magnética no cambia. En el caso de que la geometría, tamaño característico de la matriz y campo externo permanezcan constantes, con un incremento de la porosidad, suceden los cambios siguientes: el gradiente de campo máximo permanece

igual, el gradiente de campo promedio disminuye, el área superficial de colección disminuye, la limpieza de la matriz es más fácil, se incrementa la relación permeabilidad:flujo, y por último la permeabilidad magnética disminuye.

El material que se utilice para la matriz debe ser poco magnetizable⁽¹⁹⁾, de tal forma que retenga mínima magnetización cuando desaparece el campo externo y se desprenda las partículas; de lo contrario no es posible remover las partículas ferromagnéticas sin desmontar la matriz.

2.4 Separación magnética de alto gradiente. (SMAG).

La separación magnética⁽⁶⁾ es un proceso que se inició su estudio a principio de este siglo. Con la investigación se beneficiaron algunas industrias porque lograron la remoción, sedimentación, recuperación o concentraciones de minerales de hierro de micro tamaño a grandes gastos. En la fig. 2.10 se representa el esquema de un separador magnético rotatorio utilizado en la separación de partículas susceptibles al campo de aquellas no susceptibles. Así también, el campo magnético se ha aplicado en la purificación de sólidos tales como: arcillas, partículas magnéticas, mineral del carbón 12, desulfuración de carbón, fosfatos, aceites, bacterias y algunos metales pesados entre otros. Con el desarrollo tecnológico industrial se ha planteado la recuperación de sólidos mediante la aplicación de nuevas tecnologías; así es como surgen los primeros estudios sobre la separación magnética de alto gradiente (SMAG)^(4,5,6,20).

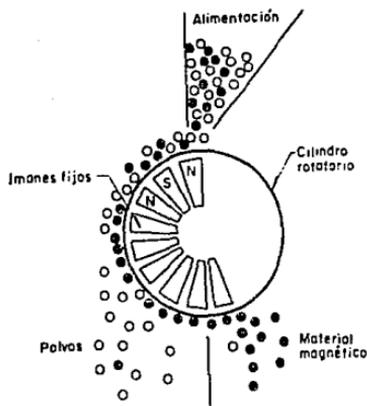


Fig. 2.10 Separador magnético rotatorio.

que se considera como un método de reciente aplicación comparado con otros^(21,22). Se caracteriza por la separación de partículas pequeñas de poca susceptibilidad magnética tales como: Al_2O_3 , CuO , ZnO , $\text{Zn}(\text{OH})_2$, TiO_2 , Ti_2O_3 , SiO_2 , etc., que la separación magnética convencional no logra retener por los grandes gastos aplicados.

Las fuerzas ejercidas por una carga móvil sobre otra, crea un campo magnético en el espacio que la rodea, y es éste campo el que ejerce una fuerza sobre otra carga que se mueve en él. Además del campo magnético creado alrededor de una carga móvil, existe el campo electrostático que rodea la carga, esté ésta o no en movimiento. Una segunda partícula cargada, situada en estos campos combinados, experimenta una fuerza debida al campo eléctrico, ya sea que se halle en movimiento o en reposo. El campo

magnético ejerce una fuerza sobre ella únicamente si ésta en movimiento. Hay muchas analogías entre los campos eléctricos y magnéticos, aunque ambos son esencialmente diferentes en cuanto a su naturaleza y se refieren a conjunto de fenómenos por entero distintos. Lo mismo que el eléctrico, el campo magnético es una magnitud vectorial que tiene en cada punto un cierto valor y una determinada dirección. Se aplican dos vectores eléctricos \vec{E} y \vec{D} para describir distintos aspectos de un campo eléctrico; conviene considerar dos vectores para el campo magnético, \vec{B} y \vec{H} , relacionados análogamente.

En general, el vector \vec{E} o \vec{B} tiene dirección igual a la tangente en un punto de la línea de fuerza o de campo. Por convenio, el número de estas líneas por unidad de superficie normal a su dirección se hace igual al valor de la inducción; por consiguiente, la inducción en un punto puede expresarse en líneas sobre unidad de superficie. En el sistema mks una línea de inducción se denomina weber y la inducción magnética B se expresa en webers sobre metro cuadrado (wb/m^2). En el sistema electromagnético una línea de inducción se denomina maxwell, y la inducción magnética se expresa en maxwells sobre metro cuadrado la cual también se le denomina Tesla ($\text{kg}/\text{A}\cdot\text{s}^2$).

El número total de líneas de inducción que atraviesan una superficie se denomina flujo magnético a través de la superficie y se representa por Φ . Mediante el concepto de líneas de fuerzas introducido por Faraday como un medio auxiliar para representar campos eléctricos (o magnéticos)⁽²⁴⁾ por este estudio se deduce que la ecuación general se expresa así:

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

2.24

y en el caso especial en que \vec{B} es uniforme y normal a la superficie finita A, y la ecuación 2.25 se expresa:

$$\phi = B A$$

2.25

En el sistema mks, el flujo magnético se expresa en weber. Puesto que la inducción es sólo la magnitud de la inducción en un punto es igual al flujo por unidad de superficie, se denomina con frecuencia densidad de flujo.

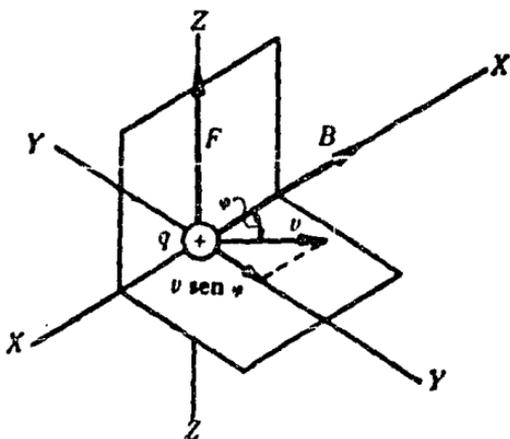


Fig. 2.11 Carga móvil en dirección perpendicular a un campo magnético uniforme.

La figura 2.11 representa las líneas de inducción son rectas paralelas al eje X e igualmente espaciadas. Una carga positiva q, que se mueve con velocidad \vec{v} , perpendicularmente a la dirección de la inducción, está sometida, según demuestra la experiencia, a una fuerza \vec{F} en la dirección indicada, perpendicular a su velocidad \vec{v} y la inducción \vec{B} . El valor de esta fuerza está dado por $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$ y se expresa en Newton. Los vectores \vec{B} , \vec{v} y \vec{F} forman una terna de ejes rectangulares. En algunos casos especiales la velocidad de la carga móvil es perpendicular a la dirección del campo. Con más generalidad, si el vector velocidad, \vec{v} forma un ángulo φ con el vector inducción, \vec{B} , como lo indica la figura 2.11 por lo consiguiente, la fuerza es proporcional a la componente de la velocidad y perpendicular a la dirección de la inducción magnética.

El separador esta diseñado en forma solenoidal⁽⁴⁾ en donde las líneas del campo magnético son paralelas al del flujo del sistema⁽²⁵⁾. El SMAG está distribuido por un empaque de material magnético (fibras, mallas, partículas, etc.), y una columna acrílica que al inducir el campo magnético magnetiza el empaque llamado también matriz. Al magnetizarse las partículas con el sembrado que contiene el fluido se quedan atrapadas en dicho empaque o matriz siempre y cuando la fuerza magnética sea mayor que la fuerza de arrastre y la fuerza de gravedad⁽¹⁰⁾.

El gasto, la fuerza de arrastre, el campo magnético, la fuerza de flotación actúan entre sí en la región separada del empaque. La recuperación de las partículas magnéticas depende del radio del dispositivo en donde ejerce el

campo magnético. La susceptibilidad magnética y tamaño de la partícula son características muy importantes para incrementar la intensidad magnética y el valor de la intensidad no cambia al saturarse con el sembrado⁽⁶⁾.

Si se aplica más de una semilla magnética, la de mayor magnetización va hacia el centro del solenoide, mientras la otra o las demás semillas se adhieren en la región de afuera por ser baja su magnetización. A pesar de que las partículas paramagnéticas, cuando aumentan su campo, incrementan en el mismo orden de magnitud la fuerza gravitacional, distinto sucede con las partículas ferromagnéticas por aumentar su cantidad de masa el campo magnético externo obtiene valores muy bajos.

Para determinar las fuerzas que actúan en un separador magnético se deben calcular las fuerzas magnéticas en función de las propiedades de las partículas y los parámetros del dispositivo.

La fig 2.12 representa la imantación de una barra de hierro colocada en un campo magnético que era uniforme antes de introducir la barra como un solenoide. El valor de H en cualquier punto antes de introducir la barra está dado por la excitación magnética, puesto que no existen polos. Además, si se mantiene constante la corriente en el solenoide, esta componente de H permanece a su vez constante después de introducir la barra. Tan pronto como se introduce la barra se convierte en un imán y aparecen en sus extremos polos norte y sur. Las líneas de fuerza de H_H , componentes de H producida por los polos, se representan por la líneas de trazos y también . el sentido de esta componente dentro de la barra es opuesto al de H_1 .

Además, el valor de H_M no es el mismo en todos los puntos, sino que es grande en la proximidad de los polos y mucho más débil en el centro de la barra. La excitación magnética resultante varía, considerablemente de un punto a otro de la barra, quedando ésta uniformemente no imantada, y sus polos no permanecen confinados en sus caras extremas.

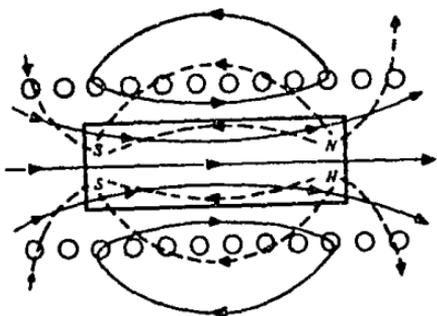


Fig. 2.12 Campo externo magnético⁽²⁴⁾.

Al quitar repentinamente el espiral (alambre) de la bobina, el cambio de la lectura es proporcional al cambio de número de líneas de flujo magnético y, por consecuencia, al separar el flujo magnético por sección de área de la barra se obtiene la densidad del flujo o la inducción del campo magnético B (wb/m^2), si se induce la espiral en su posición original la lectura es proporcional al flujo magnético que se le denomina la inducción magnética intrínseca (wt/m^2), detallada anteriormente. Si se retiran ambas la barra y la bobina de la posición original produce un cambio en la densidad del flujo la cual es proporcional al campo magnetizado y se define así:

$$B = H + \psi$$

2.26

La inducción magnética B es igual al campo magnetizado H más la inducción magnética intrínseca ψ del material. La intensidad de la magnetización o simplemente la magnetización del material se utiliza más que la inducción magnética intrínseca. La magnetización se expresa con J (wb/m^2). La relación entre ψ y J esta dada⁽²⁰⁾:

$$\psi = 4\pi J$$

2.27

Sustituyendo la ecuación 2.27 en 2.26 se obtiene la ecuación 2.28

$$B = H + 4\pi J$$

2.28

La J tiene la misma dimension de B Y H , es decir, se expresa en Tesla o wb/m^2 . La magnetización puede ser interpretada como el momento dipolar magnético sobre unidad de volumen del material⁽²⁴⁾.

Otra importante variable que se encuentra es la magnetización específica σ , que se define:

$$\sigma = J / \rho$$

2.29

donde:

$$\rho = \text{densidad del material. (Kg/m}^3\text{)}$$

La relación entre J y H es la susceptibilidad magnética⁽²⁴⁾ κ

$$\kappa = J / H \quad 2.30$$

Para los materiales paramagnéticos la κ generalmente es constante no mayor de 10^{-3} , para los diamagnéticos la κ es negativa no menor de 10^{-5} ⁽²⁴⁾.

Es conveniente recalcar que la susceptibilidad específica de un material se expresa por χ

$$\chi = \sigma / H \quad 2.31$$

De la ecuación 2.29, 2.30 y 2.31 se obtiene la ecuación 2.32

$$\chi = \kappa / \rho \quad 2.32$$

La susceptibilidad molar de un átomo, ión o compuesto χ_m , es igual a la susceptibilidad específica multiplicado por su peso molecular.

Además, las susceptibilidades de los materiales ferromagnéticos se describen como permeabilidad magnética, β :

$$\beta = B / H \quad 2.33$$

De la ecuación 2.28, 2.30 y 2.33 se obtiene la ecuación 2.34

$$\beta = 1 + 4\pi\kappa \quad 2.34$$

El material ferromagnético cambia cuando β varía con H y de la misma manera la κ .

Para estos casos es muy difícil calcular la fuerza magnética sobre una partícula o varias, ya que ésta es demasiado pequeña al campo externo y directamente va uniforme a la región magnética ocupada en la que puede ser remplazada por la susceptibilidad, κ , del dipolo magnético localizado en el centro de la masa de la partícula.

La fuerza magnética en forma vectorial se expresa:

$$\vec{F} = m \nabla \vec{H} \quad 2.35$$

donde: \vec{m} = momento magnético de la partícula. (wb - m)
 \vec{H} = campo magnético en el centro de la partícula. (A / m)

La magnetización de un material se representa como un momento magnético por unidad de volumen. Para una partícula pequeña con la magnetización uniforme, \vec{J} y el volumen, V se expresa así:

$$\vec{m} = V \vec{J} \quad 2.36$$

$$\vec{m} = V \kappa \vec{H} \quad 2.37$$

Con el término de la susceptibilidad específica y la masa de la partícula obtenemos la ecuación 2.38:

$$\vec{m} = \chi \vec{H}$$

2.38

Y la ecuación en forma cartesiana con sus respectivas componentes se describen así:

$$F_x = m_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + m_y \frac{\partial H_y}{\partial x} + m_z \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad 2.39$$

$$F_y = m_x \frac{\partial H_x}{\partial y} + m_y \frac{\partial H_y}{\partial y} + m_z \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad 2.40$$

$$F_z = m_x \frac{\partial H_x}{\partial z} + m_y \frac{\partial H_y}{\partial z} + m_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \quad 2.41$$

Al sustituir la ecuación 2.37 en 2.39 se obtiene la fuerza paramagnética de las partículas:

$$F_x = k V \left[H_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + H_y \frac{\partial H_y}{\partial x} + H_z \frac{\partial H_z}{\partial x} \right] \quad 2.42$$

además, las fuerzas F_y y F_z son similares. El separador que es capaz de coleccionar las partículas para, ferri, ferro - magnética se le llama separador magnético de alto gradiente o separador magnético de alta intensidad (SMAG).

Como complemento para hacer el análisis se presenta el sistema de coordenadas descrito en la fig. 2.13, donde un campo magnético externo \vec{H}_0 se aplica a una esfera de radio a , y en respuesta ésta desarrolla una magnetización \vec{J} , paralela a \vec{H}_0 . De acuerdo con la teoría electromagnética las componentes del campo magnético, \vec{H} , afuera de la partícula se

definen⁽²⁶⁾ como:

$$H_r = \left[H_o + \frac{8 \pi}{3} J \frac{a^3}{r^3} \right] \cos \theta \quad 2.43$$

$$H_\theta = \left[-H_o + \frac{4 \pi}{3} J \frac{a^3}{r^3} \right] \sin \theta \quad 2.44$$

donde:

H_r = campo magnético radial

H_θ = campo magnético en dirección polar.

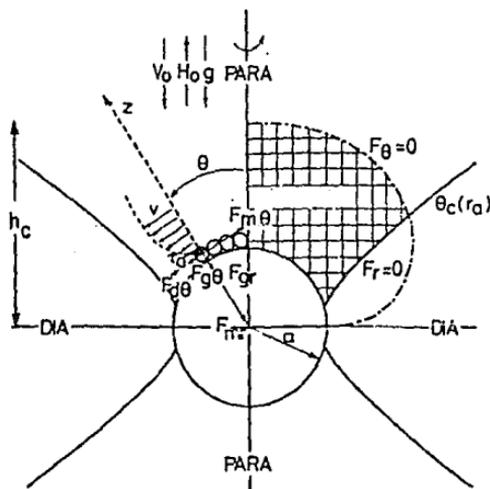


Fig. 2.13 Fuerzas de las partículas y arreglo de matriz⁽²⁶⁾.

Las fuerzas resultantes en forma cartesiana y polar, se obtienen de las ecuaciones 2.43 y 2.44:

$$F_r = \kappa V \left[H_r \frac{\partial H_r}{\partial r} + H_\theta \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} \right] \quad 2.45$$

$$F_\theta = \kappa V r^{-1} \left[H_r \frac{\partial H_r}{\partial r} + H_\theta \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} \right] \quad 2.46$$

El término F_θ es una fuerza que tiende a mover una partícula paramagnética del $\theta = 0$ ó $\theta = \pi$ por cualquier posición de la partícula en la matriz.

La ecuación 2.43 es forma radial y la ecuación 2.44 es la forma tangencial y por consiguientes las gradientes de estas ecuaciones están dadas así:

$$\frac{\partial H_r}{\partial r} = -3 \pi J \frac{a^3}{r^4} \cos \theta \quad 2.47$$

$$\frac{\partial H_\theta}{\partial r} = -4 \pi J \frac{a^3}{r^4} \sin \theta \quad 2.48$$

El significado de los términos de los gradientes depende sólo de la magnetización de la partícula. Una vez que la partícula ha sido magnetizada hasta la saturación, la fuerza externa del campo magnético aumenta y en cambio la gradiente del campo magnético permanece igual.

La fuerza magnética continúa aumentando por el incremento de la magnetización de la partícula a medida que la primera fuerza (potencia) es mayor que el cuadrado de la fuerza magnética.

Al sustituir la ecuación 2.43 y 2.47 en la 2.45 ó 2.44 y 2.48 en la 2.46 dada en la expresión de F_r en función de r y θ , cualquier partícula paramagnética tiende a moverse al sitio donde la fuerza es mayor, si la superficie equivale que $r = a$, $\theta = 0$ ó $\theta = \pi$. La fuerza magnética F_m evaluada en ese punto va hacia el centro de la matriz con una magnitud que se describe así:

$$F_m = 8 \pi \kappa V J a^{-1} \left[H_0 + \frac{8 \pi}{3} J \right] \quad 2.49$$

Para el caso particular de un sólido esférico el área, A , y el volumen, V , están dados en la ecuación 2.12 y si se toma el volumen, V , en término del diámetro d , de la ecuación 2.12 de la partícula en una matriz cilíndrica la ecuación 2.49 se transforma así:

$$F_m = \frac{4 \pi^2}{3} \kappa d^3 J a^{-1} \left[H_0 + \frac{8 \pi}{3} J \right] \quad 2.50$$

La atracción magnética opuesta en la matriz ejerce otras fuerzas: la de arrastre hidrodinámico F_D y la gravitacional F_G . La alta intensidad del SHAG siempre se ha caracterizado por la existencia de partículas de un diámetro menos de 200 μm (micras).⁽²⁷⁾ La fuerza de arrastre de las partículas se define por la ley de Stokes:

$$F_D = 3 \pi \eta d v \quad 2.51$$

donde:

η = viscosidad cinemática. (m^2/s)

v = velocidad del fluido. (m/s)

Sin embargo, si una partícula de 100 μm puede ser recolectada, se complica la remoción cuando disminuye su diámetro hasta tres veces (d^3) su valor, y la fuerza magnética disminuye mientras la fuerza de arrastre sólo disminuye una vez su diámetro (d). El tamaño mínimo de la partícula dentro de la matriz se puede retener igualando la ecuación F_m y F_D y se obtiene:

$$d = \left[\frac{9 \eta v a}{4 \pi \kappa J \left[H_o + \frac{8 \pi}{3} J \right]} \right] \quad 2.52$$

2.5 Balance total de fuerza con inducción magnética.

Las fuerzas que ejercen en el SMAG por medio de los procesos de coagulación, floculación sembrado y sedimentación se explicó detalladamente en los incisos anteriores con el objetivo de hacer el balance total de fuerzas.

El balance total de la interacción de dos partículas en el sistema acuoso con un campo magnético externo esta definido por⁽²⁸⁾:

$$\vec{F}_T = \vec{F}_R + \vec{F}_A + \vec{F}_M + \vec{F}_D \quad 2.53$$

donde:

- \rightarrow
 F_R = fuerza eléctrica de la doble capa. (N)
- \rightarrow
 F_A = fuerza potencial de Van der Waals. (N)
- \rightarrow
 F_H = interacción magnética dipolar. (N)
- \rightarrow
 F_D = fuerza hidrodinámica (arrastre). (N)

La fuerza potencial de Van der Waals para una interacción entre una malla plana en una matriz cilíndrica (fig. 2.14) se expresa:

$$F_A = -\frac{A}{6} \left[\frac{2a(a+x)}{x(x+2a)} - \ln \frac{x+2a}{x} \right] \quad 2.54$$

donde:

A_H = constante de Hamaker^(26,28).

a = radio de la partícula. (m)

x = distancia entre el radio de la malla hacia el cilindro. (m)

En la interacción magnética de partículas iguales la fuerza de Van der Waals se expresa así:

$$F_A = -\frac{A}{6} \left[\frac{2a^2}{4ax+x^2} + \frac{2a^2}{(2a+x)^2} + \ln \frac{4ax+x^2}{(2a+x)^2} \right] \quad 2.55$$

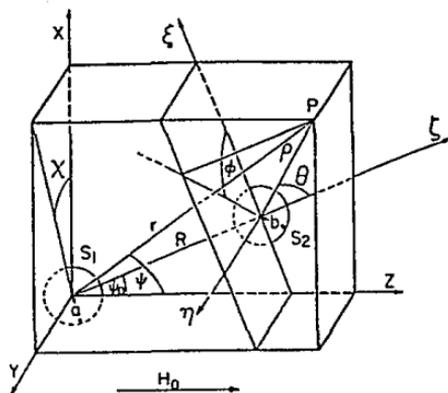


Fig. 2.14 Coordenadas en un plano X - Z⁽²⁰⁾.

Al suponer que la superficie potencial sea constante la potencial de la doble capa entre el cilindro y la matriz se define:

$$F_R = \pi c a \left[(\varphi_1 + \varphi_2)^2 \ln(1 + e^{-\tau x}) + (\varphi_1 - \varphi_2)^2 \ln(1 - e^{-\tau x}) \right] \quad 2.56$$

donde:

c = constante dieléctrica media.

φ_1 y φ_2 = superficie potencial de la partícula y malla.

τ = distancia recíproca de Debye-Hückel^(28, 29) (μm).

La fuerza de la doble capa para partículas esféricas está dado:

$$F_R = 4\pi c a^2 \varphi^2 \frac{e^{-\tau x}}{2a + x} \quad 2.57$$

La interacción de la fuerza magnética entre una partícula y una matriz^(26,30) se define:

$$F_K = - \frac{\mu_0 \kappa}{2} \left[\frac{a^3}{3} \frac{4\pi MH}{\left(1 + \frac{a}{b}\right)} + \frac{\pi H^2 a^3}{4 \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right)} \right. \\ \left. \left[\frac{a}{b} + \left[\frac{\left(\frac{a}{b}\right)^2}{\left(1 + 2 \frac{a}{b}\right)^{1/2}} - \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right)^{1/2} \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \arctan \frac{\frac{a}{b}}{1 + 2 \frac{a}{b}} \right] \right] \right] \quad 2.58$$

donde:

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m).

κ = susceptibilidad magnética de la partícula.

M = magnetización de la matriz (amp/m).

H = intensidad del campo magnético (amp/m).

a y b = radio de la partícula y malla, respectivamente (m) (fig 2.14).

El espesor del límite de la doble capa del flujo laminar y turbulento se determina con las siguientes expresiones:

$$\delta_L = 5 \left[\frac{\mu b}{\rho v} \right]^{1/2} \quad 2.59$$

$$\delta_T = 0.37 \left[\frac{\mu b^4}{\rho v} \right]^{1/5} \quad 2.60$$

donde:

δ_L = espesor laminar (m).

δ_T = espesor turbulento (m).

La fuerza magnética de la interacción dipolar entre las partículas (para o ferromagnética) se expresa así:

$$F_H = \frac{8 \pi \mu \kappa^2 H^2 a^6}{9 (x + 2a)^3} \quad 2.61$$

El valor del efecto de la partícula en la tensión del ensamblaje de las mallas se evalúa por Blasius⁽²⁵⁾, en donde una partícula con un radio a, es comparado con el grosor de la doble capa, y la retención de las partículas en la malla en este caso la matriz, el radio es b, en la cual se determina así:

$$F_H = \frac{\pi^2 a^2}{4} b \rho^{1/2} \nu^{3/2} \mu^{1/2} (x + 2a)^{-1/2} \left[9.861 \theta - 3.863 \theta^3 + 0.413 \theta^5 + \dots \right] \quad 2.62$$

Si el radio de las partículas es grande, para la fuerza de arrastre se emplea la ley de Stokes:

$$F_H = 6 \pi \mu v a b \quad 2.63$$

donde:

ρ = densidad del fluido (kg/m^3).

μ = viscosidad absoluta ($\text{kg/s}\cdot\text{m}$)

v = velocidad del flujo (m^3/s).

θ = ángulo de la partícula (fig. 2.14).

a = radio de la partícula (m)

b = radio de la malla (m)

El efecto de arrastre en cada malla o matriz el número de Reynolds, N_{Re} , se define:

$$N_{Re} = \frac{2 b G}{\mu (1 + P_o)} \quad 2.64$$

donde:

G = flujo másico ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$)

P_o = porosidad de la matriz (partícula).

La fuerza de arrastre juega un papel muy significativo, la velocidad de desorción que es proporcional al número de Reynolds N_{Re}^n donde $2 < n < 6$ (15).

Sustituyendo las ecuaciones 2.55, 2.57, 2.58 y 2.62 en la ecuación 2.53, obtenemos la fuerza total (resultante) sobre la partícula. El álgebra involucrada es elemental pero laboriosa y no vale la pena incluirla en este estudio. La expresión a la que se llega es:

$$\begin{aligned}
\vec{F}_T &= \frac{A}{6} \left[\frac{2a^2}{4ax + x^2} + \frac{2a^2}{(2a + x)^2} + \ln \frac{4ax + x^2}{(2a + x)^2} \right] + \\
&\pi ca \left[(\varphi_1 + \varphi_2)^2 \ln(1 + e^{-\tau x}) + (\varphi_1 - \varphi_2)^2 \ln(1 - e^{-\tau x}) \right] + \\
&\left[-\frac{\mu_0 \kappa}{2} \left[\frac{a^3}{3} \frac{4\pi M H}{(1 + \frac{a}{b})} + \frac{\pi M^2 a^3}{4(1 + 2\frac{a}{b})} \right. \right. \\
&\left. \left[\frac{a}{b} + \left[\frac{(\frac{a}{b})^2}{(1 + 2\frac{a}{b})^{1/2}} - (1 + 2\frac{a}{b})^{1/2} \right] \right. \right. \\
&\left. \left. \arctan \frac{\frac{a}{b}}{1 + 2\frac{a}{b}} \right] \right] + \frac{\pi^2 a^2}{4} b \rho^{1/2} \nu^{3/2} \mu^{1/2} \\
&(x + 2a)^{-1/2} \left[9.861 \theta - 3.863 \theta^3 + 0.413 \theta^5 + \dots \right]
\end{aligned}$$

3. CONDICIONES EXPERIMENTALES

3.1 Generalidades

Del análisis de la bibliografía y referencias citadas en el capítulo anterior, con respecto a la aplicación de campo magnético para remover metales pesados, se han seleccionado como variables de prueba para remover arsénico y plomo las siguientes: dosificación de coagulante, FeCl_3 ^(2,4,31,32,33), inducción de campo magnético con matriz, solenoide^(4,31), sembrado magnético, Fe_2O_3 industrial, y flujo de agua residual. Como complemento de la experimentación se decidieron hacer pruebas con diferentes concentraciones de As^{5+} y Pb^{2+} .

3.2 Condiciones de pruebas

De acuerdo con el planteamiento experimental descrito en el inciso anterior, el ámbito de prueba de las variables consideradas se describe en la tabla 3.1

TABLA 3.1 CONDICIONES EXPERIMENTALES

PARAMETROS	VARIACION
Coagulante, FeCl_3	10, 20 mg/l
Sembrado, Fe_2O_3	0.5, 1.0 g
Concentración de As^{5+} y Pb^{2+}	0.5, 1.0, 1.5 mg/l
Flujo descendente	150, 300 ml/min
Intensidad	mín. (0) y máx. (0.70) mT

3.3 Calidad de agua

Debido a la dificultad de transporte que existe para experimentar con un agua natural contaminada con arsénico, como es el caso de los pozos en la Comarca Lagunera, estado de Coahuila, se prefirió preparar el agua en el laboratorio como se hizo en otros estudios^(4,31,33).

Dadas las características de la experimentación, por el volumen de agua requerido por prueba, fue necesario preparar aproximadamente 1800 litros de agua requerida por prueba de la calidad deseada. El agua se preparó en un

tanque con capacidad para 2000 litros, dosificando 140 g de Ca(OH)_2 , 100 ml de H_2SO_4 concentrado y manteniendo la agitación por medio de recirculación y aeración durante varios días, hasta lograr una caracterización homogénea. En la fig 3.1 se describe el diagrama de flujo del sistema para preparar el agua y alimentarla al tanque de mezcla con los contaminantes. Los resultados de la caracterización del agua se resumen en la tabla 3.2, a la cual solamente le falta incluir la concentración de metal y el contenido de sembrado magnético correspondiente para cada prueba.

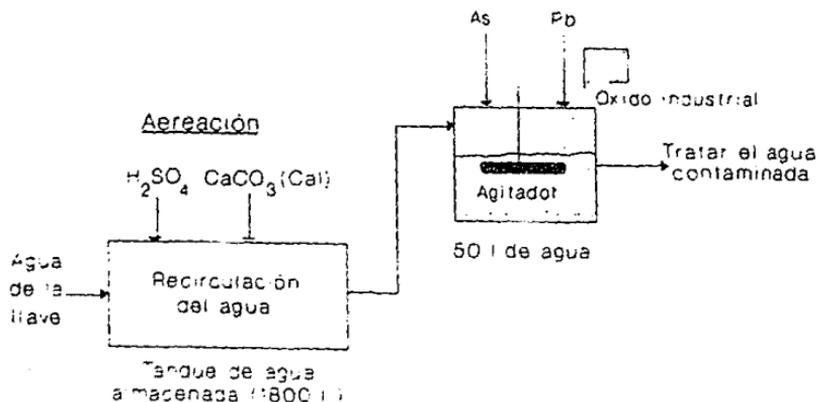


Fig. 3.1 Esquema del agua pretratada.

TABLA 3.2 CALIDAD DEL AGUA DE PRUEBA

PARAMETROS	VALOR
Temperatura, °C	25.0
pH, adimensional	8.5
Alcalinidad como CaCO ₃ *	75.0
Dureza de Ca ⁺² *	217.5
Cloruros, Cl ⁻ *	50.0
Sulfatos, SO ₄ ⁻² *	444.0
Turbiedad, NTU	1.5

* mg/l

3.4 Soluciones

Las soluciones de arsénico y plomo se prepararon de las sales respectivas de Na₂HAsO₄·7H₂O y Pb(NO₃)₂ existentes en el laboratorio. Las soluciones fueron concentradas, con el objeto de dosificar el volumen apropiado para cada condición de prueba fijada. (ver anexo V).

La solución de coagulante, FeCl₃, se preparó concentrada para reducir la posibilidad de descomposición⁽²⁾ y, tomando como base la concentración de prueba y un balance de masa que se describe en la fig. 3.2. Con respecto a las condiciones de flujo, se dosificó la cantidad apropiada.

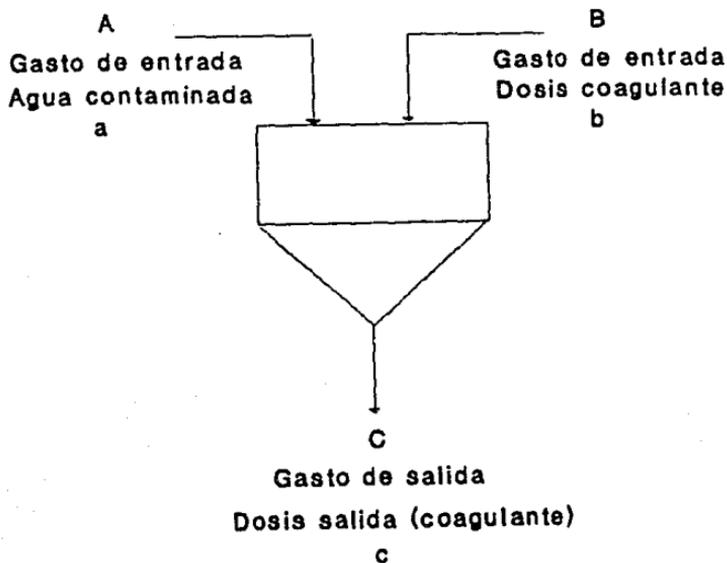


Fig. 3.2 Balance de masa sobre el gasto y dosis de coagulante.

La ecuación de balance de masa del diagrama de flujo, fig. 3.2, se obtiene de la ecuación general (ver anexo VII):

$$Q_a + Q_b = Q_c \quad 3.1$$

donde: Q_a = flujo másico de la entrada A (mg/min).

Q_b = flujo másico de la entrada B (mg/min).

Q_c = Flujo másico de la salida C (mg/min).

Los flujos másico Q_a , Q_b y Q_c se definen la concentración multiplicado por el gasto de cada variables por ejemplo para $Q_a = aA$, así sucesivamente.

La ecuación 2 se obtiene de ecuación 3.1:

$$aA + bB = cC$$

3.2

en donde:

A = Gasto de entrada (ml/min).

a = Concentración del coagulante a la entrada (mg/l)

B = Gasto de entrada del dosificador (ml/min)

b = Concentración del coagulante a la entrada (mg/l)

C = Gasto de salida (ml/min)

c = Concentración del coagulante a salida (mg/l)

3.5 Dispositivo experimental

En la fig. 3.3 se muestra el diagrama de flujo del sistema de tratamiento general. Consta de un tanque de acondicionamiento de agua, un tanque agitado de coagulación (40 rpm)⁽²⁾ y la columna conteniendo la matriz, introducida en el solenoide que induce el campo magnético. Por cuestiones de tipo experimental y para evaluar el efecto, se eligió mantener en la columna flujo descendente.

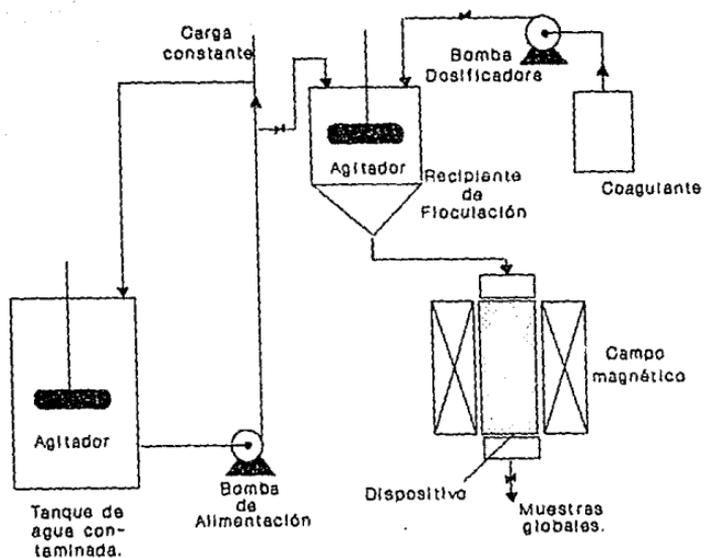


Fig. 3.3 Diagrama de flujo del sistema general.

La columna de separación introducida en el solenoide tiene las características siguientes: fue hecha de acrílico, con 44 mm de diámetro y 400 mm de alto, empacada con 64 discos de malla galvanizada, (trama de 2 mm), recubierta con acrílico, que representan la matriz considerada en el

estudio. En la fig. 3.4 se detallan los conceptos relevantes sobre las características de la columna.

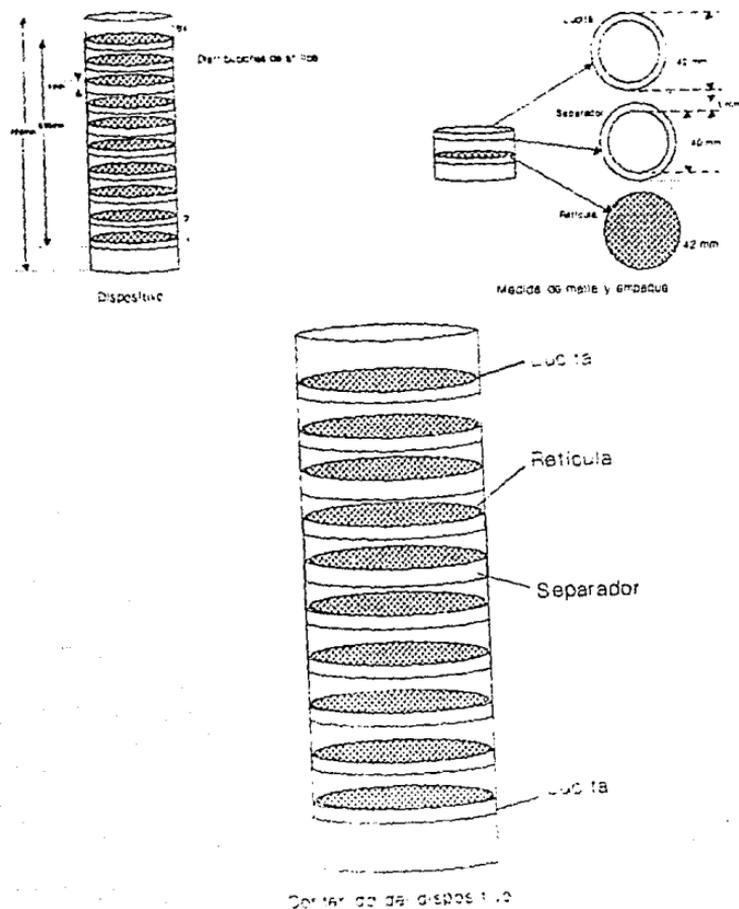


Fig. 3.4 Característica de la columna.

La inducción magnética se logra con un solenoide^(3,24) construido para otro estudio realizado en el Instituto de Ingeniería (I.I.). Para aplicarle una corriente directa regulable se desarrolló un circuito eléctrico, por el departamento de Instrumentación del I.I. rectificador de corriente con un puente de diodo y un reóstato. En la fig 3.5 se representa el esquema eléctrico utilizado para tal propósito.

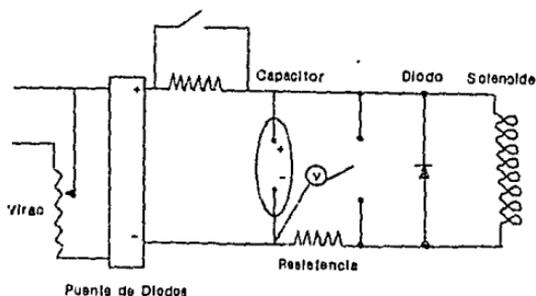


Fig. 3.5 Esquema eléctrico.

3.6 Diseño experimental

Una vez descritas las condiciones y características de la experimentación es fundamental evaluar los resultados estadísticamente tomando como base el diseño de experimentos. Para lograr tal propósito es indispensable identificar el modelo que se ajusta y definir las variables tanto dependientes del proceso como las independientes, con el fin de evaluar estadísticamente los parámetros que se utilizan en este proceso.

Análisis estadísticos

Para evaluar el efecto experimental causado por las variables seleccionadas se tomaron como base los resultados obtenidos por varios autores ^(13, 19,20,21) seleccionando el diseño experimental más confiable. Existen varios arreglos experimentales, algunos de los cuales corresponde a los bloques simples y clasificación en dos direcciones, que son apropiados para una variable; en el caso de dos o tres variables se tiene los diseños grecolatino y cuadro latino. Si se requiere analizar varias fuentes de variables y sus efectos individuales a la vez se emplea el diseño factorial.

Tomando en cuenta las características de los tipos de diseños el que se ajusta, por sus características distintivas de la aplicación y por las propias condiciones experimentales, el diseño factorial 2ⁿ.

Como cada factor se mide sólo en dos niveles, es imposible juzgar si los efectos producidos por las variaciones en un factor son lineales o de otra forma (parabólicos o exponenciales). Por esta razón los experimentos factoriales 2ⁿ se emplean frecuentemente en "experimentos filtrados". La metodología sobre este diseño de experimento se describen en los trabajos de Miller⁽³⁴⁾, Menderhall⁽³⁵⁾, Cochran⁽³⁶⁾, Box⁽³⁷⁾ y Guttman⁽³⁸⁾.

Para que sea claro el análisis de un experimento de muchos factores las variables experimentales se substituyen por letras. En este estudio el gasto se representa por la letra A, la dosis del coagulante por B y el

sembrado magnético por C; todas con sus respectivos niveles. Sin embargo, las concentraciones de los metales tóxicos también se utiliza en el estudio como otra alternativa empleando la letra D. También está otra variable muy importante la intensidad magnética, para observar el efecto de remoción con ella o sin ella.

La tabla 3.3 representalas condiciones para las pruebas de tratamiento de agua.

TABLA 3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LAS PRUEBAS DE TRATAMIENTO DE AGUA.

VARIABLES	NIVELES		
	1	2	3
Gasto	150	300	--
Dosis coagulante	10	20	--
Sembrado (masa)	0.5	1	--
Contaminante	0.5	1	1.5

Nota: La intensidad magnética hay dos niveles máx. (1.70) y mín.(0).
Los contaminantes no se presenta estadísticamente como niveles sino como independiente en la tabla 3.4.

Un diseño factorial de n factores puede contener a niveles del factor A, b niveles del factor B, c niveles del factor C y, así sucesivamente. Para evaluar el error experimental es requisito hacer réplicas de cada prueba. En este estudio, por ser de interés específico evaluar el efecto en la remoción, no se hicieron réplicas, solamente se analizó el efecto de la

relación de variables. En la tabla 3.4 está representado por ocho (8) condiciones y dos (2) nivel del factor; observaciones para cada dosis de metales tóxicos. Como se detalla anteriormente que también se utilizó con las dosis de los metales tóxicos el diseño factorial de n factores, la tabla 3.5 esta representado por diez y seis (16) condiciones y nivel del factor.

TABLA 3.4 DISEÑO DE UN EXPERIMENTO FACTORIAL DE TRES VARIABLES.

CONDICIONES EXPERIMENTALES	NIVEL DEL FACTOR		
	A	B	C
1	0	0	0
a	1	0	0
b	0	1	0
ab	1	1	0
c	0	0	1
ac	1	0	1
bc	0	1	1
abc	1	1	1

TABLA 3.5 DISEÑO DE UN EXPERIMENTO FACTORIAL DE CUATRO VARIABLES.

CONDICIONES EXPERIMENTALES	NIVEL DEL FACTOR			
	A	B	C	D
1	0	0	0	0
a	1	0	0	0
b	0	1	0	0
ab	1	1	0	0
c	0	0	1	0
ac	1	0	1	0
bc	0	1	1	0
abc	1	1	1	0
d	0	0	0	1
ad	1	0	0	1
bd	0	1	0	1
abd	1	1	0	1
cd	0	0	1	1
acd	1	0	1	1
bcd	0	1	1	1
abcd	1	1	1	1

El arreglo del diseño experimental lo conforma una matriz con los factores *A*, *B*, y *C*. El factor *A*, gasto, el cual tiene dos niveles: *a*, para 150 ml/min. y, *b*, para 300 ml/min. El factor *B*, dosis de FeCl_3 , con dos niveles 10 y 20 mg/l y, por último, el factor *C*, sembrado magnético, con dos niveles, 0.5 y 1.0 g. (tabla 3.4). Para la tabla 3.5 corresponde al otro factor *D*, concentraciones de los metales tóxicos As^{+5} y Pb^{+2} con dos niveles 0.5 mg/l y 1.0 mg/l.

Al hacer los cálculos estadísticos, finalmente se divide las diferentes sumas de cuadrados, por sus grados de libertad, se logra la media de la suma de cuadrados; y dividiendo con los SST, se obtiene el valor de la variable más intentificado de los análisis. (ver anexo IV).

4.0 EXPERIMENTACION Y RESULTADOS

El proceso del tratamiento de agua contaminada se basa con el diagrama de flujo (fig. 3.3). Además se harán comparaciones de datos obtenidos de las pruebas de jarra y como también se harán cálculos estadísticos, el análisis de varianzas de las muestra globales de las pruebas.

4.1 Experimentación

4.1.1 Procedimiento de la prueba (Metodología)

Con base a las condiciones experimentales descrita en el capítulo anterior se planteó el diagrama de flujo (fig. 3.3). Para este diagrama la secuencia de su proceso para llevar a cabo las pruebas se toma al estar ya

homogenizada y estabilizada cincuenta litros (50 l) del agua pretratada al tanque en donde se agita con el agitador mecánico marca Power, modelo CP-1445 RE; se recircula con sus respectivas variables adicionando 25 ml, 50 ml ó 75 ml de las soluciones preparada de As^{+5} y Pb^{+2} (ver anexo V) y el sembrado, el óxido industrial se maceró, luego con el tamizador # 325 (área 30%, abertura 0.044 mm, 0.017 in.) se tamizó, (foto 1), de allí se toma 0.5 g ó 1.0 g por treinta minutos hasta que se homogenice. Se conectan las mangueras con el recipiente y la bomba diseñado por el Instituto de Ingeniería⁽¹³⁾; se abre la válvula para llenar el tanque de quince litros (15 l) a un promedio de siete a ocho litros (7 a 8 l) y además se abre la otra válvula del dosificador bomba marca Pennwalt modelo 100, donde se coloca el coagulante, $FeCl_3$, con dosis de 300 mg/l ó 600 mg/l (ver anexo V); y a ambas se les graduan sus velocidades y cuando se homogenizan con el agitador marca Caframo modelo RZR1, se abre el escape de la entrada (dispositivo) en donde está dentro el solenoide diseñado por el Instituto de Ingeniería⁽¹³⁾ hasta que se llene de agua para eliminar el aire dentro de las retículas y del dispositivo, y al eliminarlo se enciende la corriente del solenoide y se gradua la intensidad con el reóstato marca Precision, modelo 98 VTVM. Finalmente se gradua la velocidad de salida del dispositivo.

Se colectan las muestras a intervalos constante, midiendo el volumen tomado y la turbiedad del efluente. Terminada la prueba se recolecta la muestra global del recipiente de almacenamiento del agua tratada, se acidifica las muestras con un mililitro (1 ml) de ácido clorhídrico (HCl) concentrado, grado reactivo, guardándolas, previamente etiquetadas en el refrigerador a

muestras con un mililitro (1 ml) de ácido clorhídrico (HCl) concentrado, grado reactivo, guardándolas, previamente etiquetadas en el refrigerador a más o menos cinco centígrados ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) si no es posible analizarlas el mismo día en la absorción atómica.



Foto 1. La magnetita.

4.1.2 Determinaciones analíticas.

Los parámetros determinados o medidos durante o después de la experimentación se fundamentan en las técnicas analíticas descritas en los métodos estándar⁽³⁹⁾. Estos parámetros fueron los siguientes: turbiedad, pH, alcalinidad, sólidos totales, conductividad, temperatura, dureza, sulfatos y metales pesados; la conductividad se determinó antes de iniciar la prueba experimental cuando ya el agua pretratada estaba homogenizada; y con un conductímetro marca Bridge, modelo 31. La temperatura se midió con un potenciómetro donde también se puede determinar la temperatura y

diferencias de potencial óxido-reducción marca Hanna, modelo 8314. El pH se determinó debido a su influencia en la floculación y a la variación que se da después de este proceso. El pH se midió antes y después de cada prueba, se determinó directamente con un potenciómetro o medidor de pH, marca Extech, modelo Oyster. La turbiedad se determinó a lo largo de la prueba en cada muestra, permitiendo saber la eficiencia del filtro y la calidad del filtrado al finalizar la prueba; la medición se realizó directamente con un nefelómetro marca Turner, modelo 40. Los sólidos totales se determinaron para caracterizar el agua, debido a que influyen en el proceso de tratamiento. Los sólidos fueron determinados gravimétricamente según lo estipulan los métodos estándar⁽³⁹⁾. La dureza, parámetro que se determinó por el método volumétrico del ácido-etilen-diamino-tetracético, usando como indicador eriocromo negro T. Con el mismo propósito general la alcalinidad se determinó por el método volumétrico potenciométrico antes y después de cada prueba para saber si hubo remoción de alcalinidad. La determinación de sulfatos se hizo por el método turbidimétrico precipitando los sulfatos con cloruro de bario. La turbiedad de la solución se mide con un nefelómetro, y se compara con una curva de calibración. Los metales pesados se analizan por la absorción atómica (flama) con un espectrofotómetro marca Perkin Elmer modelo 1100.

4.2 Resultados

En este capítulo se resume los resultados obtenidos durante la experimentación, el análisis de varianza del diseño de experimento y

algunos aspectos relevantes del análisis de toda la información recopilada, como también se reportan tablas y gráficas, incluyendo en ellas los parámetros de mayor interés y además los análisis y comparaciones de las pruebas complementarias. Sin embargo no se incluyen los datos de pH, alcalinidad, la temperatura, intensidad magnética, cloruros y sulfatos debido que estas variables no hubo alteraciones durante su experimentación.

4.2.1 Arsénico

En las tablas del 4.1 al 4.6 representan las condiciones de las pruebas y algunos resultados obtenidos. Sin embargo; no se incluyen el pH por que se asemeja al inicio de las pruebas y la intensidad magnética no se detalla en la tabla ya que se mantenía casi constante su valor en cada prueba, aunque también se modificó la intensidad magnética se aumentó el doble para ver su efecto con o sin el sembrado.

Al observar las tablas 4.1 a 4.6 se observan que no hubo alteraciones en los gastos; sin embargo, en las residuales y turbiedades si hubieron alteraciones altas debidas a contratiempo propios de la experimentación como haberse movido el dispositivo, acabarse el coagulante antes de tiempo por no haberse regulado el gasto a su debido tiempo, o se tapaba a la salida por los flóculos o se disminuía el gasto, aunque estas anomalías se corregían inmediatamente.

Los resultados de arsénicos residual, turbiedad y remoción se representan

en las gráfica 4.1 al 4.24 con el fin de poder interpretarlo y compararlo fácilmente. Además en la tabla 4.7 al 4.9 se analizan los comportamientos de cada prueba observándolo de punto de vista el porcentaje de remoción de las tablas del 4.1 al 4.6 que varían un poco entre sí dependiendo de las condiciones aplicadas.

TABLA 4.1 RESULTADOS DE REMOCION DE ARSENICO Y PLOMO PARA UNA CONCENTRACION INICIAL DE 0.5 mg/l Y GASTO DE 150 ml/min.

Dosis de coagulante: 20 mg/l				Prueba E		Oxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Proveedores	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Residual mg/l	Remoción %	Residual mg/l	Remoción %	
0	0	0	0	0.4422	0.00	0.340	0.00	1.41
1	150	20	3000	0.5380	15.48	0.349	----	2.65
2	150	40	6000	0.1486	71.43	0.113	78.75	1.04
3	150	60	9000	0.2476	62.50	0.166	69.26	1.65
4	150	80	12000	0.2988	54.77	0.210	61.11	2.16
5	150	100	15000	0.3752	43.37	0.253	53.15	3.01
6	150	120	18000	0.3910	40.78	0.280	48.15	3.46
7	150	140	21000	0.4181	36.63	0.264	51.11	3.51
8	150	160	24000	0.4518	31.37	0.285	45.37	3.89
Global				0.3244	52.31	0.239	55.74	1.88
Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba F		Oxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Proveedores	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Residual mg/l	Remoción %	Residual mg/l	Remoción %	
0	0	0	0	0.5992	0.00	0.50	0.00	1.04
1	150	20	3000	0.5692	5.01	0.50	3.85	2.09
2	150	40	6000	0.4122	31.28	0.22	57.89	1.22
3	150	60	9000	0.3034	49.37	0.17	67.31	0.81
4	150	80	12000	0.2940	50.81	0.16	69.23	0.97
5	150	100	15000	0.2566	57.18	0.14	73.08	0.81
6	150	120	18000	0.2228	62.82	0.10	80.77	0.82
7	150	140	21000	0.2398	59.98	0.10	80.77	0.85
8	150	160	24000	0.2378	60.31	0.10	80.77	0.96
Global				0.3390	43.42	0.17	67.31	1.02
Dosis de coagulante: 20 mg/l				Prueba G		Oxido Industrial: 2.5 g		Turbiedad NTU
Proveedores	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Residual mg/l	Remoción %	Residual mg/l	Remoción %	
0	0	0	0	0.4516	0.00	0.32	3.00	1.11
1	150	20	3000	0.5600	14.32	0.41	21.15	2.39
2	150	40	6000	0.2042	68.76	0.12	76.93	1.23
3	150	60	9000	0.2192	64.66	0.12	76.93	1.34
4	150	80	12000	0.2172	66.77	0.20	61.34	1.28
5	150	100	15000	0.3272	49.96	0.24	53.85	1.79
6	150	120	18000	0.3520	46.11	0.21	59.25	2.31
7	150	140	21000	0.3108	53.83	0.20	61.34	2.49
8	150	160	24000	0.4044	38.13	0.25	51.92	3.58
Global				0.3360	43.89	0.19	71.15	1.63
Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba H		Oxido Industrial: 0.5 g		Turbiedad NTU
Proveedores	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Residual mg/l	Remoción %	Residual mg/l	Remoción %	
0	0	0	0	0.4444	0.00	0.327	0.00	1.13
1	150	20	3000	0.4232	8.87	0.465	11.76	1.39
2	150	40	6000	0.1531	10.31	0.127	75.90	0.88
3	150	60	9000	0.3123	32.77	0.146	72.38	1.02
4	150	80	12000	0.1888	16.06	0.150	71.56	1.22
5	150	100	15000	0.2196	----	0.217	56.82	1.34
6	150	120	18000	0.2758	40.61	0.247	49.34	1.26
7	150	140	21000	0.2758	40.61	0.242	54.08	1.23
8	150	160	24000	0.2586	44.28	0.277	47.44	5.61
Global				0.3946	22.33	0.179	66.33	1.35

TABLA 4.2 RESULTADOS DE REMOCION DE ARSENICO Y PLOMO PARA UNA CONCENTRACION INICIAL DE 0.5 mg/l Y GASTO DE 300 ml/min.

Dosis de coagulante: 13 mg/l				Prueba A		Oxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsenico residual/remocion mg/l %	PloMo residual/remocion mg/l %			
0	0	0	0	0.5426	0.00	0.51	0.00	1.01
1	300	40	12000	0.5932	21.41	0.59	1.94	16.01
2	300	80	24000	0.6106	16.10	0.57	49.26	5.48
3	300	120	36000	0.5320	27.40	0.58	45.10	1.39
4	300	160	48000	0.5634	43.45	0.57	47.04	1.73
5	300	200	60000	0.5634	43.45	0.40	21.37	1.43
Global				0.5466	35.17	0.59	43.14	1.44
Dosis de coagulante: 20 mg/l				Prueba B		Oxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsenico residual/remocion mg/l %	PloMo residual/remocion mg/l %			
0	0	0	0	0.5816	0.00	0.48	0.00	1.49
1	300	40	12000	0.6132	----	0.42	----	7.19
2	300	80	24000	0.5388	40.33	0.17	69.31	2.01
3	300	120	36000	0.5026	49.02	0.22	55.10	2.41
4	300	160	48000	0.5206	11.70	0.24	48.84	1.39
5	300	200	60000	0.4808	35.33	0.29	40.81	2.81
Global				0.5571	32.52	0.23	53.04	2.44
Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba C		Oxido Industrial: 0.5 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsenico residual/remocion mg/l %	PloMo residual/remocion mg/l %			
0	0	0	0	0.6286	0.00	0.525	0.00	1.09
1	300	40	12000	0.4970	20.84	0.410	21.80	8.05
2	300	80	24000	0.5454	41.87	0.304	41.71	2.11
3	300	120	36000	0.5458	44.99	0.337	55.81	2.51
4	300	160	48000	0.4856	35.73	0.340	33.54	2.44
5	300	200	60000	0.5044	67.48	0.253	51.81	1.39
Global				0.4938	38.17	0.345	30.48	2.18
Dosis de coagulante: 20 mg/l				Prueba D		Oxido Industrial: 0.5 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsenico residual/remocion mg/l %	PloMo residual/remocion mg/l %			
0	0	0	0	0.6386	0.00	0.45	0.00	1.11
1	300	40	12000	0.7550	----	0.34	----	11.3
2	300	80	24000	0.5984	43.49	0.22	21.11	1.81
3	300	120	36000	0.5910	18.77	0.21	48.89	1.89
4	300	160	48000	0.5770	56.62	0.24	42.22	2.14
5	300	200	60000	0.5986	53.24	0.12	73.33	1.52
Global				0.5948	36.18	0.23	48.89	2.18

TABLA 4.3 RESULTADOS DE REMOCION DE ARSENICO Y PLOMO PARA UNA CONCENTRACION INICIAL DE 1.0 mg/l Y GASTO DE 150 ml/min.

Dosis de coagulante: 20 mg/l				Prueba E		Oxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsenico residual/remocion mg/l %	PloMo residual/remocion mg/l %			
0	0	0	0	1.2192	0.00	1.091	0.00	1.48
1	150	40	6000	1.2145	----	1.041	4.38	1.01
2	150	80	12000	0.9982	19.37	0.954	67.58	1.09
3	150	120	18000	0.9432	23.19	0.474	56.95	1.19
4	150	160	24000	1.0317	16.74	0.539	51.81	2.11
5	150	200	30000	1.2192	----	1.203	----	4.81
Global				0.9300	41.89	0.487	55.26	2.14
Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba F		Oxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsenico residual/remocion mg/l %	PloMo residual/remocion mg/l %			
0	0	0	0	0.9874	0.00	0.937	0.00	1.84
1	150	40	6000	1.2244	----	0.923	46.18	3.47
2	150	80	12000	0.9895	45.40	0.198	86.14	1.04
3	150	120	18000	0.4408	55.77	0.178	80.80	1.72
4	150	160	24000	0.4934	52.89	0.192	79.51	2.26
5	150	200	30000	0.4700	12.16	0.176	81.21	1.15
Global				0.9144	68.17	0.164	82.50	1.53
Dosis de coagulante: 20 mg/l				Prueba G		Oxido Industrial: 0.5 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsenico residual/remocion mg/l %	PloMo residual/remocion mg/l %			
0	0	0	0	1.1481	0.00	0.793	0.00	1.59
1	150	40	6000	0.9839	31.72	0.383	28.45	1.11
2	150	80	12000	0.9327	16.18	0.385	50.81	1.01
3	150	120	18000	0.7212	37.18	0.378	51.60	1.71
4	150	160	24000	0.6712	24.12	0.486	37.93	2.47
Global				0.6922	39.42	0.387	36.41	1.17
Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba H		Oxido Industrial: 0.5 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsenico residual/remocion mg/l %	PloMo residual/remocion mg/l %			
0	0	0	0	1.1408	0.00	0.798	0.00	1.49
1	150	40	6000	0.9983	31.44	0.571	28.45	1.11
2	150	80	12000	0.7333	39.57	0.218	72.68	1.19
3	150	120	18000	0.6932	41.29	0.246	69.42	2.08
4	150	160	24000	0.6924	61.34	0.247	69.03	1.81
5	150	200	30000	0.7248	37.77	0.287	67.79	1.89
Global				0.6943	41.30	0.249	46.29	1.14

TABLA 4.5 RESULTADOS DE REMOCION DE ARSENICO Y PLOMO PARA UNA CONCENTRACION INICIAL DE 1.5 mg/l Y GASTO DE 150 ml/min.

Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba E		Óxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	residual Arsenico mg/l	remoción % Arsenico	residual Plomo mg/l	remoción % Plomo	
0	0	0	0	1.41	0.00	1.473	0.00	1.96
1	150	40	4000	1.14	37.93	1.264	14.19	0.96
2	150	80	12000	0.56	68.45	0.370	74.88	1.91
3	150	120	16000	0.37	73.74	0.321	69.31	1.29
4	150	160	24000	0.17	87.34	0.366	62.93	1.38
5	150	200	10000	0.38	73.05	0.611	58.45	1.74
Global				0.39	75.18	0.483	67.21	1.49
Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba F		Óxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
0	0	0	0	1.59	0.00	1.594	0.00	
1	150	40	4000	1.55	2.52	1.521	4.70	1.33
2	150	80	12000	0.32	79.87	0.617	74.19	0.86
3	150	120	16000	0.19	88.05	0.551	65.33	1.09
4	150	160	24000	0.32	86.36	0.556	63.16	1.62
5	150	200	10000	0.38	82.38	0.710	55.51	1.25
Global				0.39	75.47	0.575	63.72	1.15
Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba G		Óxido Industrial: 0.5 g		Turbiedad NTU
0	150	0	0	1.49	0.00	1.495	0.00	
1	150	40	4000	1.23	23.42	0.972	33.26	2.31
2	150	80	12000	1.65	----	0.885	38.33	1.97
3	150	120	16000	0.32	78.34	0.925	24.84	3.75
4	150	160	24000	0.43	71.14	0.982	31.57	3.67
5	150	200	10000	0.34	77.18	0.841	41.35	3.15
Global				0.51	65.77	0.899	37.25	3.17
Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba H		Óxido Industrial: 0.5 g		Turbiedad NTU
0	0	0	0	1.52	0.00	1.504	0.00	
1	150	40	4000	1.34	11.93	1.542	----	2.33
2	150	80	12000	0.44	58.01	0.590	60.82	0.91
3	150	120	16000	0.42	39.20	0.699	38.24	1.27
4	150	160	24000	0.43	58.78	0.751	31.66	1.48
5	150	200	10000	0.45	57.57	0.755	48.87	1.48
Global				0.77	49.14	0.729	51.73	1.29

TABLA 4.6 RESULTADOS DE REMOCION DE ARSENICO Y PLOMO PARA UNA CONCENTRACION INICIAL DE 1.5 mg/l Y GASTO DE 300 ml/min.

Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba A		Óxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	residual Arsenico mg/l	remoción % Arsenico	residual Plomo mg/l	remoción % Plomo	
0	0	0	0	1.24	0.00	1.43	0.00	1.81
1	300	40	12000	1.16	13.43	1.27	10.56	1.63
2	300	80	24000	1.05	21.64	0.74	49.07	1.87
3	300	120	36000	0.61	58.68	0.78	43.07	2.01
4	300	160	48000	0.95	29.10	0.77	45.77	1.81
Global				1.14	14.93	0.84	32.39	2.46
Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba B		Óxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
0	0	0	0	1.31	0.00	1.45	0.00	
1	300	40	12000	1.27	3.03	1.18	18.62	ND
2	300	80	24000	0.64	49.62	0.75	48.28	ND
3	300	120	36000	0.43	51.91	0.82	36.55	ND
4	300	160	48000	0.48	63.38	1.02	29.46	ND
Global				0.70	46.56	0.85	41.38	ND
Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba C		Óxido Industrial: 0.5 g		Turbiedad NTU
0	0	0	0	1.33	0.00	1.597	0.00	
1	300	40	12000	1.05	31.03	1.351	4.18	ND
2	300	80	24000	1.01	24.02	1.054	24.28	ND
3	300	120	36000	1.00	24.61	1.042	25.14	ND
4	300	160	48000	0.97	27.07	0.873	37.14	ND
Global				1.01	24.08	1.006	27.73	ND
Dosis de coagulante: 20 mg/l				Prueba D		Óxido Industrial: 0.5 g		Turbiedad NTU
0	0	0	0	1.34	0.00	1.565	0.00	
1	300	40	12000	0.78	41.79	0.819	43.01	1.23
2	300	80	24000	0.80	40.30	1.081	30.03	3.08
3	300	120	36000	0.24	83.09	0.602	61.04	2.09
4	300	160	48000	0.39	78.36	0.847	43.59	2.85
Global				0.64	52.24	1.109	28.23	2.22

Nota: ND = No determinado

Condiciones	As	Pb
Mayor remoción	Gasto bajo y dosis alta	Gasto y dosis baja con sembrado alto.
Menor remoción	En gasto alto.	Gasto y sembrado alto con dosis baja.
Siembrado 1.0 g	Remueve más en gasto bajo y se asemejan su remoción. En gasto menor hay más muestras	Remueve más en gasto bajo pero en dosis alta más Gasto alto difiere entre el 15 al 25 %. Dosis alta difiere de 10 al 15 %. Dosis baja difiere del 20 al 60 %.
Siembrado 0.5 g	Remueve más en gasto bajo y dosis alta. Dosis alta difiere del 15 al 20 % entre sí Dosis baja difiere entre el 25 % Gasto alto se asemejan su remoción	Remueve más en gasto bajo y se asemeja su remoción. Gasto alto remueve más la dosis alta en 200 min. Gasto bajo se asemeja su remoción. Dosis alta difiere entre el casi el 25 %. Dosis baja difiere casi del 20 al 45 %.
Dosis 20 mg/l	Remueve más en gasto bajo y se asemeja la remoción Siembrado alto difiere del 10 al 20 % Siembrado bajo casi del 25 % Gasto alto en 160 min. difiere casi 45 % y los demás casi del 10 a 20 %.	Remueve más en GASTO bajo y su remoción se asemeja. Siembrado alto difiere casi del 25 % entre sí. Gasto alto difiere casi del 10 %, menos en 200 min. es del 30 %.
Dosis 10 mg/l	Remueve en gasto bajo y sembrado alto Siembrado alto difiere del 15 al 20 % Siembrado bajo difiere del 10 al 30 % Gasto alto se asemejan Gasto bajo difiere hasta casi el 60 %.	Remueve más en gasto bajo y se asemeja su remoción Gasto alto en 40 min. difiere del 20 % y en 200 min. 30 % y los demás del 5 al 15 %. Gasto bajo difiere del 15 al 30 % entre sí. Siembrado bajo difiere casi del 35 al 45 %. Siembrado alto difiere casi del 35 %.
Gasto 300 ml/min	Siembrado alto difiere del 10 al 20 %. Siembrado bajo difiere hasta el 40 %. Dosis baja se asemejan, menos en 200 min. difiere del 20 % Dosis alta difiere del 10 al 15 %, menos en 160 min. difiere más o menos del 40 %.	Remueve más en dosis alta y difieren del 15 al 30 %. Siembrado bajo difiere casi del 10 al 15 %. Siembrado alto difiere casi del 10 % menos en 60 y 200 min. es casi del 20 %. Dosis alta difiere del 5 al 15 % entre sí, menos en 200 min. es casi del 35 %. Dosis baja se asemejan menos en 40 y 200 min. que difiere del 20 y 25 % respectivamente.
Gasto 150 ml/min	Dosis alta difiere entre sí casi el 5 %. Dosis baja difiere casi del 10 al 45 % entre sí. Siembrado alto difiere casi del 25 al 35 % entre sí. Siembrado bajo se asemejan menos de 120 min. es casi del 20 %.	Dosis baja difiere del 20 al 35 % entre sí. Dosis alta se asemeja. Siembrado alto en 120 y 160 min. difiere casi de 25 %, en 40 min. el 20 % y los demás de 5 al 10 %. Siembrado bajo se asemejan

Condiciones	As	Pb
Mayor remoción	Gasto menor y dosis baja con sembrado alto	Gasto menor y dosis baja con sembrado alto.
Menor remoción	Gasto menor y dosis alta con sembrado alto.	Gasto alto sin importar dosis y sembrado.
Siembrado 1.0 g	Remueve más en dosis bajas y su remoción son casi iguales. Dosis alta difieren entre sí un 15 %. Remueve más con la dosis baja.	Remueve más en dosis baja y gasto alto. Gasto bajo remueven menos que los altos. Dosis baja difieren un 40 %. Dosis alta difiere casi 20 %, y gasto bajo también Gasto altos son parecidos.
Siembrado 0.5 g	Remueve más en dosis baja y gasto alto aunque en todas se asemejan su remoción entre sí difiere de 3 al 5 %.	Remueve más en gasto y dosis baja. Dosis baja difieren un 20 % entre sí. Dosis alta difieren un 5 % entre sí. Gasto alto difieren como un 5 %.
Dosis 20 mg/l	Remueve más en gasto bajo y sembrado alto. Siembrado alto difiere casi de 20 % entre sí Siembrado bajo difiere casi 25 %. Gasto alto se asemejan menos el de 40 min. que difiere casi 15 % Gasto bajo difiere casi de 35 a 40 % por problema de la prueba.	Mayor remoción gasto bajo. Siembrado alto difiere casi el 15 %. Siembrado bajo difieren un 5 % entre sí. Gasto alto difiere casi 8-10 %.
Dosis 10 mg/l	Remueve más en sembrado alto y entre sí difieren un 10 %. Siembrado bajo remueven casi igual. Gasto alto difieren más o menos el 15 %. Gasto bajo difieren casi 20 %.	Gasto bajo difieren un 15 %. Mayor remoción en baja dosis y sembrado. Gasto iguales se difieren un 10-15 % entre sí. Siembrado bajo difiere casi 20 % entre sí. Siembrado alto difiere casi un 40 %.
Gasto 300 ml/min	Remueve más en dosis baja y difieren entre sí un 10 %. Dosis alta su remoción son casi iguales Siembrado bajo difiere entre sí casi 7 % Siembrado alto difiere el 20 % entre sí.	Todos remueven casi iguales varían de 8-10 % con respecto a los otros variables
Gasto 150 ml/min	Remueve más dosis baja y sembrado alto Dosis alta remueven menos y difieren entre sí como el 15 %. Dosis baja difieren casi el 20 % entre sí. Siembrado bajo difiere casi un 30 %.	Remueve más la dosis baja y sembrado alto. Siembrado bajo difiere un 20 % entre sí. Siembrado alto difiere un 15 % entre sí. Dosis baja remueven más y hay una diferencia de 15 % como la de dosis alta.

Tabla 4.9 Comportamiento de remoción de As y Pb en concentración 1.5 mg/l.		
Condiciones	As	Pb
Mayor remoción	Gasto menor y sembrado alto son importantes la dosis.	Gasto bajo y sembrado alto con sembrado alto.
Menor remoción	Gasto alto y dosis baja con sembrado bajo.	Gasto alto dosis y sembrado bajo.
Sembrado 1.0 g	Remueve más en gasto bajo y su remoción son casi iguales. En gasto alto difiere más o menos el 30 % a los de gasto bajo. Gasto alto difiere entre sí como el 5 %.	Remueve más en gasto bajo y son casi iguales. Gasto alto difiere como el 20 %. Dosis baja difiere casi del 20 a 30 %. Dosis alta difiere casi 30 %.
Sembrado 0.5 g	Remueve más en dosis alta. Dosis baja, difiere como el 50 a 80% con la alta en gasto alto. Gasto bajo difiere solo como el 20 % entre sí. Dosis baja y gasto alto su remoción es muy baja.	Remueve más en gasto y dosis baja. Dosis baja difiere casi el 25 a 30% entre sí. Dosis alta difiere el 10% entre sí. Gasto alto difiere del 10 al 35%.
Dosis 20 mg/l	Remueve más en gasto bajo y sembrado alto. Gasto bajo difiere como el 10 % con el gasto alto. Sembrado bajo difiere en diferente gasto como un 5 %. Gasto alto difiere casi el 20 % entre sí.	Mayor remoción gasto bajo y sembrado alto. Sembrado alto difiere casi del 20 al 30%. Sembrado bajo difiere el 10% entre sí. Gasto alto difiere casi 15-30 %. Gasto bajo difieren un 30 %.
Dosis 10 mg/l	Remueve más en gasto bajo y sembrado alto. Gasto bajo difiere como el 25 % entre sí. Gasto alto difiere un 10 % entre sí. Aunque en 120 min. difiere casi 25%. La diferencia entre el sembrado iguales es casi del 30 %.	Mayor remoción en baja dosis y sembrado alto. Gasto iguales se difieren un 10-15 % entre sí. Sembrado bajo difiere casi 30-35 % entre sí. Sembrado alto difiere del 20-30 %.
Gasto 300 ml/min	Remueve más en dosis alta y sembrado bajo. Dosis alta difiere casi el 20 %. Sembrado bajo difiere entre sí casi 50 %. Sembrado alto difiere entre sí el 7 al 10 % entre sí.	Remueve más en dosis baja y sembrado alto. Sembrado alto difiere 10-25 % entre sí. Sembrado bajo difiere 25-30 %. Dosis baja difiere del 15 al 20 %. Dosis alta difiere casi el 20 %.
Gasto 150 ml/min	Remueve más con sembrado alto y son casi iguales. Dosis alta difieren entre sí como el 10 %. Dosis baja difieren casi el 30 % entre sí. Sembrado bajo difiere casi un 20 %.	Remueve más en sembrado alto. Sembrado bajo difiere de 20-30 % entre sí. Sembrado alto, la remoción es casi igual. Dosis baja difiere del 10 a 15 %. Dosis alta difiere del 30-35 %.

Comparandolas por variable separadas se ve una gran diferencia entre sí ya que una de las variables es más intensa en cada una de las pruebas que se analice. En la las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 se detalla cada prueba con sus respectivas concentraciones y se comportamiento entre sí. Se puede observar que la de concentraciones de 1.0 g/ml se removió más lo que se debe a la presencia de las partículas se magnetizan más por adherirse mejor, se cree que sería el límite de la concentración para retener más los contaminantes; se podría hacer entre el intervalo entre ellos como de 0.700 mg/l al .95 mg/l ó 1.1 mg/l a 1.45 mg/l para ver su comportamiento entre sí, aunque también influye la dosis de coagulante.

4.2.2 Plomo

En estas pruebas también se comportarán similares al arsénico ya que ambos metales se utilizó al mismo tiempo y así que la fallas generadas son iguales. Las pruebas y análisis de plomo están representadas en la misma tabla del arsénico. (4.7, 4.8 y 4.9). En la tabla 4.2, 4.3 y 4.4 de gasto 150 ml/min. en porporción remueve más que los de gasto 300 ml/min., sin embargo, las tablas mencionadas anteriormente detallan mejor las comparaciones entre sí.

Las fig. 4.1 al 4.24 se aprecian mejor la remociones aunque hay poca variaciones por falla humana y manual del equipo o por las condiciones que se hayan aplicado en ese proceso. También se observó que se remueven más con las concentraciones de 0.5 mg/l y 1.0 mg/l, se cree que se deba a la magnetización de ambas partículas Pb^{+2} y As^{+5} . Se podría corroborar los

resultados en los intervalos de ambas concentraciones.

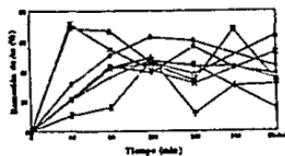
De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 4.11 se debió hacer una o dos réplica más para ver el efecto de remoción más confiable en este tipo de experimentos ya que se encuentran muy complejos los resultados.

El nivel de remoción del As^{+5} y Pb^{+2} es específico para cada prueba ya que influye el comportamiento de ambos metales con el coagulante, sembrado y gasto. En la fig. 4.1 al 4.22 se representan algunas comparaciones y comportamiento descrito.

Bajo ciertas circunstancias, en las pruebas se observaron varios comportamientos: como la saturación de los flóculos, el deprendimiento de los flóculos debido al gasto elevado como también la agitación ya que su rotación se presentaba en el centro donde fluye al dispositivo y su movimiento pudo tener efecto secundarios como deprendimiento de los flóculos através de la matriz (malla).

REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Concentración de Arsénico 0.3 mg/l

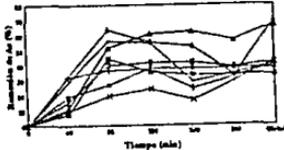


Flujo

- 10 mg/l, 1.0 g/min - 20 mg/l, 1.0 g/min - 30 mg/l, 1.0 g/min - 40 mg/l, 1.0 g/min
 - 10 mg/l, 1.5 g/min - 20 mg/l, 1.5 g/min - 30 mg/l, 1.5 g/min - 40 mg/l, 1.5 g/min
 - 10 mg/l, 2.0 g/min - 20 mg/l, 2.0 g/min - 30 mg/l, 2.0 g/min - 40 mg/l, 2.0 g/min

REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Concentración de Arsénico 1.0 mg/l

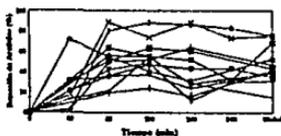


Flujo

- 10 mg/l, 1.0 g/min - 20 mg/l, 1.0 g/min - 30 mg/l, 1.0 g/min - 40 mg/l, 1.0 g/min
 - 10 mg/l, 1.5 g/min - 20 mg/l, 1.5 g/min - 30 mg/l, 1.5 g/min - 40 mg/l, 1.5 g/min
 - 10 mg/l, 2.0 g/min - 20 mg/l, 2.0 g/min - 30 mg/l, 2.0 g/min - 40 mg/l, 2.0 g/min

REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Sembrado 1.0 g

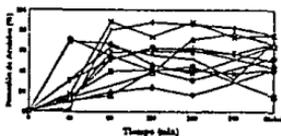


Flujo

- 10 mg/l, 1.0 g/min - 20 mg/l, 1.0 g/min - 30 mg/l, 1.0 g/min - 40 mg/l, 1.0 g/min
 - 10 mg/l, 1.5 g/min - 20 mg/l, 1.5 g/min - 30 mg/l, 1.5 g/min - 40 mg/l, 1.5 g/min
 - 10 mg/l, 2.0 g/min - 20 mg/l, 2.0 g/min - 30 mg/l, 2.0 g/min - 40 mg/l, 2.0 g/min

REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Gasto de 150 ml/min



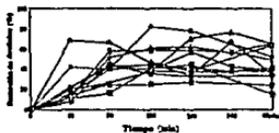
Flujo

- 10 mg/l, 1.0 g/min - 20 mg/l, 1.0 g/min - 30 mg/l, 1.0 g/min - 40 mg/l, 1.0 g/min
 - 10 mg/l, 1.5 g/min - 20 mg/l, 1.5 g/min - 30 mg/l, 1.5 g/min - 40 mg/l, 1.5 g/min
 - 10 mg/l, 2.0 g/min - 20 mg/l, 2.0 g/min - 30 mg/l, 2.0 g/min - 40 mg/l, 2.0 g/min

Fig. 4.1 al Fig. 4.4

REMOCIÓN DE ARSENICO

Sembrado 0.5 g

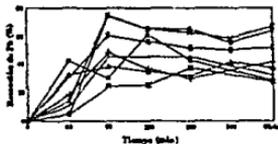


Problemas

● 10 mg/l, 1.0 g, 100			
○ 10 mg/l, 1.0 g, 100			
△ 10 mg/l, 1.0 g, 100			

REMOCIÓN DE PLOMO

(Concentración de 1.5 mg/l)

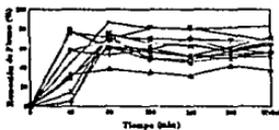


Problemas

— 10 mg/l, 1.0 g, 100			
○ 10 mg/l, 1.0 g, 100			
△ 10 mg/l, 1.0 g, 100			

REMOCIÓN DE PLOMO

Gasleo 150 ml/día

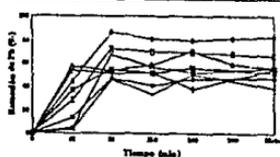


Problemas

● 10 mg/l, 1.0 g, 100			
○ 10 mg/l, 1.0 g, 100			
△ 10 mg/l, 1.0 g, 100			

REMOCIÓN DE PLOMO

(Concentración de 1.0 mg/l)



Problemas

— 10 mg/l, 1.0 g, 100			
○ 10 mg/l, 1.0 g, 100			
△ 10 mg/l, 1.0 g, 100			

Fig. 4.5 al Fig 4.8

REMOCIÓN DE PLOMO

Sembrado 0.5 g

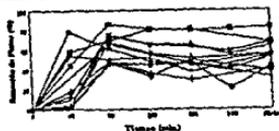


Tratamiento

● 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L
 ○ 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L
 ▲ 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L

REMOCIÓN DE PLOMO

Sembrado 1.0 g

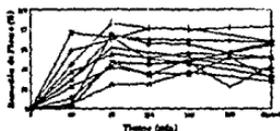


Tratamiento

● 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L
 ○ 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L
 ▲ 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L

REMOCIÓN DE PLOMO

Dosis de inoculante 10 mg/l



Tratamiento

● 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L
 ○ 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L
 ▲ 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L

REMOCIÓN DE PLOMO

Dosis de inoculante 20 mg/l



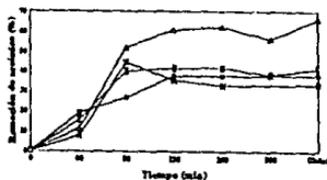
Tratamiento

● 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L
 ○ 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L
 ▲ 10 mg/L 1.0 mg/L 20 mg/L 1.0 mg/L 30 mg/L 1.0 mg/L 40 mg/L 1.0 mg/L 50 mg/L

Fig. 4.9 al Fig. 4.12

REMOCIÓN DE ARSÉNICO

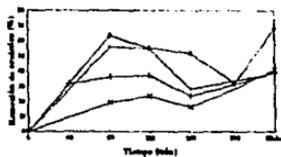
Concentración de Arsénico 1.0 mg/l
Sembrado 0.5 g



POURBAE
 10 mg/l, 20 mg/l, 30 mg/l, 40 mg/l, 50 mg/l

REMOCIÓN DE ARSÉNICO

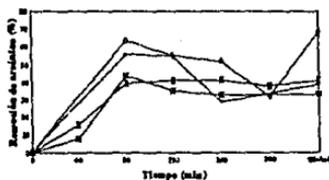
Concentración de Arsénico 1.0 mg/l
Sembrado 1.0 g



POURBAE
 10 mg/l, 20 mg/l, 30 mg/l, 40 mg/l, 50 mg/l

REMOCIÓN DE ARSENICO

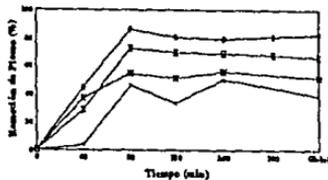
Concentración de Arsénico 1.0 mg/l
Dosis de coagulante 10 mg/l



POURBAE
 10 mg/l, 20 mg/l, 30 mg/l, 40 mg/l, 50 mg/l

REMOCIÓN DE PLOMO

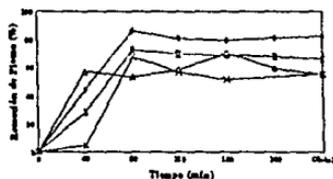
Concentración de 1.0 mg/l
Dosis de coagulante 10 ml/min



PURBAE
 10 mg/l, 20 mg/l, 30 mg/l, 40 mg/l, 50 mg/l

REMOCIÓN DE PLOMO

Concentración de 1.0 mg/l
Gasto 150 ml/min

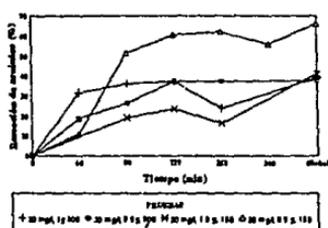


PURBAE
 10 mg/l, 20 mg/l, 30 mg/l, 40 mg/l, 50 mg/l

Fig. 4.13 al Fig. 4.17

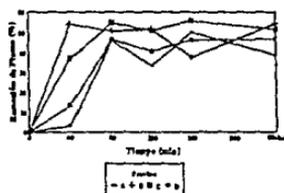
REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Concentración de Arsénico 1.0 mg/l
Dosis de coagulante 20 mg/l



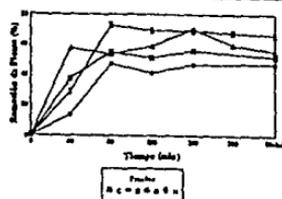
REMOCION DE PLOMO

Concentración de 1.0 mg/l
Dosis 300 ml/min



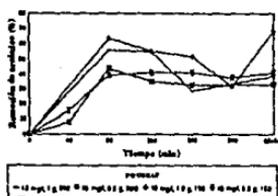
REMOCIÓN DE PLOMO

Concentración de 1.0 mg/l
Sembrado 0.5 g



REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Concentración de Arsénico 1.0 mg/l
Dosis de coagulante 10 mg/l



REMOCIÓN DE PLOMO

Concentración de 1.0 mg/l
Sembrado 1.0 g

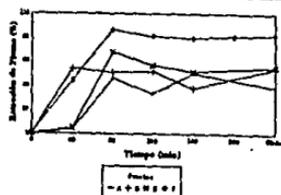


Fig. 4.18 al 4.22

4.2.3 Análisis estadístico de arsénico y plomo

Para aseverar la eficiencia de la remoción se toma en cuenta el volumen acumulado de cada prueba, aunque en muchos casos se presentaron anomalías durante la experimentación. Bajo estas circunstancias se tomaron datos de iguales volúmenes sin importar sus respectivas variables como el sembrado, gasto y coagulante. En la tabla 4.11 se detalla las pruebas globales de cada experimento del As^{+5} y Pb^{+2} .

**Tabla 4.11 Pruebas globales
de As y Pb**

As	Pb
15.03	66.03
41.20	66.29
49.16	51.73
34.17	30.48
33.21	51.58
24.06	27.73
43.42	67.30
68.16	82.49
75.47	63.72
35.17	43.14
38.90	38.88
14.92	32.39
63.83	71.15
66.10	55.21
65.77	37.35
38.18	48.89
37.50	46.85
52.24	28.27
52.38	55.74
41.09	55.36
75.00	61.98
30.92	53.06
39.62	54.40
46.52	41.38

Las tablas 4.1 - 4.6 se observan también los resultados globales de As^{+5} y Pb^{+2} en porcentos con sus respectivas variables. Analizando cada una de ellas, la de mayor remoción se logra cuando su gasto es bajo 150 ml/min, aunque tiende a disminuir su eficiencia cuando el contenido de la semilla magnética es baja 0.5 g.

En la tabla 4.11 se muestra los porcentaje globales de As^{+5} y Pb^{+2} de cada prueba. Estas pruebas se hicieron con la combinación de ambos tóxicos⁽²⁰⁾, y no se hizo separado las dosis de contaminantes para ver su comportamiento como en estudios anteriores^(4,31,33) que remueve casi al 90 - 98%. Este estudio se empleo con ambos metales ya que los desechos de aguas industriales tienen mezclas de grandes cantidades de materiales orgánicos como inórganicos

En el análisis estadístico de las pruebas globales (tabla 4.12) se observa que el coagulante es la variable más intentificada de este estudio

Tabla 4.12 Cálculos estadísticos

Origen de variación Efecto Principal	Grado de libertad	Suma de los cuadrados	
		As	Pb
A	1	211.34	611.08
B	1	779.95	7.79
C	1	83.31	235.16
D	1	2138.37	1623.28
Interacciones de dos factores			
AB	1	101.05	0.91
AC	1	1.52	140.66
AD	1	308.62	4.9
BC	1	224.03	7.02
BD	1	10.07	282.58
CD	1	260.74	12.46
Interacciones de tres factores			
ABC	1	66.55	62.33
ABD	1	430.25	0.41
ACD	1	81.59	34.75
BCD	1	188.72	20.39
Interacciones de cuatro factores			
ABCD	1	12.02	193.35

4.2.4 Pruebas Complementarias

Estas pruebas se hicieron por la inquietud de ver si la intensidad magnética afecta al ser aumentada.

En las pruebas adicionales se tomó en cuenta las condiciones establecidas anteriormente, sólo que modificando la intensidad magnética mediante el diagrama eléctrico (fig. 3.5) añadiendo un transformador para aumentar el voltaje y que no se fundiera el equipo.

En las pruebas adicionales se tomó en cuenta las condiciones establecidas anteriormente, solo que se modificó la intensidad magnética mediante el diagrama eléctrico (fig. 3.5) añadiendo un tranformador para aumentar su voltaje. Se hicieron pocas pruebas adicionales con todas las concentraciones de contaminantes y no hubo ninguna alteración de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} . Sin embargo se observó el calentamiento del agua en el gasto de 150 ml/min., además el agua salía más clara más clara o con sea baja turbiedad (tabla 4.10A). Aunque con el gasto de 300 ml/min fue todo lo contrario, el agua salía sucia o sea con una turbiedad alta (tabla 4.10B).

El efecto de aumentar la intensidad no influye en la remoción de los metales por que la magnetización del sembrado es igual en la alta y baja intensidad magnética.

TABLA 4.10A RESULTADOS DE REMOCION DE ARSENICO Y PLOMO PARA UNA CONCENTRACION INICIAL DE 0.50 mg/l Y GASTO DE 150 ml/min CON ALTA INTENSIDAD.

Dosis de coagulante: 20 mg/l				Prueba A		Oxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsénico		Plomo		
				residual mg/l	remoción %	residual mg/l	remoción %	
0		0		0.52	0.00	0.48	0.00	2.64
1	150	40	6000	0.36	30.77	0.41	14.58	5.68
2	150	80	12000	0.32	38.46	0.38	20.83	5.18
3	150	120	18000	0.23	55.77	0.35	27.08	4.58
4	150	160	24000	0.25	51.92	0.29	39.58	5.25
5	150	200	30000	0.31	40.38	0.34	29.17	4.23
Global				0.32	38.46	0.36	25.00	4.12

TABLA 4.10B RESULTADOS DE REMOCION DE ARSENICO Y PLOMO PARA UNA CONCENTRACION INICIAL DE 1.0 mg/l Y GASTO DE 300 ml/min CON ALTA INTENSIDAD.

Dosis de coagulante: 20 mg/l				Prueba A		Oxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsénico		Plomo		
				residual mg/l	remoción %	residual mg/l	remoción %	
0		0		1.1368	0.00	1.084	0.00	2.15
1	300	40	12000	1.102	3.06	0.986	9.04	8.82
2	300	80	24000	0.6312	44.48	0.765	29.43	10.6
3	300	120	36000	0.5948	47.68	0.716	33.95	5.62
4	300	160	48000	0.5862	48.43	0.689	36.44	5.44
Global				0.6758	40.55	0.701	27.95	5.15

Dosis de coagulante: 10 mg/l				Prueba A		Oxido Industrial: 1.0 g		Turbiedad NTU
Muestras	Gasto ml/min	Tiempo min	Volumen Acumulado ml	Arsénico		Plomo		
				residual mg/l	remoción %	residual mg/l	remoción %	
0		0		1.186	0.00	1.182	0.00	1.65
1	300	40	12000	1.046	11.80	1.034	12.52	10.65
2	300	80	24000	0.549	53.71	0.832	29.61	7.65
3	300	120	36000	0.627	47.13	0.743	37.14	6.00
4	300	160	48000	0.629	46.96	0.589	50.17	7.15
Global				0.725	38.87	0.673	43.06	5.15

4.2.5 Análisis comparativos

Al finalizar los resultados del dicho experimento se analiza, y se compara con los estudios elaborados como filtración y jarra. En este experimento de inducción magnética comparado en base a los estudios de filtración se observa que los parámetros varían de acuerdo con el tipo de coagulación como: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, y FeCl_3 ; y gasto; y el de jarra sólo se emplea dos tipo de coagulante como $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, y FeCl_3 ; dos tipo de agua y dosis de ayuda.

Analizando las variables se tomó en consideración que la de mayor remoción de ambos estudios en el de inducción magnética y el de filtración es el plomo, y en el de jarra es el arsénico. Sin embargo, el coagulante de FeCl_3 remueven más en ambos metales que en las demás dosis de coagulante, aunque el $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ presenta sólo una leve disminución de remoción con el FeCl_3 .

En el análisis estadístico del estudio de jarra (tabla 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16) se observa que la dosis del coagulante es el más significativo, sin embargo también se observa que el efecto de la combinación de dosis y tipo de coagulante parece ser significativo con la dosis de ayuda. Finalmente con el análisis de varianza se concluye que en la remoción de arsénico y plomo la variable de mayor efecto es la dosis y el tipo de coagulante sin importar el tipo de agua utilizada, y tampoco influye las mezclas ni la dosis de los contaminantes.

**TABLA 4.13 RESULTADOS ESTADISTICOS
DE ARSENICO**

EFFECTOS	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	F
a	2	5286	2633	783.2
b	1	38.8	38.8	11.6
ab	2	300.2	150.1	44.6
t	1	2.7	2.7	0.86
Error	6	20.17	3.36	
Total	11	5525.3		

**TABLA 4.14 RESULTADOS ESTADISTICOS
DE ARSENICO Y PLOMO**

EFFECTOS	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADO	CUADRADO MEDIO	F
a	2	1882.3	941.2	6.7
b	1	243.8	243.8	3.9
ab	2	282.0	141.0	1.0

**TABLA 4.15 RESULTADOS ESTADISTICOS
PLOMO**

EFFECTOS	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADO	CUADRADO MEDIO	F
a	2	754.1	377.1	438.3
b	1	0.95	0.95	1.0
ab	2	12.7	6.4	7.4

**TABLA 4.16 RESULTADOS ESTADISTICOS
DE ARSENICO**

ORIGEN DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADO	CUADRADO MEDIO	F
REPLICA	1	0.52	0.52	0.78
EFFECTOS				
a	3	8.4	2.8	4.17
b	2	2111.37	1055.69	1575.65
c	1	172.52	172.52	257.49
ab	6	18.79	3.13	4.67
ac	3	3.4	1.13	1.68
bc	2	1.29	0.65	0.97
abc	6	10.54	1.76	2.62
Error	23	15.4	0.67	

En cambio en el estudio del análisis estadístico de filtración (tabla 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20) se observa que se logra mayor remoción $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeCl_3 aunque disminuye también la eficiencia al aumentar la dosis, sin embargo el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ es bajo y su eficiencia aumenta con mayor dosis. La variable más significativa en la remoción del arsénico en el estudio es el tipo de coagulante (sales de hierro). Los resultados obtenidos durante este tratamiento concluyen que el metal de mayor remoción es el plomo con los tres coagulantes aunque varían los valores de concentración entre sí.

Al analizar los tres estudios de remoción de los metales se concluye que en el de mayor remoción depende la dosis y tipo de coagulante que se aplique, sin embargo se puede observar que las sales férricas son de mayor retención de metales en cualquier método. También hay que tener cuidado en la dosificación y ayuda en dicho experimentos ya que altera la remoción mayor de un metal a otro como el de la jarra.

TABLA 4.13 RESULTADOS ESTADISTICOS DE ARSENICO

EFFECTOS	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	F
a	2	5266	2633	783.2
b	1	38.8	38.8	11.6
ab	2	300.2	150.1	44.6
r	1	2.7	2.7	0.86
Error	6	20.17	3.36	
Total	11	5625.3		

**TABLA 4.14 RESULTADOS ESTADISTICOS
DE ARSENICO Y PLOMO**

EFFECTOS	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADO	CUADRADO MEDIO	F
a	2	1882.3	941.2	6.7
b	1	243.8	243.8	3.9
ab	2	282.0	141.0	1.0

**TABLA 4.15 RESULTADOS ESTADISTICOS
PLOMO**

EFFECTOS	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADO	CUADRADO MEDIO	F
a	2	754.1	377.1	438.3
b	1	0.96	0.96	1.0
ab	2	12.7	6.4	7.4

**TABLA 4.16 RESULTADOS ESTADISTICOS
DE ARSENICO**

ORIGEN DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADO	CUADRADO MEDIO	F
REPLICA	1	0.52	0.52	0.78
EFFECTOS				
a	3	8.4	2.8	4.17
b	2	2111.37	1055.69	1575.65
c	1	172.52	172.52	257.49
ab	6	18.79	3.13	4.67
ac	3	3.4	1.13	1.68
bc	2	1.29	0.65	0.97
abc	6	10.54	1.76	2.62
Error	23	15.4	0.67	

5. CONCLUSIONES

La evaluación del estudio de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} en el tratamiento de agua nos da conocer las ventajas y desventajas del uso de la separación magnética de alto gradiente (SMAG) en escala industrial.

En el estudio realizado se notó que para aseverar la eficiencia de remoción de As^{+5} y Pb^{+2} se debieron hacer pruebas con el flujo ascendente para ampliar el criterio. Sin embargo, en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 el comportamiento de cada concentración se analiza entre sí en la cual la mejor prueba fue la concentración 1.0 mg/l con el gasto de 150 ml/min ya que su remoción fue aproximadamente casi del 70 al 80 %.

Debido a la reacción del coagulante con el agua contaminada y la semilla magnética suelen formarse nuevas sales y complejos que tienden a disminuir la retención ya que en los estudios de jarra, filtración remueven de 90% al 98%. A pesar de que el sembrado es susceptible al campo magnético, no influye la cantidad agregada ni tampoco el aumento de la intensidad ya que produce una magnetización del sembrado utilizado.

El diseño estadístico no corrobora lo experimental, ya que la variable más intentificada es el coagulante y en lo experimental es el gasto bajo.

Con este análisis estadístico y experimental el estudio podría ser aplicable a la escala industrial debido a que no es necesario aumentar la energía eléctrica, sin embargo es necesario tener en cuenta que no todos los metales tienen la misma susceptibilidad al campo magnético y tampoco tienen la misma magnetización como se observa en la tabla 4.2, el As^{+5} se removió más y en cambio el Pb^{+2} casi nada. Si se aplicará el gasto graduado en las pruebas beneficiarían la remoción de los metales tóxicos de un 80% a 90% en aguas contaminadas.

Con respecto a los estudios realizados anteriormente el de filtración es el más aceptable debido a que este remueve más y tiene sus ventajas; ya que evitaría la contaminación de las aguas, además el agua ya tratada podría ser reciclable para usos en la vida cotidiana como para el riego de las plantas, servicios sanitarios, etc. Además hay que tener en cuenta que no todas las aguas residuales o contaminadas tienen los mismos fenómenos y productos.

Se deberían continuar los estudios acerca del SMAG ya que la contaminación por metales tóxicos es tan compleja como su reacción, y las mezclas pueden limitar un poco los avances de ciertos procesos aunque siempre surgen alguna novedad al realizar diversas investigaciones.

6. BIBLIOGRAFIA

1. De Latour, C. (Agosto 1974). "Magnetic field in aqueous systems". Submitted in partial fulfillment of the requirements for degree of Doctor of Philosophy. Massachusetts Institute of Technology.
2. CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente). (1981) "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua". (Segunda Reimpresión). Lima Perú.
3. Resnick, R. and Halliday, D. (1978). "Física parte II". Décima Tercera edición. Editorial CECSA. México.

4. Meza, L. M. (Mayo 1990). "Filtración en campo magnético como un proceso de eliminación de elementos tóxicos del agua". Tesis para obtener la licenciatura de Ingeniero Químico en la Universidad Autónoma de México. D.F., México.
5. Mcnallan, M. J. (June 1974). "Magnetic separation of iron bearing solids from water". Submitted in partial fulfillment of requirements for degree of Master of Science. Massachusetts Institute of Technology.
6. Obertuffer, J. "High gradient magnetic separation". (1973). IEEE Transactions on magnetics, Vol. Mag 9, # 3. Sept.
7. Leet, L. D. and Judsson, S. (1980). "Fundamentos de geología física". Quinta edición. Editorial CECSA.
8. Thompson, R. and Oldfield, F. (1986). "Environmental magnetism". Allen & Unwin (Publishers) Ltd, Londres, Inglaterra.
9. CEPIS. (Dic. 1984) "Evaluación de plantas de tratamiento de agua". Tomo 1. Lima, Perú.
10. Mitchell, R.; Bilton, G. and Oberteuffer, J.A. (1975). "High gradient magnetic filtration of magnetic and non magnetic contaminant from water". Separation and purification methods, 4(2) pag. 267-303. Marcel.

11. Schlichting, H.(1968). "Boundary layer theory". Six edition Mc Graw Hill, USA).
12. Weber, W.J. (1972). "Physicochemical process for water quality control". John Wiley & Sons.
13. Stumm, W. and O'Mella, C.R. (May 1968). "Stoichiometry of coagulation". Journal A.W.W.A. 60, # 5 pag. 514.
14. O'Mella, C.R. (May 1968). "The coagulation process: Theoretical concepts useful in design". A.S.C.E.
15. Lamb, H. (1975). "Hidrodynamics". Six edition Dover Publication U.S.A.
16. Boothroyd, R.G. (1971). "Flowing gas - solids suspensions". London: Chapman and Hall.
17. Kern, Donald (1985). "Procesos de tranferencia de calor". Editorial CECSA. México.
18. Harting, H.E.; Onstand, N.J. and Foot, N.J. (1951) "Demagnetization of magnetita". University of Minnesota Mines Experimental Station Information circular # 7, May.
19. Lawver, J.E.(Sc D) and Hopstock, D.M.(Ph.D.). (1976). "Wet magnetic

separation of weakly magnetic minerals". Mineral Sci. Eng. Vol 6 # 3 July.

20. Oberteuffer, J.A. (June 1974). "Magnetic separation: A review of principle, device and application". IEEE Transaction on magnetic Vol. Mag. 10 (2).

21. Mitchell, R. *et al* (1975). "High gradient magnetic filtration of magnetic and non - magnetic contaminants from water". Separation and purification methods.

22. Lawver, J. E. and Hopstock, D. H. (1974). "Wet magnetic separation of weakly magnetic minerals". Science Eng. Vol. 6, # 3.

23. Kelland, D. R. (1973). "High gradient magnetic separation applied to mineral beneficiation". IEEE Transactions on magnetics. Vol. Mag 9, # 3.

24. Sears, F.W. (1974). "Electricidad y magnetismo". Fundamentos de física. Quinta edición. Editorial Aguilar.

25. Clarkson, C. J. and Kelland, D. R. (1978). "Theory and experimental verification of model for HGMS". IEEE Transactions on magnetics, Vol.Mag 14, # 3 May.

26. Friedlaneder, F.J.; Gerber, R.; Henkel, H.P. and Birss, R. (1981). "Particle buildup on single spheres in HGMS". IEEE Transactions on

magnetics, Vol. Mag. 17, # 6 Nov.

27. Alexander, A.E. and Johnson, P. (1949). "Colloid science". Volumen 1 y 2. Oxford University Press London.

28. Eisenstein, I. (1977). "Magnetic separator: Traction force between ferromagnetic and paramagnetic spheres". IEEE Transactions on magnetics Mag 13 # 5. Sept.

29. Degremont (1979). "Water treatment handbook". Fifth edition. John Wiley & Sons.

30. Dean, R.S. and Davis, C.V. (1941). "Magnetic separation of ores". Washington, USA, Bureau of mines bull 425.

31. Taba, E. (1993). "Estudio experimental para remover arsénico y plomo del agua mediante filtración". Tesis para obtener la licenciatura de Ingeniero Químico en la Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.

32. Martínez, J.L. (1988). "Coagulación con sales de hierro alternativa para remover arsénico del agua". I Simposio Nacional sobre Ingeniería Ambiental. Instituto de Ingeniería, Sección Ambiental, UNAM, México.

33. Fernandez, L.E. (1991). "Estudio experimental para remover arsénico y plomo del agua mediante caogulación". Tesis para obtener la licenciatura de

Ingeniero Químico en la Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.

34. Miller, I. and Freund, E. (1987). "Probabilidad y estadística para ingeniero". Novena edición. Editorial Prentice Hall.

35. Mendehall, W. and Sheaffer, R.L. (1986). "Mathematical statistics with application". Wadsworth, Inc.

36. Cochran G. *et al* (1965). "Diseños experimentales". F. Trillas S.A.

37. Box, E.P.G. *et al* (1978). "Statistic for experimenter, an introduction to design, data analysis and model building". John Wiley & Sons.

38. Guttman, I.; Wilks, S.S. and Stuart, H. J. (1982). "Introductory engineering statistics". John Wiley & Sons, Inc. USA.

39. Galvão, L.A.C. Corey O.German, "Arsénico". (1987). Serie Vigilancia 3. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud., Organización Panamericana de la Salud., O.M.S., Metepec, Edo de México, México.

40. Galvão, L.A.C. y Corey, G. "Plomo". (1989). Serie Vigilancia 8. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud., Organización Panamericana de la Salud., O.M.S., Metepec, Edo de México, México.

41. Perry, R. H. and Chilton, C. H. (1973). "Chemical engineers' handbook". Quinta edición. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. Tokio, Japan.

42. Manual standard methods for the examination of water and wastewater". (1976). Fourth edition. Publisher by American Public Health Association, American Water Water Work Association and Water Pollution Control Federation. Washington; D.C., USA.

ANEXO I

Metales pesados

Arsénico⁽³⁹⁾

El arsénico está presente en pequeñas porciones de dos partes por millón (2 ppm) en forma mineral con otras impurezas de otras sustancias. Además puede estar presente en el agua, el aire y los seres vivos especialmente en los marinos.

El arsénico es un metal que se encuentra en la quinta fila de la tabla periódica V A con peso molecular de 74.5g, en forma trivalente y

pentavalente, de aspecto sólido plateado gris, quebradizo y se oscurece con el aire; su punto de fusión 817 °C, punto de ebullición 613 °C, no es infamable ni soluble. Su incompatibilidad son los oxidantes, bromatos, cloratos, ácidos halogenado, sodio, potasio, litio, cinc, platino, y paladio. Su LD₅₀ por medio oral arsénico y compuesto en general de 15 mg/kg en ratas y de 11 - 159 mg/kg en otros. La manera de ingreso al cuerpo humano es por vía respiratoria, digestiva, y tal vez la dérmica; sus efectos secundarios se dan en el sistema respiratorio, digestivo, nervioso cardiovascular piel y riñón. Lo recomendado por la norma de permisibilidad es de 5 mg/l.

Según sea su valencia trivalente o pentavalente, o sus combinaciones presentan un mayor riesgo en la naturaleza el cual es tóxica en contacto con el aire y sudor. La combinación del arsénico con otros compuestos químicos altera su toxicidad según la solubilidad del compuesto. Con la combinación del hidrógeno forma la arsina que es un gas extremadamente tóxico.

Plomo⁽⁴⁰⁾

El plomo se encuentra en forma natural en la corteza terrestre. El metal se produce por fundición del mineral. El plomo en su forma natural tiene poca importancia como fuente de contaminación ambiental pero sin embargo con el crecimiento de la industrias y automóviles las fuentes contaminantes del medio con éste y otros metales han aumentado en forma drástica.

El plomo es un metal de la familia IV A de la tabla periódica de valencia dos y cuatro, forma cúbica, color plateada con un peso molecular de 207.21g, su punto de fusión 327.5°C, el punto de ebullición 1620°C, insoluble en HCl frío, H₂SO₄ frío y en agua, y soluble en HNO₃.

El plomo en el agua, al igual que en el aire, se transforma en una fuente de contaminación para la flora y la fauna marina y para el hombre, en la medida que sea contaminada por actividades antropogénicas.

El plomo es absorbido por inhalación, por ingestión y a través de la piel, es inhibidor de numerosas enzimas y esto constituye el fundamento de los diversos efectos tóxicos. Su concentración en el agua potable, recomendada por la OMS, es de 0.05 mg/l

El aumento del plomo y su exposición ha tenido el riesgo de daños en la salud de la población. El plomo es usado en numeroso tipos de industrias y actividades como la de baterías, pigmentos para pinturas, alfarería, cable y productos químicos. Además está presente en la dieta y en el ambiente humano consumiéndose de 200 a 300 microgramos diarios sin que cause daño. El daño humano se centra en varios sistemas: el nervioso, hematopoyético, urinario, renal, reproductivo, gastrointestinal y endócrino.

ANEXO II

Coagulación

La coagulación - floculación es el proceso de desestabilización y aglutinamientos de las partículas en pequeñas masa con peso específico superior al del agua llamadas floc.

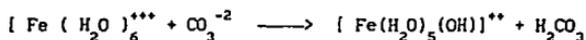
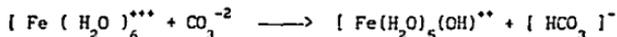
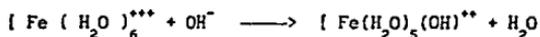
La diferencia entre coagulación y la floculación es que la primera comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundos, la cual consiste de una serie de reacciones físicas y químicas, entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores. Anteriormente se explicó detalladamente los modelos de la doble capa y el del puente químico.

Existe una variedad bastante grande de coagulantes metálicos todos los cuales podemos clasificar en tres tipos: sales de aluminio, sales de hierro y compuestos varios. En este experimento se utilizó una sal de hierro, el cloruro férrico.

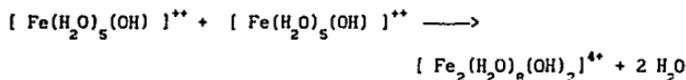
En la química de la coagulación del hierro en solución acuosa está hidrolizado el $[Fe(H_2O)_6]^{+++}$ y al ser agregado al agua reacciona, primero con los aniones alcalinos (OH^- , CO_3^{-2} , HCO_3^-) y luego con la molécula de



Las reacciones con la alcalinidad son de este tipo:

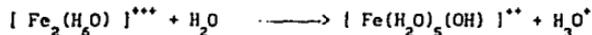


El $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{++}$ se hidroliza formando sucesivamente $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2]^{+}$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3$. La reacción de estos productos monoméricos entre sí, crean productos poliméricos:



Esta reacción continúa con el tiempo, hasta llegar como producto final, a un hidróxido de hierro neutro $\text{Fe}(\text{OH})_3$ o negativo $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$.

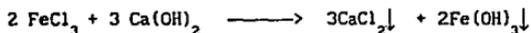
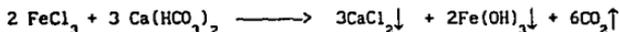
Las reacciones del $[\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})]^{4+}$ con la molécula de H_2O son también del tipo ácido - base y se escriben así:



Al igual que la reacción con los iones alcalinos, el $\{ \text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH}) \}^{++}$ se hidroliza, hasta formar hidróxidos neutros o negativos y se polimeriza. El descenso del pH cuando no hay alcalinidad, es también más pronunciado debido a la formación de ácidos fuertes (H_3O^+) que cuando ésta se halla presente. (Formación de ácidos débiles).

La composición de las diferentes especies de productos de hidrólisis, que existen en equilibrio con hidróxido de hierro recién precipitado depende del pH ⁽²⁾.

Las reacciones principales de los alcalinos del agua con el cloruro férrico FeCl_3 son:



ANEXO III.

Propiedades de algunos sembrados magnéticos⁽⁴¹⁾.

Fe_3O_4 , La magnetita.

P.M. = 231.55 gramos

Color = negro

Forma cristalina = cúbica

Indice de refracción = 2.42

Densidad = 5.2

Punto de fusión = 1538 °C d

Agua fría = insoluble

Agua caliente = insoluble

Otro reactivo = insoluble en alcohol etílico

Fe_2O_3 , La hematita.

P.M. = 159.70 gramos

Color = rojo o negro

Forma cristalina = trigonal

Indice de refracción = 3.042

Densidad = 5.12

Punto de fusión = 1560 °C d

Agua fría = insoluble

Agua caliente = -----

Otros reactivos = solubles en el ácido clorhídrico, HCl.

ANEXOS IV

Análisis estadísticos

El modelo que se atribuye para el análisis de este experimento de 2^a factorial de tres o cuatro condiciones experimentales y niveles del factor son de extensión inmediata.

Si y_{ijkln} es la medida de la remoción de los metales pesados de la i -ésima nivel de los gastos, el j ésimo nivel de coagulantes, el k -ésimo nivel de sembrado, el l -ésimo nivel de los contaminantes tóxicos, y, la n -ésima réplica tendremos:

$$y_{ijkln} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + (\alpha\beta\delta)_{ijl} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl} + \rho_n + \epsilon_{ijkl}$$

donde $i = 1, 2, \dots, a$; $j = 1, 2, \dots, b$; $k = 1, 2, \dots, c$; $l = 1, 2, \dots, d$; $n = 1, 2, \dots, r$. En este caso, μ es la media mayor; suponiendo las sumas de los efectos principales (α , β , γ , y δ ,) y la suma de los efectos de la réplicas son iguales a cero, que la sumas de los efectos de la interacción en dos direcciones sumadas al respecto de cualquier subíndice son igual a cero, para cualquier valor de los otros subíndices y que la suma de los efectos de la interacción en cuatro direcciones sumadas respecto de uno cualquiera de los subíndices, vale cero para cualquiera valores de los

otros tres subíndices. Al suponer que las c_{ijkl} son valores de variables aleatorias independientes que tienen distribuciones normales con medias cero y varianza común σ^2 .

El análisis de los datos del experimento se ha realizado como una clasificación en dos direcciones, pero el hecho que distingue a un experimento factorial es que la suma de cuadrados de los tratamientos se puede continuar subdividiendo en componentes correspondientes a los distintos efectos factoriales. con a , b , c , y d . Para su análisis estadístico se supone la siguiente hipótesis nulas:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^a \alpha_i &= \sum_{j=1}^b \beta_j = \sum_{k=1}^c \dots = \sum_{l=1}^a (\alpha\beta)_{ij\dots} = \sum_{l=1}^a (\alpha\beta\gamma)_{ijk\dots} \\ \sum_{i=1}^a (\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl\dots} &= \sum_{l=1}^r \rho_l = 0_n \end{aligned} \quad \begin{matrix} \\ 2 \end{matrix}$$

Así para un experimentos de 2^n , tenemos la siguientes subdivisión, o descomposición, de la suma de cuadrados de los tratamientos:

$$\begin{aligned} r \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij} - \bar{y} \dots)^2 &= rb \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y} \dots)^2 + \\ &rb \sum_{j=1}^b (\bar{y}_j - \bar{y} \dots)^2 + \dots \\ &rb \sum_{l=1}^n (\bar{y}_a - \bar{y} \dots)^2 + \end{aligned}$$

$$r \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{1j} - \bar{y}_{1..} - \bar{y}_j + \bar{y}...) ^2 \quad 3$$

El primer término del segundo miembro mide la variabilidad de las medias correspondiente a los diferentes niveles del factor A y se le denomina a la suma de los cuadrados del factor A, SSA. Similarmemente, al segundo término es la suma de los cuadrados del factor B, SSB y así sucesivamente los demás términos y el último término es la suma de los cuadrados de las interacciones, que mide la variabilidad de las media \bar{y}_{ijkl} que no es atribuible a los efectos individuales o separados de los factores A, B, C, y D.

Si subdividimos las sumas de cuadrados de los tratamientos en las cuatro sumas de cuadrados de los efectos principales SSA, SSB, SSC, y SSD, las cuatro sumas de cuadrados de la interacción en cuatro direcciones SS(AB), SS(AC), SS(AD), SS(ABC), SS(ABD), SS(BCD), y SS(CDA); y la suma de cuadrados de la interacciones en cuatro factores SS(ABCD).

En la práctica el análisis de varianza, se calcula la suma de cuadrados por medio de fórmulas abreviadas, basadas de la ecuación 3 las cuales son las siguientes:

Término de corrección:

$$C = \frac{y \dots}{r_{abcd}} \quad 4$$

Suma total de cuadrados:

$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d \sum_{n=1}^r (y_{ijkln})^2 - C \quad 5$$

Suma de cuadrado del efecto de fila:

$$SS(Tr) = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \dots \sum_{l=1}^d (y_{ijkl})^2 - C \quad 6$$

Suma de cuadrados de efecto por réplica:

$$SSR = \frac{1}{abcd} \sum_{n=1}^r y_{\dots n}^2 \quad 7$$

Error experimental:

$$SSE = SST - SS(Tr) - SSR \quad 8$$

Suma de cuadrado por el factor a

$$SSA = \frac{1}{bcd r} \sum_{i=1}^a \overline{y}_{i\dots}^2 - C \quad 9$$

Suma del cuadrado por el factor b

$$SSB = \frac{1}{acdr} \sum_{j=1}^b \overline{y}_{j\dots}^2 - C \quad 10$$

Suma de cuadrados por iteración

$$SS(ABCD) = SS(Tr) - SSA - SSB$$

11

Dividiendo las diferentes sumas de cuadrados, por sus grados de libertad, se logra la media de la suma de cuadrados; y dividiendo los medios entre el error medio cuadrado, se obtiene el valor estadístico, F ; el cual si rebasa del valor F_{α} , de una distribución normal de $b - 1$ y $(\alpha - 1)(b - 1)$ grados de libertad y nivel de significación α , rehusará la hipótesis nula, indicando que si afecta esa variable a nuestra experimentación. Los valores de errores de este experimento no se aplican por no haber réplica.

ANEXO V

Preparación de la solución del Arsénico (As^{5+}).

Se busca una sal que contenga el As^{5+} y en este caso se usa el compuesto $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Su peso molecular es 312.01 g/mol para calcular la masa que se necesita para la dilución del As^{5+} . Al obtener el gramo equivalente del As^{5+} a la dilución 1000 mg/l se encontro la masa que es de 4.1614 gramos que se necesita.

Preparación de la solución del Plomo (Pb^{2+})

Se hace lo mismo que el As^{5+} , la sal que se utiliza es el $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Su peso molecular es 331.19 g/mol para calcular la cantidad de masa que se necesita para la dilución. La masa que se necesita para la dilución del plomo es de 1.5985 g.

Preparación del coagulante FeCl_3

Es el mismo procedimiento de las anteriores y como se necesita diluir a una concentración de 10 mg/l. Se hacen los cálculos para encontrar la cantidad de masa que se necesitan. La masa del FeCl_3 es 4.8409 g.

ANEXO VI

Agitador

La agitación en el tanque de siete a ocho litros (7 a 8 l) debe ser constante y la recomendada para este caso es de 40 rev/min⁽²⁾, ya que el coagulante se dispersa en toda la masa del agua, dependiendo de la velocidad de reacción con la alcalinidad y con el agua misma. El agitador crea la turbulencia dependiendo la velocidad y se lleve para formar los flóculos al ser añadido el coagulante en forma constante y continua hasta que se termine la prueba.

ANEXO VII

Balance de Materia

Un balance sobre una sustancia en un sistema puede escribirse de la siguiente forma general:

$$\text{Entrada} + \text{producción} - \text{salida} - \text{consumo} = \text{acumulación} \quad 1$$

donde:

Entrada	=	entra a través de las fronteras del sistema
producción	=	producida dentro del sistema
salida	=	sale a través de las fronteras del sistema
consumo	=	consumida dentro del sistema
acumulación	=	acumulada dentro del sistema

Esta ecuación general de balance se puede aplicar para cualquier sustancia que entre o salga de cualquier proceso; puede aplicarse a la masa total de esta sustancia o a cualquier especie atómica o molecular involucrada en el proceso.

En este estudio el balance de materia se basa del diagrama de flujo (fig.3.2) que es un proceso mezclado continuo (sin tomar en cuenta la reacción química dentro del sistema) En este proceso existen dos (2) variables para cada entrada para la A no hay dosis de FeCl_3 , y tiene un

gasto, para la B contiene FeCl_3 que puede ser de 10 ó 20 mg/l; para la salida también tenemos dos (2) variables la dosis deseada y el gasto aplicado.

En la fig. 3.2 contiene parámetros a, b, c, A, B, y C las cuales corresponden al gasto y concentración.

Analizando el diagrama de flujo se aplica la ecuación de general de balance de masa y se obtiene de la ecuaciones 2 y 3:

$$Q_a + Q_b = Q_c \quad 2$$

$$aA + bB = cC \quad 3$$

donde:

Q_a = Gasto másico de la entrada A (mg/min).

Q_b = Gasto másico de la entrada B (mg/min).

Q_c = Gasto másico de la salida C (mg/min).

A = gasto de entrada (ml/min).

a = concentración de coagulante (mg/l).

B = gasto de entrada del dosificador (ml/min).

b = concentración del coagulante a la entrada (mg/l).

C = gasto de salida (ml/min).

c = concentración del coagulante a la salida (mg/l).

Tomando una de las suposiciones las condiciones de las entradas para la Q_a la concentración es cero, la Q_b el gasto es de 5 ml/min; y para la salida Q_c el gasto es de 150 ml/min y la concentración 10 mg/l. Se reemplazan los valores en sus respectivas ecuaciones por los cuales los resultados tenemos que para la concentración b del coagulante será 300 mg/l. Si cambiamos solamente la concentración de c de 10 mg/l a 20 mg/l se obtiene para la concentración b del coagulante de 600 mg/l y así sucesivamente.