



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**Propuesta de Tratamiento de Agua Congénita**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**OMAR CAMPUZANO CALDERÓN**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DOCTOR EN TECNOLOGÍA Y CIENCIA AMBIENTAL  
JOSÉ APOLINAR CORTÉS**

**Ciudad Universitaria  
Morelia, Mich. Julio 2014**





# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b><u>1 INTRODUCCIÓN .....</u></b>	<b><u>3</u></b>
1.1 EL AGUA COMO EL RECURSO DE LA VIDA .....	4
1.2 USOS DEL AGUA.....	4
1.3 CONTAMINACIÓN DEL AGUA .....	6
1.4 AGUA CONGÉNITA.....	8
1.4.1 PROBLEMÁTICA DEL AGUA CONGÉNITA.....	8
1.5 PROBLEMÁTICA .....	10
1.6 PROPUESTA DE TRATAMIENTO .....	13
<b><u>2 OBJETIVOS .....</u></b>	<b><u>14</u></b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
<b><u>3 MARCO TEÓRICO .....</u></b>	<b><u>15</u></b>
3.1 PARÁMETROS DEL AGUA .....	15
3.1.1 TEMPERATURA .....	15
3.1.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	15
3.1.3 TURBIDEZ .....	16
3.1.4 PH .....	16
3.2 SUSTANCIAS PRESENTES EN EL AGUA CONGÉNITA .....	17
3.2.1 COMPUESTOS ORGÁNICOS .....	18
3.2.2 SODIO Y POTASIO.....	18
3.2.3 GRASAS Y ACEITES .....	19
3.2.4 COMPUESTOS AZUFRADOS .....	19
3.2.5 CLORUROS.....	20
3.2.6 METALES PESADOS .....	20
3.3 MÉTODOS DE TRATAMIENTO .....	22
3.3.1 PRECIPITACIÓN .....	22
3.3.2 SEDIMENTACIÓN.....	24
3.3.3 CENTRIFUGACIÓN .....	27
<b><u>4 METODOLOGÍA .....</u></b>	<b><u>29</u></b>
4.1 MATERIAL, EQUIPO Y REACTIVOS UTILIZADOS .....	29



---

4.1.1	MATERIAL .....	29
4.1.2	EQUIPO.....	29
4.1.3	REACTIVOS .....	31
4.2	PRUEBAS DE CENTRIFUGACIÓN .....	32
4.3	PRUEBAS DE PRECIPITACIÓN .....	32
4.4	PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN .....	34
4.5	PRUEBA DE RECIRCULACIÓN DE LODOS.....	35
<b>5</b>	<b><u>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</u></b>	<b><u>37</u></b>
5.1	PRUEBA DE CENTRIFUGADO .....	37
5.2	PRUEBA DE PRECIPITACIÓN .....	39
5.3	PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN.....	44
5.4	PRUEBA DE RECIRCULACIÓN DE LODOS .....	45
<b>6</b>	<b><u>CONCLUSIONES .....</u></b>	<b><u>51</u></b>
<b>7</b>	<b><u>BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>	<b><u>52</u></b>
<b>ANEXO A</b>	<b><u>.....</u></b>	<b><u>58</u></b>
<b>ANEXO B</b>	<b><u>.....</u></b>	<b><u>78</u></b>
<b>ANEXO C</b>	<b><u>.....</u></b>	<b><u>80</u></b>
<b>ANEXO D</b>	<b><u>.....</u></b>	<b><u>82</u></b>



## Lista de Tablas y Figuras

### Tablas

<b>Tabla 1.1</b> Características de diversos tipos de agua residual.....	7
<b>Tabla 1.2</b> Propiedades del agua congénita.....	9
<b>Tabla 1.3</b> Parámetros de diferentes aguas congénitas.....	10
<b>Tabla 1.4</b> Caracterización del agua congénita de salida al difusor marino.....	12
<b>Tabla 3.1</b> Constante del producto de solubilidad de algunos compuestos.....	23
<b>Tabla 4.1</b> Equipo utilizado.....	29
<b>Tabla 4.2</b> Esquema que muestra los parámetros de centrifugación de cada muestra.....	32
<b>Tabla 5.1</b> Resultados de la prueba de centrifugación.....	37
<b>Tabla 5.2</b> Tiempo y altura de la capa límite de la prueba de sedimentación.....	45
<b>Tabla 5.3</b> Resultados de la pruebas de precipitación con recirculación de lodos.....	46
<b>Tabla 5.4</b> Resultados de la pruebas de sedimentación con recirculación de lodos.....	46
<b>Tabla 5.5</b> Resultados de la prueba de recirculación de lodos.....	49

### Figuras

<b>Figura 1.1</b> Distribución mundial del agua.....	5
<b>Figura 1.2</b> Ciclo del Agua.....	6
<b>Figura 1.3</b> Tratamiento de agua residual en México.....	7
<b>Figura 1.4</b> Diagrama General de la PTE.....	10
<b>Figura 3.1</b> Componentes del agua congénita.....	17
<b>Figura 3.2</b> Comportamiento de la solubilidad respecto a la temperatura.....	24
<b>Figura 3.3</b> Fuerzas que interaccionan en una partícula en suspensión.....	26
<b>Figura 3.4</b> Sedimentación retardada.....	27
<b>Figura 3.5</b> Diagrama de separación por centrifugación.....	28
<b>Figura 4.1</b> Diagrama de la prueba de precipitación.....	33
<b>Figura 4.2</b> Equipo montado para realizar las pruebas de precipitación.....	34
<b>Figura 4.3</b> Diagrama de la prueba de precipitación.....	35
<b>Figura 4.4</b> Esquema de la prueba de recirculación de lodos.....	36
<b>Figura 4.5</b> Separación de lodos por medio del embudo de separación.....	36
<b>Figura 5.1</b> Resultados de la prueba de centrifugación.....	38
<b>Figura 5.2</b> Resultados del pH en la prueba de precipitado a temperatura ambiente.....	39
<b>Figura 5.3</b> Comportamiento de la conductividad en función de la concentración de la cal.....	40
<b>Figura 5.4</b> Comportamiento de la turbidez en función de la concentración de cal.....	41
<b>Figura 5.5</b> Comparación entre los resultados de las pruebas de precipitación a temperatura ambiente y a 40 °C.....	42
<b>Figura 5.6</b> Comportamiento de la conductividad en función de la concentración de cal a temperatura ambiente y a 40 °C.....	43
<b>Figura 5.7</b> Comportamiento de la turbidez en función de la concentración de cal a temperatura ambiente y a 40 °C.....	43



<b>Figura 5.8</b> Prueba de sedimentación al tiempo de 10 min. Se puede observar la zona de clarificación y la de espesamiento.....	44
<b>Figura 5.9</b> Resultados de la prueba de sedimentación.....	45
<b>Figura 5.10</b> Resultados de la prueba de sedimentación para el 1° ciclo.....	47
<b>Figura 5.11</b> Resultados de la prueba de sedimentación para el 2° ciclo.....	47
<b>Figura 5.12</b> Resultados de la prueba de sedimentación para el 3° ciclo.....	48
<b>Figura 5.13</b> Resultados de la prueba de sedimentación para el 4° ciclo.....	48
<b>Figura 5.14</b> Resultados de la prueba de sedimentación para el 5° ciclo.....	49
<b>Figura B.1</b> Muestras centrifugadas durante un minuto a 0 rpm, 3 000 rpm, 6 000 rpm y 9 000 rpm.....	78
<b>Figura B.2</b> Muestras centrifugadas durante dos minutos a 0 rpm, 3 000 rpm, 6 000 rpm, 9 000 rpm y 12 000 rpm.....	78
<b>Figura B.3</b> Muestras centrifugadas durante tres minutos a 0 rpm, 3 000 rpm, 6 000 rpm, 9 000 rpm y 12 000 rpm.....	78
<b>Figura B.4</b> Muestras centrifugadas durante cuatro minutos a 0 rpm, 3 000 rpm, 6 000 rpm, 9 000 rpm y 12 000 rpm.....	79
<b>Figura B.5</b> Muestras centrifugadas durante cinco minutos a 0 rpm, 3 000 rpm, 6 000 rpm, 9 000 rpm y 12 000 rpm.....	79
<b>Figura C.1</b> Prueba de sedimentación al transcurrir 0 min, 2 min, 4 min y 6 min.....	80
<b>Figura C.2</b> Prueba de sedimentación al transcurrir 8 min, 10 min, 12 min y 14 min.....	80
<b>Figura C.3</b> Prueba de sedimentación al transcurrir 16 min, 18 min, 20 min y 25 min.....	81
<b>Figura C.4</b> Prueba de sedimentación al transcurrir 30 min, 40 min, 50 min y 60 min.....	81
<b>Figura D.1</b> Curva de precipitación con las líneas de clarificación y espesamiento y el tiempo de clarificación....	82
<b>Figura D.2</b> Curva de precipitación que muestra la bisectriz.....	83
<b>Figura D.3</b> Curva de precipitación que muestra la tangente y la determinación del tiempo de espesamiento ...	83



## Abreviaturas

**AA:** Análisis de Agua.

**COT:** Carbono Orgánico Total.

**DBO<sub>5</sub>:** Demanda Biológica de Oxígeno a los 5 días.

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno.

**FAU:** (*Formazin Turbidity Unit*) Unidades de Turbidez Formazin.

**GyA:** Grasas y Aceites.

**HTP:** Hidrocarburos Totales del Petróleo.

**NMX:** Norma Mexicana.

**NOM:** Norma Oficial Mexicana.

**NTU:** (*Nephelometric Turbidity Unit*) Unidades Nefelométricas de Turbidez.

**PD:** Promedio Diario.

**PEMEX:** Petróleos Mexicanos.

**PM:** Promedio Mensual.

**ppm:** Partes Por Millón.

**PTE:** Planta de Tratamiento de Efluentes

**rpm:** Revoluciones Por Minuto.

**SCFI:** Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

**SDT:** Sólidos Disueltos Totales.

**SEMARNAT:** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**SST:** Sólidos Suspendidos Totales.

**TMDB:** Terminal Marítima Dos Bocas.

**UC PtCo:** Unidades de Color Platino-Cobalto.



## Resumen

El agua congénita es uno de los residuos contaminantes de la industria petrolera debido a la cantidad de sólidos suspendidos, sólidos disueltos y compuestos orgánicos que contiene. La Planta de Tratamiento de Efluentes de la Terminal Marítima Dos Bocas de PEMEX-Extracción fue instalada en la década de los setenta con una capacidad de 200,000 barriles/día; sin embargo, la cantidad de agua congénita generada actualmente es de 251,402 barriles/día, por lo que no es posible que ésta pueda ser tratada adecuadamente, provocando que las concentraciones de sólidos suspendidos totales (170.41 ppm), plomo (1.57 ppm) y cadmio (0.22 ppm) superen los límites marcados por la NOM-001-SEMARNAT-1996. El objetivo del presente trabajo es evaluar las mejores condiciones de tratamiento del agua congénita mediante centrifugación y sedimentación utilizando hidróxido de calcio como agente precipitante. Las pruebas experimentales dentro del laboratorio dieron como resultado que el proceso de centrifugación llega a tener una remoción de los sólidos suspendidos totales de hasta el 70 % si el agua congénita es sometida a una velocidad de 6,000 rpm, para el proceso de sedimentación se observó que, con una concentración de 1,400 ppm de cal se obtiene una remoción de los sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales del 32 % y 95 % respectivamente, el área del sedimentador necesaria para remover los sólidos es de 2,500 m<sup>2</sup> con un tiempo de 12 min y, al recircular los lodos producidos en el orden de 2 kg por cada m<sup>3</sup> de agua congénita, se obtiene un 14 % de ahorro de la cal usada. Con el uso del hidróxido de calcio, se infiere que se presentará la remoción de los metales pesados ya que se forma hidróxido del metal pesado correspondiente, los cuales presentan una baja solubilidad.

**Palabras clave:** Agua congénita; sedimentación; centrifugación; precipitación; hidróxido de calcio.



## Abstract

Produced water is a polluting waste generated by oil industry. The Effluent Treatment Plant in *PEMEX-Extracción* Maritime Terminal *Dos Bocas*, installed on the 70's, has a capacity of 200,000 barrels per day however, the current produced water flow ascends to 251,402 barrels per day so it is not properly treated. The produced water parameters such as, total suspended solids (170.41 ppm), lead (1.57 ppm) and cadmium (0.22 ppm) are higher than the NOM-001-SEMARNAT-1996 limits thus, this work objective is evaluate the best conditions for centrifugation and calcium hydroxide-aided sedimentation as treatment processes for produced water. The results from laboratory experimentations showed that centrifugation at 6,000 rpm removed to 70 % of total suspended solids. On the other hand, sedimentation at 1,400 ppm of lime could successfully remove 32 % and 95 % of total dissolved solids and total suspended solids respectively, the sedimentador area needed for this removal is 2,500 m<sup>2</sup> in a time of 12 min besides, the recirculation of around 2 kg per m<sup>3</sup> of produced water saves 14 % of lime used. The calcium hydroxide reacts with the heavy metals forming the respective hydroxides that have low solubility and will be removed.

**Keyword: Produced water; sedimentation; centrifugation; precipitation; calcium hydroxide.**



## 1 INTRODUCCIÓN

La humanidad se ha caracterizado durante toda su historia por la capacidad de transformar el ambiente que le rodea para su beneficio y crear herramientas que faciliten su trabajo diario. A inicios del siglo XX, con el auge de la revolución industrial aumentó las actividades humanas de explotación de recursos y su transformación, y con ella la cantidad de desechos que se vierten al ambiente. Si bien es cierto, la población mundial en ese entonces ni siquiera llegaba a los 2,000 millones de personas (UNFPA, 2011) la naturaleza era capaz de degradar toda la basura que recibía pero ahora, 100 años después y con más de 7,000 millones de personas en el mundo, la cantidad de desechos generados es tan grande que el ambiente ya no es capaz de degradarlos, lo que provoca el aumento de la contaminación en aire, agua y suelo, con el consecuente desequilibrio en la biósfera.

Este deterioro ambiental que vivimos, ha sido causado gracias al estandarte de “progreso y bienestar humano” (Navarro, 2008) basado sólo en la disciplina de producir más para ganar más sin importar las consecuencias que puedan provocar en el futuro. Es por ello que, al darse cuenta del daño ambiental que provoca la acción humana día con día, muchos científicos empezaron a investigar la manera de remediar el deterioro del planeta y optimizar los procesos de extracción de recursos naturales y su transformación para que la calidad de vida no disminuya, al mismo tiempo que el equilibrio ecológico se recuperara para que perdure para las generaciones futuras. Dicho sistema de producción se ha llamado desarrollo sustentable (Brundtland, 1987).

La industria energéticamente más importante y con el mayor impacto ambiental es la industria petrolera. El 70 % de la energía que se consume a nivel mundial proviene del petróleo y el gas natural (eia, 2011) y, a pesar del gran desarrollo que se ha hecho en las energías alternas en los últimos años (solar, eólica, biocombustibles, etcétera), hoy en día no existe una opción que pueda reemplazar la demanda que satisfacen los combustibles fósiles.

A pesar de que los hidrocarburos son la base energética mundial, presentan varias desventajas por las cuales se han considerado crear nuevas fuentes de energía. La más evidente es el hecho que es un recurso natural no renovable y según algunas estimaciones (Sorrell, *et al.* 2010) el petróleo podría durar hasta el 2030, esto teniendo en cuenta la creciente demanda que dicho recurso a tenido en los últimos años y las reservas hasta entonces descubiertas. Otro punto en contra es el enorme impacto ambiental que provoca, el fenómeno del calentamiento global es atribuido principalmente a las grandes



cantidades de CO<sub>2</sub> que se liberadas a la atmosfera por la combustión de los derivados del petróleo, además del daño a los ecosistemas que son provocados en la perforación de los pozos petrolíferos y la gran cantidad de desechos generados de la refinación de este recurso.

## 1.1 El Agua como el recurso de la vida

El agua es el elemento fundamental para prácticamente toda fuente de vida. Forma parte de todos los tejidos animales y vegetales siendo necesaria como vehículo para el proceso de las funciones orgánicas, pero además es indispensable para toda una serie de usos humanos que proporcionan un mejor bienestar, desde la salud, la alimentación hasta la industria y el esparcimiento. El agua se encuentra en la naturaleza en diversas formas y características, y cada una de ellas tiene su función dentro del gran ecosistema: el planeta Tierra.

## 1.2 Usos del agua

El tipo de agua que por sus características y propiedades le es más útil al hombre es el agua dulce, en la cual existe una gran gama de componentes en disolución en pequeñas proporciones y por sus características físicas y químicas la hacen apta para los distintos usos humanos. El agua dulce es tan solo una pequeña parte del total de la masa de agua que existe en la Tierra de la cual muy poca puede ser aprovechada por que la mayor parte se ésta se encuentra en estado sólido en los casquetes polares. Como se observa en la **Figura 1.1**, del total del agua que existe el 97.5 % es agua salada que está presente en los océanos y el 2.5 % restante es agua dulce sin embargo, este volumen de agua no poder ser totalmente aprovechado ya que el 68.7 % y el 0.8 % pertenecen al agua congelada en los glaciares de los polos y el hielo perpetuo sobre el suelo (permafrost) respectivamente; el 30 % está en los acuíferos los cuales no pueden ser totalmente explotados y solo 0.4 % es agua superficial la cual representa sólo el 0.01 % del agua total en el planeta.

En México, el 77 % del agua dulce disponible es utilizado en para la agricultura, el 14 % se aprovecha en el abastecimiento público, el 5 % es utilizado en las plantas termoeléctricas y el 4 % se consume en la industria. Como se puede observar la industria agraria consume una gran cantidad de agua ya que para cosechar una tonelada de caña de azúcar se requieren de 1,000 toneladas de agua, para una tonelada de arroz se utilizan 4,000 toneladas de agua y para una tonelada de algodón se gastan hasta

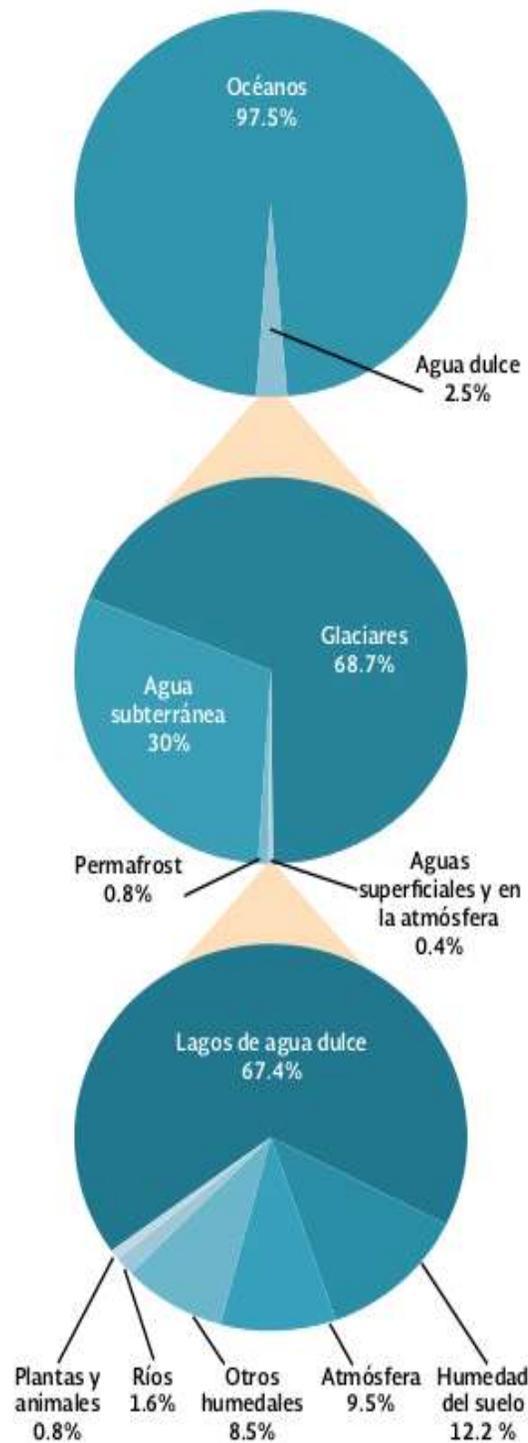


Figura 1.1 Distribución mundial del agua. (PNUMA, 2007)

10,000 toneladas de agua, mientras que para producir una tonelada de ladrillo, papel y fertilizante se requiere de 2,250 y 600 toneladas de agua respectivamente. Este gran consumo de agua para el regadío



de cultivos de debe a que la mayoría del agua utilizada se pierde por evaporación y por la transpiración de las plantas, es por ello que el desarrollo de nuevas tecnologías para el riego es tan importante.

### 1.3 Contaminación del agua

Debido a los usos tan extensos que la humanidad le ha dado al agua, es muy frecuente que se contamine y se pierda su calidad. El ciclo del agua (**Figura 1.2**) es la forma natural de purificación del agua gracias a sus procesos de evaporación y escurrimiento subterráneo permiten que se eliminen gran cantidad de sustancias que se encuentran presentes en el agua, sin embargo, el aumento de la zonas residenciales, la actividad industrial y agraria ha provocado que el volumen de agua gastado sea tan grande que es imposible que pueda ser depurada por la naturaleza a la misma velocidad que es demandada, por lo que la contaminación de lagos, ríos, mares, océanos e incluso de los acuíferos subterráneos se acumule con el pasar de los años.

Los tipos de contaminantes presentes en el agua, depende del uso que se le dé la misma. En **Tabla 1.1** se presentan las características comunes en las aguas residuales que provienen de zonas urbanas, industriales y agrarias. Se puede observar que el agua residual urbana se compone principalmente de



Figura 1.2 Ciclo del Agua (Otero, et al. 2009)



Tabla 1.1 Características de diversos tipos de agua residual. (Martínez Herrera, 2012).

Urbanas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Grandes volúmenes.</li><li>• Alto contenido de materia orgánica.</li><li>• Presencia de microorganismos patógenos.</li><li>• Poca variación de su composición.</li><li>• Variación horaria</li></ul>
Industriales	<ul style="list-style-type: none"><li>• Grandes volúmenes.</li><li>• Gran variación en la composición.</li><li>• Flujos continuos o periódicos.</li></ul>
Agrícolas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Volumen depende de la precipitación y permeabilidad del suelo.</li><li>• Fertilizantes, plaguicidas y componentes del suelo.</li></ul>

aguas jabonosas, grasas y aceites, orina y heces fecales, los cuales provocan un aumento de la materia orgánica y crean un foco de infección si no son tratadas adecuadamente. El agua residual industrial depende del tipo de procesos que se llevan a cabo, los que pueden variar desde hidrocarburos, compuestos ácidos, alcalinos, metales pesados en incluso compuestos radioactivos hasta carcinógenos, por lo que se requiere que se apliquen los tratamientos correspondientes para evitar que dichas sustancias no se acumulen en el ambiente. En el caso de las aguas residuales agrícolas, una parte del agua utilizada para el riego se evapora y se reincorpora al ciclo del agua y la otra parte que no es aprovechada por los cultivos se infiltra en el suelo o fluye hasta llegar a algún río o lago llevando consigo a los fertilizantes y plaguicidas, por lo que es indispensable que se utilice solo la cantidad necesaria para evitar que tales contaminantes se acumulen en el ambiente. A pesar de que es posible analizar

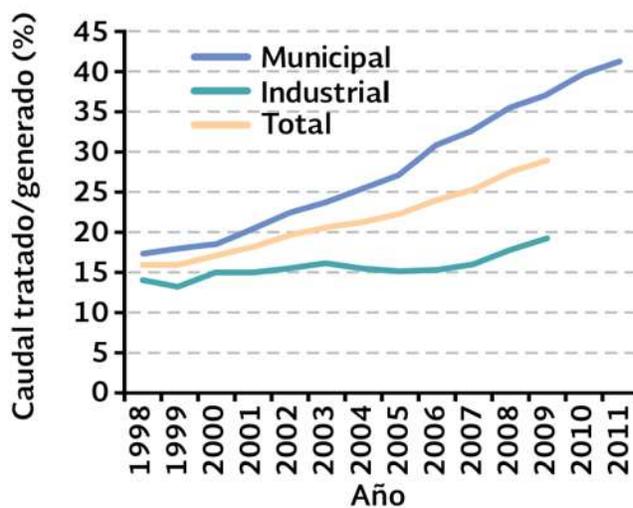


Figura 1.3 Tratamiento de agua residual en México (SEMARNAT, 2011).



cualquier efluente y establecer algún método de tratamiento de aguas residuales para evitar algún daño ambiental, sólo poco menos del 30 % de las aguas residuales producidas en México, son tratadas (**Figura 1.3**). Sin embargo, en 1998 solo el 15 % de las aguas residuales eran tratadas y dicho porcentaje ha sido duplicado en 12 años, por lo que necesario seguir con este ritmo para que en 2022 se llegue a tratar hasta el 60 % o incluso más y preservar los atractivos naturales presentes en nuestro país.

## 1.4 Agua congénita

Se le denomina agua congénita o agua fósil al agua que se encuentra asociada a los hidrocarburos dentro de un yacimiento petrolero y que surge de la extracción del mismo, ya que al extraer el crudo del pozo éste viene emulsificado con una gran cantidad de la misma. Esta agua contiene compuestos orgánicos, especies químicas disueltas (sodio, potasio, magnesio, calcio, estroncio, cloruros, sulfatos, sulfuros y carbonatos), metales pesados tales como hierro, cromo, níquel, cobre, cadmio y plomo (Mijaylova, *et al.* 2005, Bezerra, 2011, Alley, *et al.* 2010, Alzahrani, *et al.* 2013) en diferentes cantidades e incluso algunos isótopos radioactivos como  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{228}\text{Ra}$  (Alzahrani, *et al.* 2013; Shalak, *et al.* 2013), por ello es uno de los desechos más perjudiciales de la industria petrolera.

### 1.4.1 Problemática del agua congénita

Las características presentes en el agua congénita son únicas debido a que en ningún lugar de la superficie terrestre es posible encontrar agua con las mismas propiedades, por ello, este residuo no puede ser vertido en ningún cuerpo de agua sin algún tratamiento previo. La **Tabla 1.2** muestra la caracterización de agua congénita, en la cual se observa que las concentraciones de iones sodio, cloruro así como la dureza total son altas; además, los valores de grasas y aceites, y demanda química de oxígeno (DQO) presentan concentraciones fuera de la NOM-001-SEMARNAT- 1996, lo que implican un grave daño ambiental si esta agua es vertida al mar. La solución que la industria petrolera le ha dado a esta problemática es la de inyectar agua a los pozos petrolíferos, actividad con la cual se aprovecha un mayor porcentaje del petróleo dentro del yacimiento. De esta manera, aprovechan un residuo de la extracción del petróleo y que además reemplaza el uso de agua de servicio la cual genera un ahorro tanto económico como ambiental (Mijaylova, *et al.* 2005); sin embargo, no toda el agua congénita puede ser inyectada debido a la gran cantidad de sólidos suspendidos que presenta y que son capaces

**Tabla 1.2** Propiedades del agua congénita. (Mijaylova, et al. 2005).

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
pH	6.86	Sulfuros (mg/L)	152
SST (mg/L)	108	Alcalinidad (mg/L)	1084
GyA (mg/L)	75	N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	54
DQO (mg/L)	2690	Sulfatos (mg/L)	148
COT (mg/L)	140	Cloruros (mg/L)	24957
Dureza Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	4490	Conductividad (mS/cm)	61233
Dureza Ca (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	2738	Carbón inorgánico (mg/L)	164
Ca (mg/L)	1130	Si (mg/L)	34
Mg (mg/L)	288	P (mg/L)	0.1
Fe (mg/L)	0.73	Bromatos (mg/L)	133
Mn (mg/L)	0.29	B (mg/L)	33.5
Na (mg/L)	16100	Turbiedad (NTU)	258
K (mg/L)	830	Color (UC PtCo)	385
Ba (mg/L)	3.8	Temperatura (°C)	36.6
Sr (mg/L)	97	Cu, Li, mg/L	0.02

de bloquear la permeabilidad de las rocas dentro del pozo y dificultar la extracción del crudo, por lo que el resto del agua tiene que ser vertida al mar.

En México, cerca de 1 398 m<sup>3</sup>/día de agua congénita son tratados respecto a la NOM-143-SEMARNAT-2003 (ver Anexo A) y descargados al mar, lo que corresponden un 2 % del volumen total de agua congénita que se genera (PEMEX, 2012). A pesar de que se considera que el agua congénita contiene altos niveles de salinidad y compuestos orgánicos, su composición varía dependiendo del pozo del que se extrae, así mismo como ocurre con el petróleo el cual tiene diferente composición y propiedades dependiendo de la zona de donde se extrae. En la **Tabla 1.3** se muestran algunos análisis realizados a diferentes muestras de agua congénita, con los que se puede observar el amplio rango en que se pueden encontrar sus parámetros.

Debido a que cada vez que se perfora un nuevo pozo el agua congénita que se va a extraer tiene propiedades diferentes y existe la posibilidad de que se presenten algunos contaminantes que no están considerados en los sistemas de tratamiento actualmente instalados, por lo que es necesario el establecimiento de procesos de tratamiento particular, que resuelva la problemática de contaminación por cada zona de explotación.



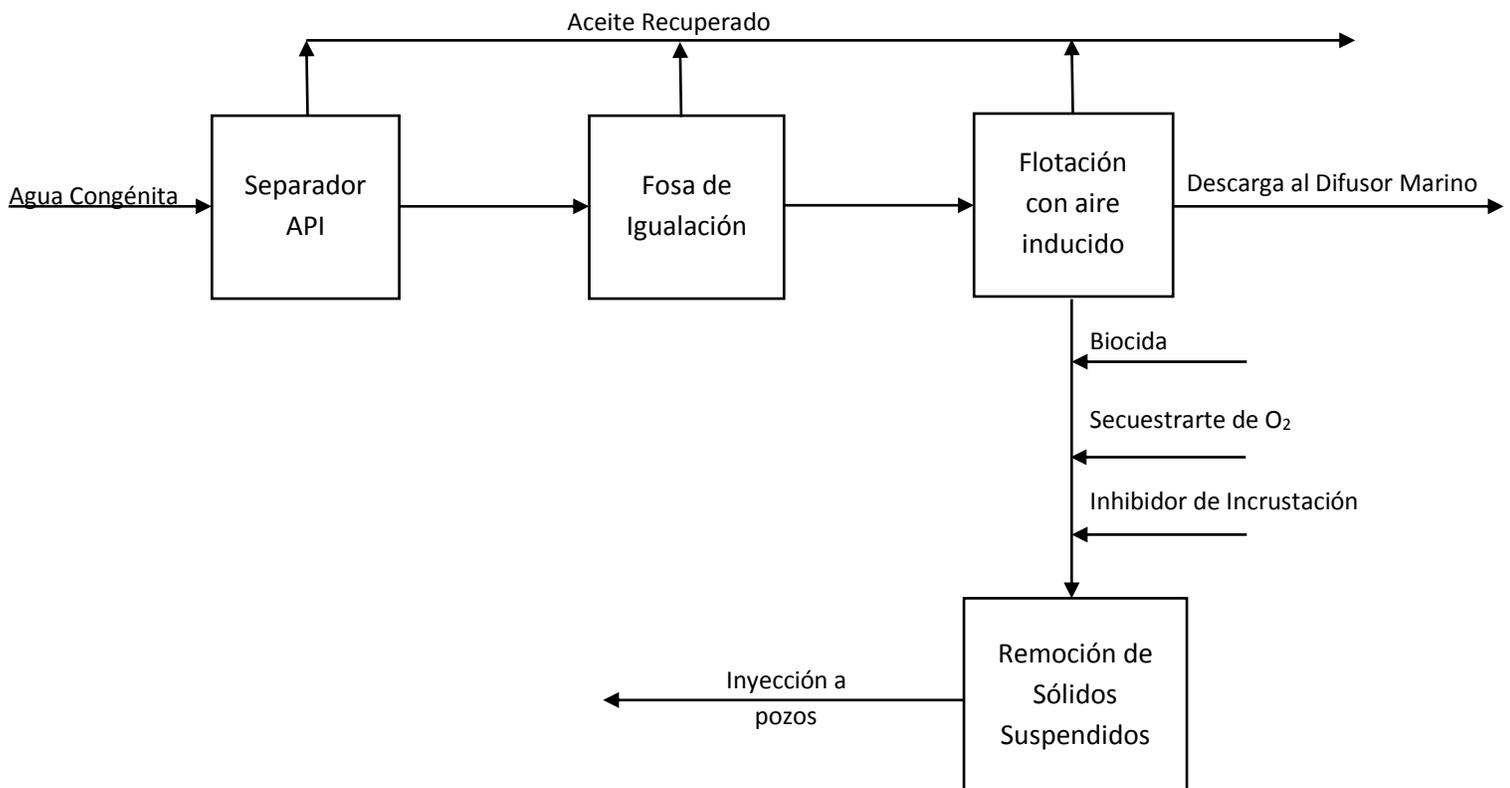
Tabla 1.3 Parámetros de diferentes aguas congénitas.

pH	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Demanda química de oxígeno(mg/L)	Referencia
6.86	61 244 000	2 690	Mijaylova, et al. 2005
5.5	164	1 600	Navarro, 2008
7.5	4.6	1 588	Bezerra, et al. 2011
7.03	143 900	11 541	Cabral, et al. 2013

## 1.5 Problemática

La Terminal Marítima Dos Bocas (TMDB) de PEMEX-Extracción, fue diseñada y construida en los últimos años de la década de los setentas, tomando en consideración un sistema para tratar las aguas residuales que se generaran como resultado de las diversas actividades que se realizan dentro de la Terminal, para ello se construyó la Planta de Tratamiento de Efluentes (PTE) que data también de esas fechas, misma que ha operado en forma continua desde su construcción.

Figura 1.4 Diagrama General de la PTE





Inicialmente solo se pensó en dar tratamiento a los efluentes líquidos o desechos aceitosos tales como: drenado de tanques de almacenamiento, puertos de abastecimiento, talleres, laboratorios, casas de bombas, servicios auxiliares y el drenaje pluvial aceitoso que comprende el escurrimiento del agua pluvial que se conduce por las calles, cúpulas de tanques y trincheras de tuberías.

Actualmente el agua congénita es vertida al mar a través de un difusor marino como lo marcan las normas NOM-143-SEMARNAT-2003 y la NOM-001-SEMARNAT-1996 respectivamente (ver ANEXO A). Esta generación de agua residual congénita se incrementa a medida que progresa la explotación del pozo y como consecuencia, la contaminación de los cuerpos receptores si es vertida sin tratamiento.

Debido a la falta de infraestructura para el tratamiento y acondicionamiento de agua congénita presente en el crudo ligero y pesado, la PTE se ha convertido en una instalación operativa estratégica que en gran medida contribuye para mantener la continuidad de los procesos productivos; no obstante, por diseño se establece que la función de la PTE es dar tratamiento a las aguas aceitosas residuales generadas durante las actividades propias de la TMDB, sin considerar su uso para el tratamiento del agua congénita drenada en los procesos de deshidratado y desalado de crudo.

Esta agua congénita de alta salinidad presenta los siguientes parámetros fuera de norma: grasas y aceites, DBO<sub>5</sub>, SST, Cadmio y Plomo, cuyos valores se muestran en la **Tabla 1.4**, problemática que aunada con los volúmenes de manejo promedio de 251,401.64 barriles/día (27.8 m<sup>3</sup>/min) hace inferir que la PTE actualmente instalada con una capacidad máxima de 200,000 barriles/día (22.1 m<sup>3</sup>/min) no es capaz de dar tratamiento al agua congénita producida, ya que tampoco cuenta con la tecnología necesaria para cumplir con los parámetros que establece la normatividad ambiental vigente.



Tabla 1.4 Caracterización del agua congénita de salida al difusor marino. Se resaltan los parámetros fuera de norma.

PARÁMETRO	NORMA	UNIDAD DE MEDIDA	AGUA CONGÉNITA DE SALIDA AL DIFUSOR SUBMARINO	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (NOM-001-SEMARNAT-1996)	
				P.M.	P.D
MATERIA FLOTANTE	NMX-AA-006-SCFI-2000	Ausente / Presente	Ausente	Ausente	Ausente
pH	NMX-AA-008-SCFI-2001	N.A.	6.93	5 a 10	6 a 10
TEMPERATURA	NMX-AA-007-SCFI-2001	°C	39.98	40.00	40.00
<b>GRASAS Y ACEITES</b>	NMX-AA-005-SCFI-2000	mg/L	<b>53.54</b>	15.00	25.00
COLIFORMES FECALES	NMX-AA-042-1987	NMP/100 mL	< 3	1,000.00	2,000.00
CIANUROS	NMX-AA-058-SCFI-2001	mg/L	<0.02	2.00	2.00
<b>DBO<sub>5</sub> TOTAL</b>	NMX-AA-028-SCFI-2001	mg/L	<b>382.13</b>	100.00	200.00
<b>SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)</b>	NMX-AA-034-SCFI-2002	mg/L	<b>170.41</b>	150.00	200.00
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	NMX-AA-004-SCFI-2000	ml/L	< 1	1.00	2.00
HUEVOS DE HELMINTO	NMX-AA-113-SCFI-1999	huevo /litro	<1	5.00	5.00
ARSÉNICO	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/L	< 0.001	0.10	0.20
<b>CADMIO</b>	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/L	<b>0.22</b>	0.10	0.20
COBRE	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/L	0.14	4.00	6.00
CROMO TOTAL	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/L	0.07	0.50	1.00
MERCURIO	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/L	< 0.001	0.01	0.02
NÍQUEL	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/L	1.29	2.00	4.00
<b>PLOMO</b>	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/L	<b>1.57</b>	0.20	0.40
ZINC	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/L	0.14	10.00	20.00
SULFATOS	NMX-AA-074-SCFI-1981	mg/L	110.52	-	-
SULFUROS	NMX-AA-084-1982	mg/L	92.50	-	-
CLORUROS	NMX-AA-073-SCFI-2001	mg/L	98,750.05	-	-
ALCALINIDAD TOTAL	NMX-AA-036-SCFI-2001	mg/L	1,176.88	-	-
DUREZA TOTAL	NMX-AA-072-SCFI-2001	mg/L	21,575.99	-	-
DUREZA Ca	NMX-AA-072-SCFI-2001	mg/L	232.52	-	-
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES	NMX-AA-034-SCFI-2001	mg/L	98,457.20	-	-
BACTERIAS SULFATO REDUCTORAS	ASTM-D4412-84	NMP/100 mL	858.00	-	-
HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (HTP's)	MÉTODO HACH	mg/L	26.23	-	-



## 1.6 Propuesta de Tratamiento

Con base en la caracterización que se tiene del agua congénita en la **Tabla 1.4** se observa que los sólidos suspendidos y las concentraciones de plomo y cadmio son altas, además, no es común que estos metales pesados se presenten en el agua congénita, por lo que es importante proponer un tratamiento que pueda retirarlos para que puedan ser dispuestas en el mar sin problema. En el presente trabajo se evalúan dos posibles propuestas de tratamiento: por centrifugación y por sedimentación. Dado que los compuestos de plomo y cadmio generalmente son insolubles en agua es posible que se encuentren en forma suspendida, así que como primera propuesta se realizó una prueba de separación por centrifugación, de esta forma se pueden retirar estos metales junto a los sólidos suspendidos totales y que puedan estar dentro de los límites permisibles. Con ésta remoción se espera que todos los parámetros del agua congénita, incluyendo el plomo y el cadmio, se encuentren dentro de los límites de la norma. En caso de que el plomo y el cadmio se encuentren en sus formas iónicas  $Pb^{2+}$  y  $Cd^{2+}$  la segunda propuesta de tratamiento pretende precipitar estos iones en sus formas de hidróxido adicionando hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ) ya que, tanto el hidróxido de plomo ( $Pb(OH)_2$ ) como el hidróxido de cadmio ( $Cd(OH)_2$ ) son insolubles en agua y puedan precipitar, por otro lado adicionar  $Ca(OH)_2$  al agua congénita provoca que aumente su pH y ayuda que los hidróxidos de los metales pesados precipiten más fácilmente y además, agregar una suspensión de  $Ca(OH)_2$  al agua congénita, puede coagular los sólidos suspendidos que estén presentes y que precipiten junto con los hidróxidos de plomo y cadmio y de esta manera mejorar la calidad del agua después de este tratamiento.

Para remover los sólidos producidos por la adición de  $Ca(OH)_2$ , se empleará un sistema de sedimentación del cual se realizaran pruebas a nivel laboratorio para comprobar la efectividad del  $Ca(OH)_2$ . Por último, ya que se pretende usar  $Ca(OH)_2$  en exceso para mejorar la precipitación, se realizaron pruebas de recirculación de lodos para poder recobrar parte del reactivo utilizado y verificar su eficacia.





## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Proponer un sistema de tratamiento para el agua congénita producida en la Terminal Marítima Dos Bocas de PEMEX Exploración y Producción, realizando pruebas experimentales a nivel laboratorio de centrifugación y precipitación para que parámetros como sólidos suspendidos totales y concentraciones de plomo y cadmio de dicho efluente sean reducidas al nivel marcado por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y dejen de ser una amenaza al ambiente marino.

### 2.2 Objetivos Específicos

Realizar pruebas experimentales para observar si la centrifugación es un tratamiento capaz de tratar el agua congénita.

Establecer las condiciones de tiempo y velocidad angular óptimas para tratar el agua congénita por medio de centrifugación.

Realizar pruebas preliminares que indiquen la posibilidad de utilizar el  $\text{Ca(OH)}_2$  como un posible agente de precipitación para el tratamiento de aguas congénitas.

Establecer la cantidades óptimas de  $\text{Ca(OH)}_2$  con las cuales pueda se pueda tratar el agua congénita.

Realizar pruebas de sedimentación para conocer la efectividad de este proceso para el tratamiento de aguas congénitas.

Realizar una prueba de sedimentación y calcular el área de sedimentación requerida para la remoción de contaminantes suspendidos en el agua congénita después de su tratamiento con  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Realizar una prueba de recirculación de lodos para comprobar la capacidad de reutilizar el  $\text{Ca(OH)}_2$  y reducir la cantidad de cal requerida para el sistema de tratamiento.



### **3 MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 Parámetros del Agua**

Los parámetros son las propiedades del agua que pueden ser medidas y nos permiten evaluar las condiciones en las que se un cuerpo de agua se encuentra para establecer si está contaminada o no y su grado de contaminación para que pueda ser tratada, reutilizada o dispuesta al ambiente de manera adecuada. La caracterización del agua por sus parámetros físicos es muy común debido a que su medición es rápida y los materiales necesarios no son muy costosos en comparación a los parámetros químicos cuyas pruebas generalmente requiere del uso de reactivos de alta pureza.

##### **3.1.1 Temperatura**

La temperatura es el promedio de la energía cinética molecular de las sustancias, como esta energía es imposible de medir de forma directa, se utiliza alguna propiedad física que dependa de esta energía y que pueda ser medida, por ejemplo el cambio de volumen del mercurio en un termómetro, el voltaje producido en la unión de dos metales distintos de un termopar o los espectros de la radiación emitida que puede ser detectada por un pirómetro. Cuando un cuerpo no presenta ningún tipo de energía cinética en sus moléculas, se indica que su temperatura es el cero absoluto y es considerado como el punto más bajo de temperatura que puede existir.

El control de la temperatura del agua es muy importante tanto si es agua de proceso como para las aguas residuales que serán desechadas al ambiente, los usos tanto agrónomos, industriales como domésticos requieren que la temperatura del agua sea la correcta para que las actividades a las cuales está destinada se lleven a cabo de la manera óptima. Por otro lado, el agua que se dispone a los cuerpos superficiales no debe superar los 40 °C para evitar reducir la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y no perjudique la vida acuática.

##### **3.1.2 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es la capacidad de un material o fluido para transportar la energía eléctrica libremente. El agua pura tiene una baja conductividad pero puede aumentar considerablemente con la presencia de iones disueltos por lo tanto, su conductividad depende de la cantidad de sales que estén



en disolución así que esta propiedad es muy utilizada para obtener una estimación rápida de la cantidad de sales disueltas. Para medir esta propiedad se utiliza un conductivímetro el cual consta de dos electrodos separados a una distancia específica y se hace correr una corriente eléctrica a través de la solución para detectar su capacidad conductora.

### 3.1.3 Turbidez

La turbidez es una medida de la obstrucción óptica de la luz que pasa a través de una muestra de agua. Esta se debe a la presencia de una amplia variedad de materia finamente dividida como lo son partículas microscópicas como arcilla, materia orgánica, microorganismos, etcétera, y su medición nos da una idea de la cantidad de sólidos suspendidos presentes. La turbiedad es un parámetro arbitrario y existen varias formas de medirla:

- Disco Secchi: se trata de un disco de 30 y 300 mm de diámetro de color blanco y negro que se ata a una cuerda por un anillo en el centro y sumerge en el cuerpo de agua y se mide la profundidad en la que el disco ya no se puede apreciar. Es muy común utilizarlo en grandes cuerpos de agua como lagos o el mar.
- Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU): Se utiliza un turbidímetro el cual mide la intensidad de luz dispersada en 90° respecto a un haz de luz que incide en una muestra de agua.
- Unidades de Atenuación Formanzin (FAU): Se utiliza un turbidímetro que mide la intensidad de luz transmitida a una muestra de agua. Es común que pueda ser medida también en espectrofotómetros.

### 3.1.4 pH

El símbolo pH significa potencial de hidrógeno y expresa la concentración de iones de hidrógeno en solución. Se utiliza el logaritmo absoluto de la concentración de hidrógeno para que sea más fácil de representar, sus valores van del cero al catorce tomando como valor neutral el siete, de esta manera todo valor de pH menor de siete tiene carácter ácido mientras que todo valor superior de siete corresponde a medio básico.



### 3.2 Sustancias Presentes en el Agua Congénita

Tanto la cantidad como la variedad de los componentes del agua congénita difieren entre sí dependiendo del pozo petrolero de donde provengan sin embargo, siempre estarán presentes hidrocarburos y algunos minerales como el sodio y el calcio por el contacto que tiene el agua con el crudo y los sedimentos que rodean el yacimiento. Es por ello que siempre se debe de realizar un análisis cualitativo y cuantitativo del agua congénita en cada pozo para observar cuales componentes presenta y en qué cantidad, para poder determinar si es posible que se pueda usar para la recuperación de los pozos por inyección o tenga que ser dispuesta en aguas superficiales. En la **Figura 3.7** se muestra un desglose de los constituyentes principales del agua congénita.

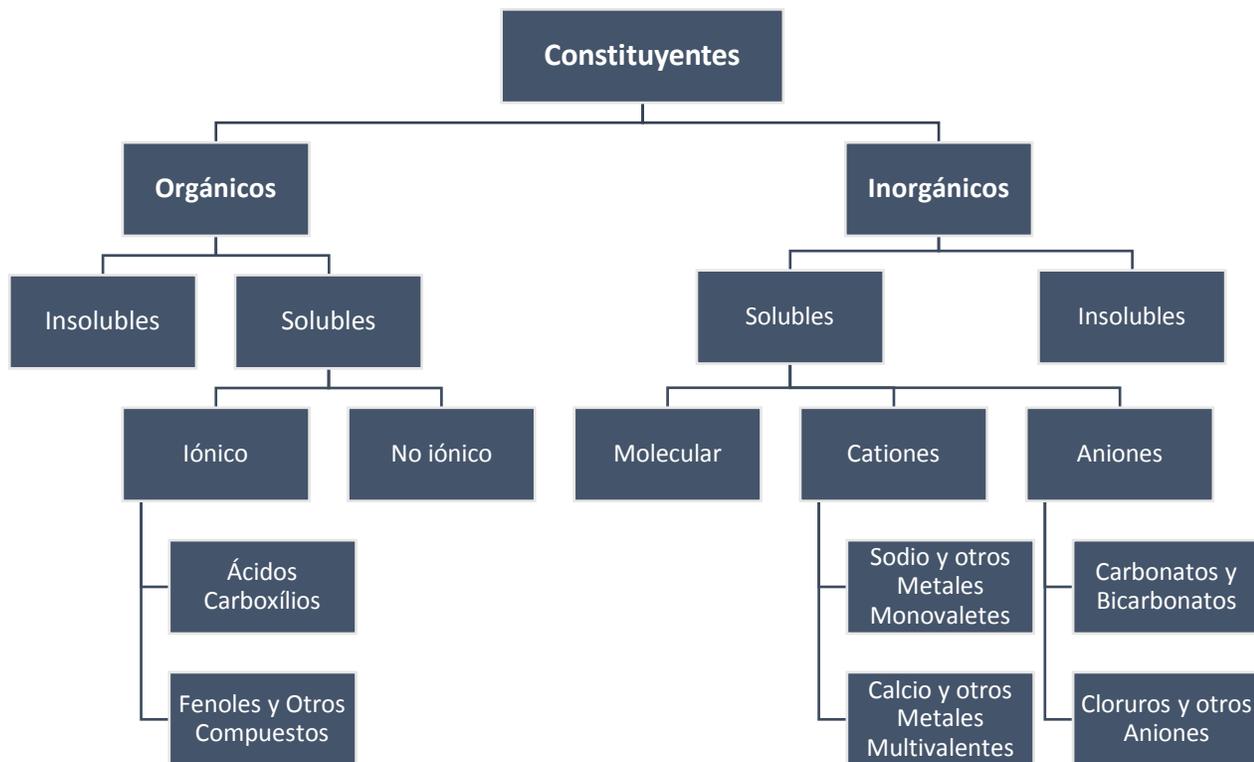


Figura 3.1 Componentes del agua congénita. (Hayes y Arthur, 2004).



### 3.2.1 Compuestos Orgánicos

El petróleo es una mezcla de una gran variedad de hidrocarburos y otros compuestos orgánicos que van desde a alcanos, alquenos y alquinos hasta compuestos aromáticos y heterocíclicos. Los compuestos insolubles en agua son fácilmente separables pero llegan a formar emulsiones debido algunos agentes emulsificantes presentes en el petróleo como lo son los asfaltos, fenoles, cresoles y arcillas, los cuales provocan que este proceso de separación sea más complicada. Los compuestos orgánicos solubles son más difíciles de separar debido a que, a diferencia de los compuestos inorgánicos solubles, estos no pueden ser precipitados con tanta facilidad, es por ello que se utilizan procesos de adsorción, oxidación o degradación biológica para eliminarlos. Si no son tratados de manera adecuada, los compuestos orgánicos pueden causar algunos problemas ambientales entre ellos, transformarse en sustancias más peligrosas como aminas, metano o ácido sulfhídrico por acción de bacterias anaerobias, los compuestos solubles se oxidan con el oxígeno disuelto lo que reduce el oxígeno disponible para la vida marina y algunos compuestos como el benceno y el fenol son perjudiciales para la salud tanto humana como animal, vegetal y bacteriana.

### 3.2.2 Sodio y Potasio

El sodio es un metal muy reactivo que no existe en estado puro en la naturaleza ya que reacciona al contacto con el aire o el agua. Todas las sales de sodio son muy solubles en agua, por ello es muy común encontrar sodio en el agua, en aguas marinas es el catión más abundante ya que su concentración promedio es de 1 g/L (1,000 ppm), esto debido a que el sodio tiende a permanecer en el agua una vez disuelto. Sin embargo, altas concentraciones tanto en cuerpos de agua dulce como en suelos son muy peligrosas ya que tanto la fauna marina como la flora terrestre, ya que absorben agua a través de la piel o raíz por el fenómeno de ósmosis, por lo tanto entre mayor sea la concentración de sodio en el agua circundante, menor es al agua que estos pueden aprovechar.

El potasio se encuentra en la naturaleza en forma de compuestos ya que, similar al sodio, es un elemento que reacciona vigorosamente con oxígeno y agua. Los compuestos de potasio son menos abundantes que los compuestos del sodio, su concentración promedio en el mar solo llega a 15 mg/L,



y en aguas residuales apenas llega a 100 mg/L por lo que es poco común que se presenten problemas debido al exceso de potasio en el ambiente.

### **3.2.3 Grasas y Aceites**

Las grasas y aceites animales y vegetales son cuantitativamente, el tercer componente de los alimentos y se encuentran comúnmente en la carne, semillas, germen de los cereales, frutas, etcétera. Estos pueden ser las grasas, aceites, ácidos grasos libres, ceras, parafinas, aceites minerales. Son compuestos muy estables, en su mayoría flotan en el agua o pueden formar emulsiones que pueden requerir la adición de ácidos o coagulantes para su separación. Son atacados por los ácidos minerales formando glicerina y ácidos grasos mientras que en la presencia de álcalis, se libera glicerina y se forman sales alcalinas de los ácidos grasos. Las grasas y aceites afectan adversamente la transferencia del oxígeno del agua a las células e interfieren con su desempeño dentro de los procesos biológicos por ello son difíciles de degradar biológicamente y además interfieren en la aireación de las aguas.

### **3.2.4 Compuestos Azufrados**

De la misma manera que el nitrógeno, el azufre presenta una gran variedad de especies químicas entre ellas los sulfuros, sulfatos, sulfitos, tiosulfatos etcétera, los cuales en grandes cantidades pueden ser peligrosas para la salud ya que los compuestos de azufre tienen cierta facilidad para formar compuestos ácidos.

El sulfato es de los aniones más comunes en las aguas naturales ya que sus sales de sodio y magnesio forman parte de los estratos geológicos por donde el agua de infiltra hasta llegar a los acuíferos. El sulfato genera problemas ambientales ya que tiene propiedades como purgante dentro de los organismos y puede transformarse en ácido sulfhídrico por acción de bacterias anaerobias por lo cual genera problemas de mal olor y puede formar ácido sulfúrico que es un ácido fuerte muy peligroso.

Muchos de los sulfuros que se encuentran en el agua son generados por las bacterias anaerobias tanto en aguas superficiales como en subterráneas formando ácido sulfhídrico y luego este reacciona con el medio formando sulfuros de sodio o calcio. El principal problema con los sulfuros es cuando se encuentra en solución con un pH menor de 7 ya que el sulfuro cambia a ácido sulfhídrico provocando



problemas de corrosión y mal olor pero a pH alcalino, la mayor parte de los sulfuros existen como ión bisulfuro o sulfuro reduciendo la cantidad de ácido sulfhídrico libre.

Los sulfitos son aniones de oxígeno y azufre pero el azufre tiene valencia de +4 por lo que puede ser oxidado hasta +6 formando así el ión sulfato. Es muy utilizado en las aguas para calderas para eliminar el oxígeno disuelto, pero por la misma razón es perjudicial para la vida marina además de ser capaz de aumentar la acidez en el agua.

### **3.2.5 Cloruros**

Los cloruros se presentan en el agua de manera natural, sin embargo muchos residuos industriales contienen cantidades apreciables de cloruros aunque a concentraciones de 250 mg/L no son perjudiciales para plantas y animales. Sin embargo, en la naturaleza existen pocos cloruros orgánicos por lo que tienen mala biodegradabilidad y tienden a permanecer por muchos años en el ambiente y puedan acumularse hasta alcanzar concentraciones peligrosamente altas.

### **3.2.6 Metales Pesados**

Se considera como metales pesados a los elementos con número atómico mayor al del calcio (20) entre los ellos cromo, manganeso, hierro, níquel, cobre, zinc, arsénico, plata, cadmio, mercurio y plomo. Algunos de estos elementos son indispensables para el desarrollo normal de la vida biológica pero muchos otros presentan alta toxicidad en pequeñas concentraciones (hasta 1 ppm). Los metales como el hierro y el manganeso llegan a los cuerpos de agua por la infiltración del agua por los minerales pero los metales como plomo, cadmio, mercurio, entre otros, son introducidos al agua por descargas industriales y la mala disposición de las baterías.

Existen varios sistemas de remoción de metales pesados en el agua como lo es la ósmosis inversa que es muy efectiva para tratar flujos moderados de agua pero existen otros tratamientos que dependen de las especies químicas en cuestión, por ejemplo para la precipitación química se utiliza cal para precipitar el níquel, cadmio y el plomo mientras que para el zinc, hierro, cobre y manganeso se obtienen mejores resultados usando óxido de magnesio. Por otro lado, el intercambio iónico presenta mejores remociones para el zinc, el cobre y el cadmio que para el plomo y el níquel. La oxidación-reducción se



emplea para reducir la toxicidad o la solubilidad de los metales y que puedan ser removidos más fácilmente, como el  $\text{Cr}^{6+}$  que es un agente carcinógeno mientras que el  $\text{Cr}^{3+}$  no presenta algún efecto nocivo a la salud y el  $\text{Fe}^{3+}$  que presenta una menor solubilidad que el  $\text{Fe}^{2+}$ .

### 3.2.6.1 Hierro

Las aguas con hierro al ser expuesta al aire, por acción del oxígeno, aumenta la turbidez ya que el  $\text{Fe}^{2+}$  disuelto se oxida a  $\text{Fe}^{+3}$  y este forma un hidróxido insoluble que provocan el aumento de la turbidez en el agua, sin embargo, como este proceso de oxidación es lento, es posible que el agua pueda mantenerse aireada por algún tiempo siempre que el pH sea menor de 6. Las aguas superficiales tienden a tener concentraciones de hasta 1 mg/L de hierro pero las aguas subterráneas llegan a tener concentraciones de hasta 50 mg/L. El consumo de este metal no tiene efectos nocivos para la salud aunque puede dar cierto sabor metálico al agua. Por otro lado, el hierro es bastante perjudicial para los filtros y membranas de los equipos de tratamiento de aguas ya que un aumento del pH de más de 8 provoca la precipitación de hidróxido de hierro que provoca taponamientos en los filtros y daña las membranas reduciendo su tiempo de vida útil.

### 3.2.6.2 Plomo

El plomo es uno de los metales que se han utilizado por la humanidad desde hace más de dos mil años. Es un metal muy denso, flexible, fácil de fundir y tiene relativa resistencia al ataque del ácido sulfúrico y clorhídrico pero se disuelve con lentitud en ácido nítrico. Fue muy utilizado como material para las tuberías, láminas para escribir en ellas, revestimientos de techumbres y pinturas sin embargo, debido a su toxicidad en los organismos, su uso se ha disminuido paulatinamente. La presencia del plomo en el ambiente se debe principalmente a las trazas del metal que se disuelven dentro de las tuberías del servicio de agua potable y a los desechos de la industria minera ya que si no se tratan correctamente, estos efluentes pueden llegar a los mantos freáticos contaminando el agua que posteriormente recibirán a los ciudadanos. Cuando el plomo llega al mar perjudica la industria pesquera ya que contamina los productos marinos con plomo y dificulta su comercialización.

A pesar de que el plomo no es común que se presente como componente en el agua congénita, generalmente su concentración es muy baja y no representa peligro alguno para que pueda ser



desechada al mar, sin embargo, cuando se presentan altos niveles de este metal, es un problema tratarlas debido a que los sistemas de tratamiento no están acondicionados para removerlo e instalar un sistema tratamiento exclusivo para retirarlo es muy costoso y sólo sería necesario para tratar el agua de un solo pozo. Por ello se opta por utilizar sistemas de tratamiento simples que no requieran de una gran inversión para su operación o realizar modificaciones a los sistemas actualmente instalados.

### **3.2.6.3 Cadmio**

Es un metal tóxico para todas las formas de vida ya que puede formar compuestos complejos con cianuros, aminos y haluros y el envenenamiento se produce al entrar al organismo por las vías respiratoria y oral. En el hombre puede provocar daños en el aparato digestivo, riñones y, en los huesos provoca descalcificación y lesiones en la médula ósea. La presencia del cadmio en el agua es provocada por los desechos de las fábricas de pinturas, baterías, plásticos, plaguicidas así como de la industria electrónica y metalúrgica. Al igual que el plomo, no es común que el cadmio se encuentre en el agua congénita y su presencia en altas concentraciones provoca los mismos problemas de tener que instalar equipo nuevo para poder removerlo.

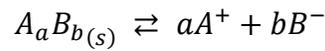
## **3.3 Métodos de Tratamiento**

### **3.3.1 Precipitación**

La precipitación es un método de separación utilizado en el tratamiento de aguas el cual consiste en agregar un agente precipitante para que reaccione con alguna especie química en solución y forme un compuesto que sea insoluble y pueda ser removido fácilmente ya sea por filtración o por sedimentación. Los elementos más comunes que pueden ser removidos por precipitación son el calcio, magnesio, silicio, cadmio, cobre, cromo, plomo, hierro, níquel y zinc; y los agentes precipitantes más comunes son los hidróxidos de sodio y calcio y los carbonatos de sodio y calcio. La propiedad de los compuestos que indica el grado de solubilidad que tienen en el agua es la constante del producto de solubilidad ( $K_{ps}$ ), la cual se define como el producto de las concentraciones molares de los iones de un



electrolito poco soluble teniendo cada una como exponente el coeficiente estequiométrico correspondiente. En general, para una reacción tipo:



La constante de producto de solubilidad sería:

$$K_{ps} = [A^+]^a [B^-]^b = \left[ \frac{\text{mol}}{L} \right]^{a+b}$$

Por ejemplo, la reacción de disociación del  $\text{Ca(OH)}_2$  sería:



La  $K_{ps}$  se calcularía de la siguiente manera:

$$K_{ps} = [\text{Ca}^{2+}][\text{OH}^-]^2$$

Entre más pequeño sea el valor de la  $K_{ps}$ , más insoluble será el compuesto en agua. En la **Tabla 3.1** se muestra los valores de  $K_{ps}$  de algunos compuestos. Basándose en el valor de la  $K_{ps}$  de los diferentes compuestos que puede formar el elemento a remover, se puede determinar cuál es el mejor agente precipitante.

La temperatura es un factor importante para el proceso de sedimentación ya que, por lo general, una mayor temperatura aumenta la solubilidad de los compuestos aunque, existen algunas sustancias cuya

**Tabla 3.1** Constante del producto de solubilidad de algunos compuestos (Skoog, et al. 2005).

Compuesto	$K_{ps}$	Compuesto	$K_{ps}$
$\text{CdCO}_3$	$1.8 \times 10^{-14}$	$\text{Cd(OH)}_2$	$4.5 \times 10^{-15}$
$\text{CoCO}_3$	$1.0 \times 10^{-10}$	$\text{Co(OH)}_2$	$1.3 \times 10^{-15}$
$\text{FeCO}_3$	$2.1 \times 10^{-11}$	$\text{Fe(OH)}_2$	$4.1 \times 10^{-15}$
$\text{PbCO}_3$	$7.4 \times 10^{-14}$	$\text{Pb(OH)}_2$	$5 \times 10^{-16}$
$\text{CdCl}_2$	$1.78 \times 10^3$	$\text{CdS}$	$1.0 \times 10^{-14}$
$\text{CuCl}_2$	$1.9 \times 10^{-7}$	$\text{CoS}$	$3 \times 10^{-26}$
$\text{FeCl}_2$	$1.53 \times 10^3$	$\text{FeS}$	$8 \times 10^{-19}$
$\text{PbCl}_2$	$1.7 \times 10^{-5}$	$\text{PbS}$	$3 \times 10^{-28}$

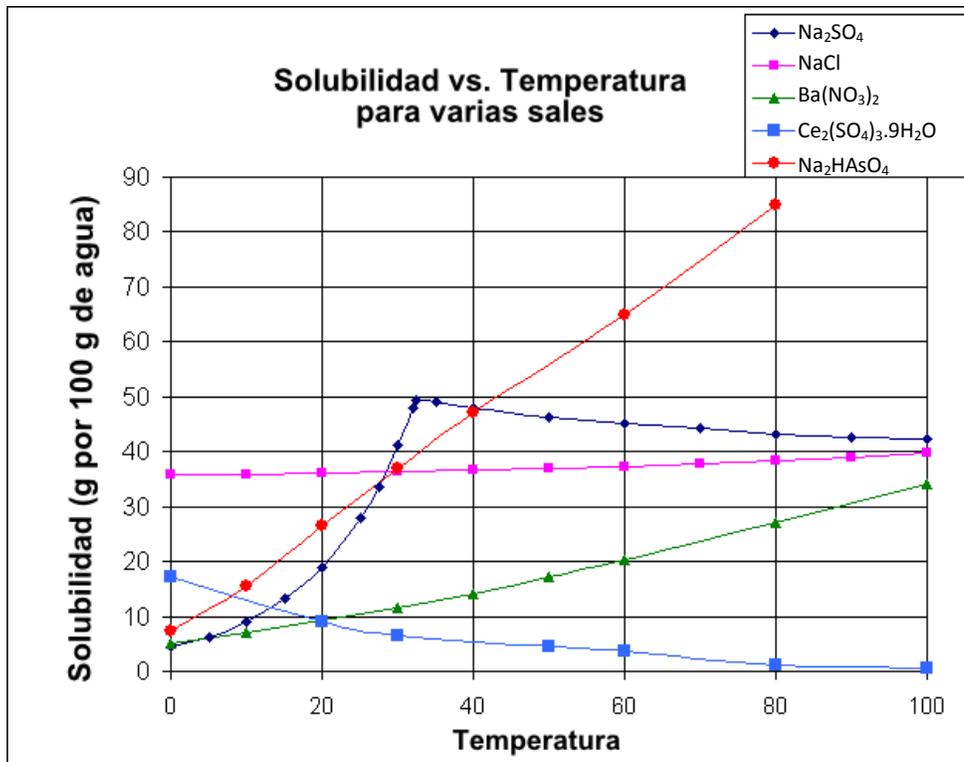


Figura 3.2 Comportamiento de la solubilidad respecto a la temperatura. (Hall et al. 1999).

solubilidad se reduce a altas temperaturas y otras sales como la sal de mesa (NaCl) cuya solubilidad no se ve alterada con el cambio de temperatura, la **Figura 3.2** muestra el comportamiento de la solubilidad de algunos compuestos en función de la temperatura. Por otro lado, el pH presente en la solución puede afectar si un compuesto puede disolverse o no por ejemplo, el sulfuro de cobre II (CuS) es un compuesto insoluble en agua, pero su solubilidad aumenta en medio ácido y por otro lado, el hidróxido de plomo II (Pb(OH)<sub>2</sub>) también es muy insoluble en agua, pero a pH mayor de 12 aumenta su solubilidad.

### 3.3.2 Sedimentación

La sedimentación es un método que permite la separación de partículas sólidas o líquidas en un fluido (líquido o gaseoso) por acción de las fuerzas gravitacionales y es ampliamente usado para la eliminación de sólidos en aguas negras, sedimentación de cristales del licor madre, separación de partículas alimenticias sólidas de un líquido preparado y la sedimentación de una suspensión en el proceso de lixiviación de la soya.



Para que el proceso de sedimentación se pueda llevar a cabo es necesario que exista una diferencia de densidades entre la partícula y el fluido, debe de existir una fuerza gravitatoria externa que imparta un movimiento a la partícula. Existen tres tipos de fuerzas que interactúan en una partícula en suspensión, la primera es la fuerza de gravedad ( $F_g$ ) que depende de la aceleración gravitacional y de la masa de la partícula, la segunda es la fuerza de flotación ( $F_b$ ) que depende la diferencia de densidades y la tercera es la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) que depende de la velocidad de la partícula, su densidad y su área proyectada, además su dirección depende siempre es contraria a la dirección a la cual la partícula se mueve, por ejemplo si la partícula tiende a hundirse ( $F_g > F_b$ ), la dirección de  $F_D$  será hacia arriba y en caso contrario en que la partícula tienda a flotar ( $F_b > F_g$ ), la su dirección será hacia abajo.

Dependiendo del tipo de partículas a precipitar en un fluido y su concentración se puede presentar tres principales tipos de sedimentación, precipitación libre o Tipo I, precipitación floculenta o Tipo II y la precipitación retardada o tipo III.

### 3.3.2.1 Sedimentación libre

La precipitación libre se presenta cuando la concentración de las partículas suspendidas es baja, de tal manera que cada partícula no tenga ningún tipo de interacción con las demás. Para calcular la velocidad de sedimentación, suponiendo que las partículas tienen forma esférica, se emplea la ecuación de Stokes:

$$v = \sqrt{\frac{4g}{3C_D} \left( \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) D_p^3}$$

Donde:

$v$  es la velocidad de sedimentación de la partícula (m/s).

$g$  es la aceleración de la gravedad (m/s).

$\rho$  es la densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>).

$\rho_p$  es la densidad de la partícula sólida (kg).

$D_p$  es el diámetro de la partícula (m).



$C_D$  es el coeficiente de arrastre.

El coeficiente de arrastre depende del número de Reynolds ( $Re$ ) que y se calcula de la siguiente manera:

Si  $Re < 1$ :

$$C_D = \frac{24}{Re}$$

Si  $1 < Re < 10^3$ :

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34$$

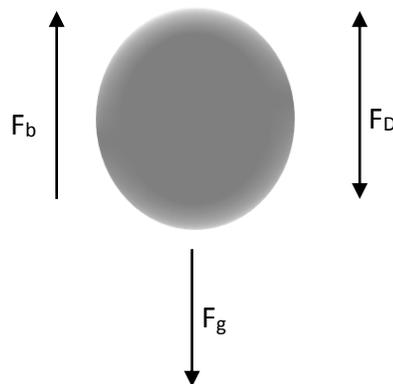
Si  $10^3 < Re < 10^5$ :

$$C_D \cong 0.44$$

Debido que para calcular la velocidad de sedimentación se requiere conocer el valor de  $Re$  y este depende de la velocidad, se necesita realizar sustituciones sucesivas para llegar a un resultado convergente.

### 3.3.2.2 Sedimentación

La sedimentación retardada se presenta cuando las son capaces de precipitar en conjunto provocando que se forme una capa límite del clarificado que va aumentando de tamaño conforme las partículas precipitan. A medida que las partículas precipitan y se acumulan en el fondo del recipiente, su velocidad de sedimentación también disminuye hasta que llega un punto en donde la altura de la zona de las partículas ya no disminuye más. La **Figura 3.4** muestra la manera en que se produce la precipitación y



*Figura 3.3* Fuerzas que interaccionan en una partícula en suspensión.

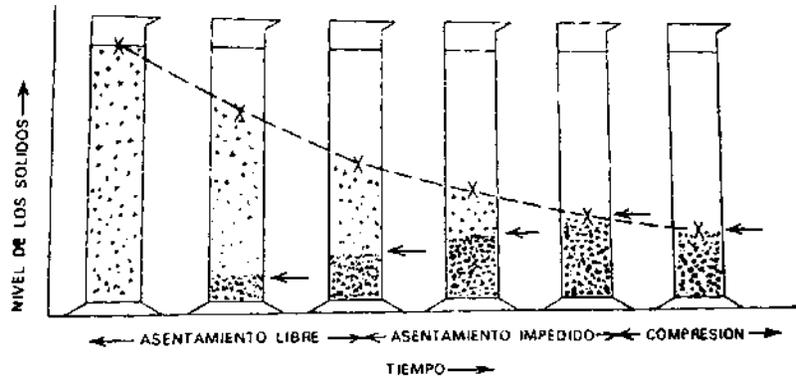


Figura 3.4 Sedimentación retardada (Kemmer, et al. 1999)

se puede observar como la zona de clarificación va en aumento conforme los sólidos se compactan en el fondo. Es complicado realizar una estimación algebraica de la velocidad de sedimentación, por lo tanto, se utiliza un método experimental el cual es explicado en el Anexo D.

### 3.3.3 Centrifugación

La centrifugación es un método de separación para retirar partículas sólidas o líquidas por medio de fuerzas centrífugas y es utilizado cuando las partículas, por su similitud de densidades, no pueden ser separadas por sedimentación o requieren de tiempos muy prolongados como en la separación de la crema de la leche, de la sangre o retirar partículas sólidas como en la producción de cerveza, jugos de frutas y aceites comestibles.

Los separadores centrífugos se basan en el principio común de que la rotación de un objeto en torno a un eje o punto central, a una distancia radial constante desde dicho punto, produce una fuerza que actúa sobre dicho objeto. El objeto que gira en torno al eje cambia de dirección constantemente, con lo cual se produce una aceleración aun cuando la velocidad rotacional sea constante. Si un objeto que se hace girar es un recipiente cilíndrico, el contenido de fluidos y sólidos desarrolla una fuerza igual y opuesta, llamada fuerza centrífuga, hacia las paredes del recipiente. Esta fuerza causa la sedimentación de las partículas través de la capa de líquido que las rodea. En la **Figura 3.5** se muestra un recipiente cilíndrico o tazón giratorio y la alimentación de una suspensión de partículas sólidas en un fluido ingresa por el centro, al entrar la alimentación es arrastrada de inmediato hacia las paredes del recipiente. La fuerza centrífuga es tan grande que la fuerza de gravedad es despreciable y que permite que los sólidos se acumulen en forma vertical.

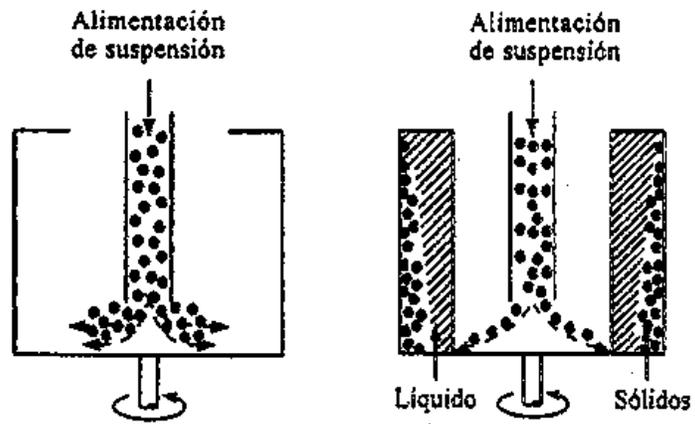


Figura 3.5 Diagrama de separación por centrifugación. (Geankoplis, 2006)



## 4 METODOLOGÍA

Se realizaron dos etapas de experimentación, en la primera hicieron pruebas de centrifugación y en la segunda se realizaron pruebas de precipitación con hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), y de sedimentación con recirculación de lodos para aprovechar mejor el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

### 4.1 Material, Equipo y Reactivos Utilizados

#### 4.1.1 Material

- 1 vaso de precipitados de 500 mL.
- 2 vasos de precipitados de 250 mL.
- 2 Pipetas de 10 mL.
- 1 Probeta de 500 mL.
- 1 Probeta de 250 mL.
- 1 Embudo de separación de 500 mL.
- 1 Bureta de 25 mL.
- 1 Matraz Aforado 1000 mL.
- Tubos de ensayo con tapa de 10 mL.
- Tubos de microcentrífuga de 2 mL.
- 2 Soportes Universales.
- 2 Perillas.
- 1 Pinzas para bureta.

#### 4.1.2 Equipo

Tabla 4.1 Equipo utilizado.

	Equipo	Marca	Modelo
	Mallas Tyler	ALCON	100 (149 $\mu\text{m}$ ) 270 (53 $\mu\text{m}$ )



Tabla 4.1 Equipo utilizado. (Continuación)

	Equipo	Marca	Modelo
	Microcentrífuga	Eppendorf	MiniSpin
	Placa de agitación y calentamiento	Thermo Scientific	Cimarec
	Balanza Analítica	Denver Instrument	0.1 mg - 210 g



Tabla 4.1 Equipo utilizado. (Continuación)

	Equipo	Marca	Modelo
	Potenciómetro	Horiba	F51.
	Medidor Multiparamétrico (pH, $\mu$ S, $^{\circ}$ C)	Conductronic	PC18
	Espectrofotómetro	HACH	DR 4000U

#### 4.1.3 Reactivos

Óxido de Calcio (CaO) comercial.

Agua desionizada.



## 4.2 Pruebas de Centrifugación

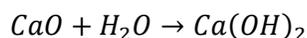
Las pruebas de centrifugación se realizaron a 40 °C (temperatura del agua congénita) de la siguiente manera: se tomaron 20 muestras de 8 mL de agua congénita y estas se sometieron a centrifugación a las velocidades de 3,000, 6,000, 9,000 y 12,000 rpm y durante 1, 2, 3, 4 y 5 minutos de tal manera que cada una de las muestras sea tratada a una velocidad y durante un tiempo diferente así como se muestra en la **Tabla 4.2**

*Tabla 4.2 Esquema que muestra los parámetros de centrifugación de cada muestra.*

	3000 rpm	6000 rpm	9000 rpm	12000 rpm
<b>1 minuto</b>	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
<b>2 minutos</b>	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8
<b>3 minutos</b>	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 12
<b>4 minutos</b>	Muestra 13	Muestra 14	Muestra 15	Muestra 16
<b>5 minutos</b>	Muestra 17	Muestra 18	Muestra 19	Muestra 20

## 4.3 Pruebas de Precipitación

Para el tratamiento por precipitación, primero se tamizó óxido de calcio comercial para remover impurezas. Se prepararon tres mezclas de cal en agua desionizada con una concentración de 1 g/L, 3 g/L y 6 g/L; y las tres mezclas se dejaron en agitación durante 1 h para que el CaO pueda reaccionar completamente con el agua y formar el hidróxido de calcio como se muestra en la reacción 4 para formar el Ca(OH)<sub>2</sub>.



Reacción 4

Debido a que el Ca(OH)<sub>2</sub> es poco soluble en agua, se filtra la mezcla de 1 g/L para remover la cal que se encuentre suspendida y de esta manera obtenemos una solución y dos suspensiones de cal.



Posteriormente, a una muestra de 250 ml de agua congénita se le dosificaron diferentes volúmenes de la solución de 1 g/L de cal. La dosificación se realizó a temperatura ambiente (14 °C - 19 °C) con una agitación de 800 rpm. El seguimiento de la reacción se llevó a cabo midiendo de manera continua el pH además, cuando los valores de pH de 8, 9 y 10 y 10.4 se tomó una muestra de 10 mL con las cuales se realizaron las mediciones de conductividad eléctrica y turbidez (**Figura 4.2**). La prueba anterior fue repetida usando las dos suspensiones de cal de 3 g/L y 6 g/L y además, se realizó otra a una temperatura de 40 °C utilizando la suspensión de 6 g/L de cal.

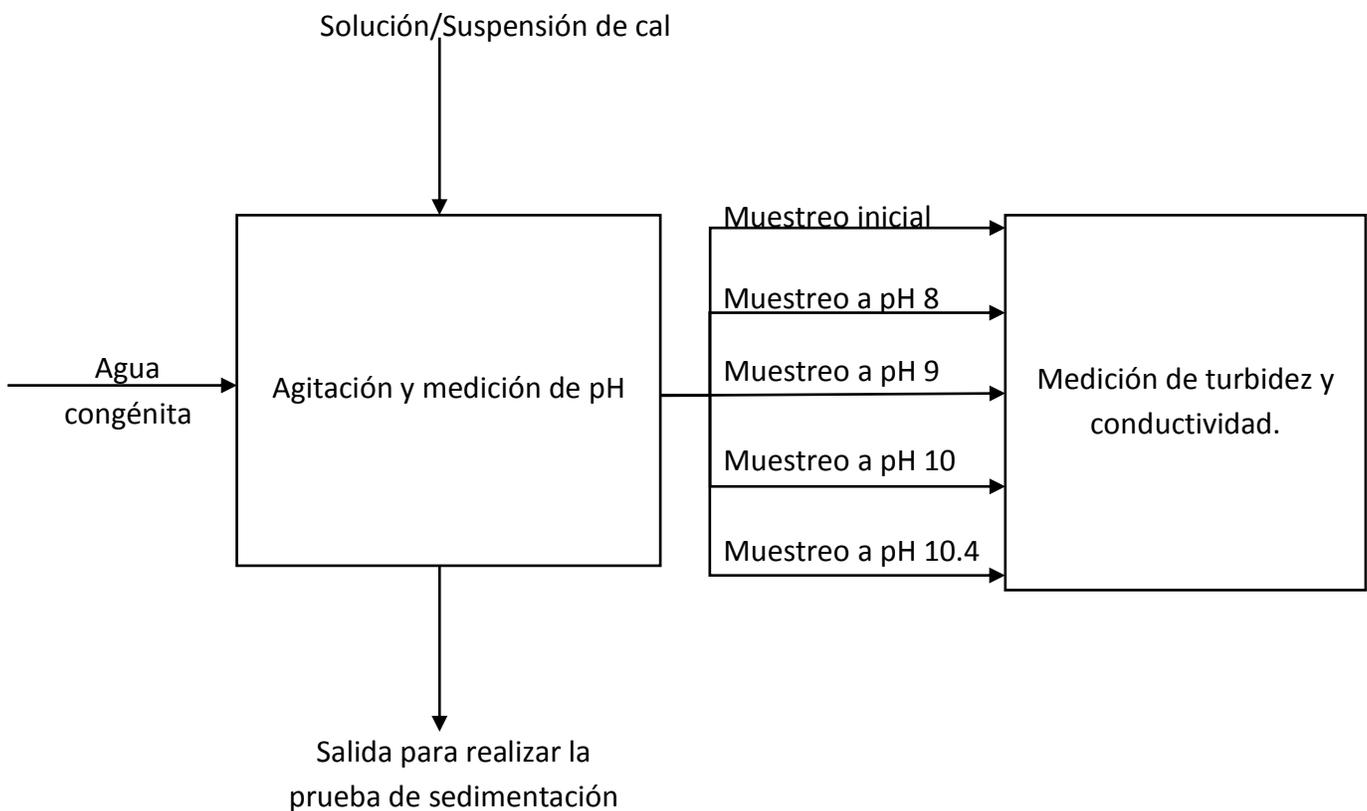


Figura 4.1 Diagrama de la prueba de precipitación.



*Figura 4.2* Equipo montado para realizar las pruebas de precipitación.

#### 4.4 Prueba de Sedimentación

La prueba de sedimentación se realizó con la mezcla que resultó de la prueba de precipitación utilizando la suspensión de cal de 6 g/L a temperatura ambiente. Dicha mezcla se agitó por 5 minutos y se vació a una probeta de 250 mL en donde se midió la altura inicial del nivel del agua y posteriormente se fue determinando la altura de la capa límite formada a diferentes tiempos hasta que fuera constante.

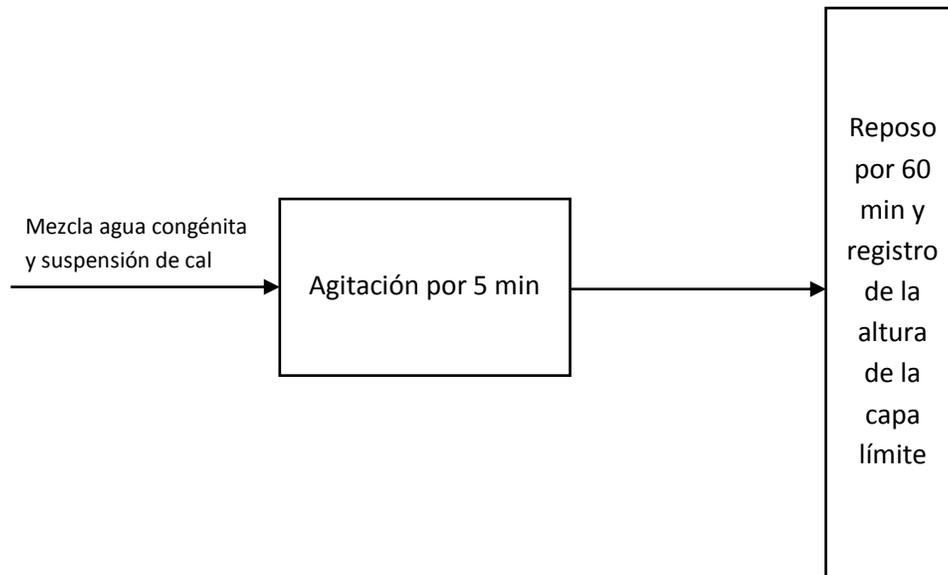


Figura 4.3 Diagrama de la prueba de precipitación.

#### 4.5 Prueba de Recirculación de Lodos

Por último, se realizó una prueba de recirculación de lodos producidos de la precipitación por efecto de la cal para evaluar la posibilidad de reutilizar estos desechos. La prueba se realizó añadiendo a una muestra de 100 mL de agua congénita la suspensión de cal de 6 g/L hasta llegar a un pH de 10 a una temperatura de 40 °C, se realizó una prueba de sedimentación como la anteriormente explicada, y a continuación se vació la mezcla dentro de un embudo de separación para poder retirar los lodos, mismos que fueron pesados y mezclados a nueva muestra de 100 mL de agua congénita. A esta nueva mezcla se añadió la solución de cal de 6 g/L mientras se calentaban a una temperatura de 40 °C hasta llegar al pH 10. Posteriormente se realizó otra prueba de sedimentación, se separaron y pesaron los lodos y se volvieron a añadir a una nueva muestra de 100 mL de agua congénita y así sucesivamente hasta obtener cinco pruebas de sedimentación así como lo muestra la **Figura 4.5**

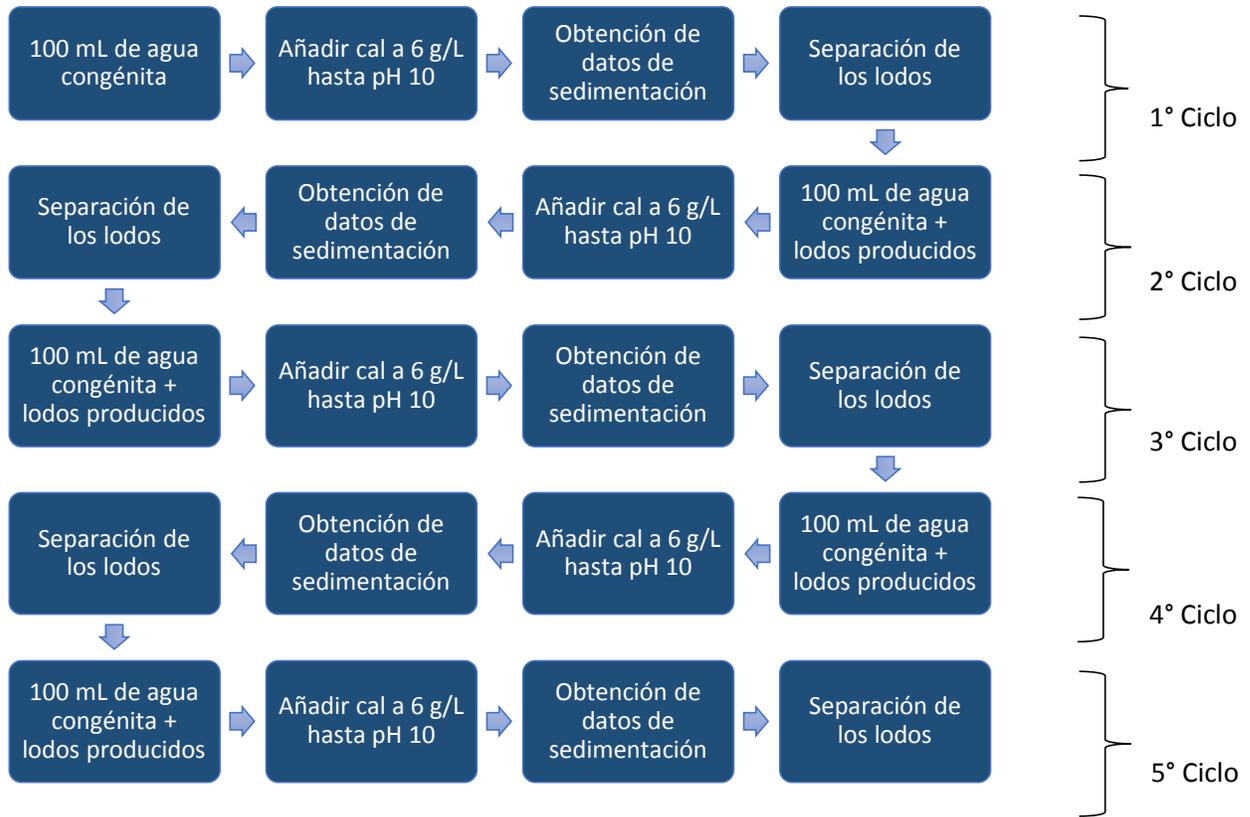


Figura 4.4 Esquema de la prueba de recirculación de lodos.



Figura 4.5 Separación de lodos por medio del embudo de separación.



## 5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Prueba de centrifugado

En la **Tabla 5.1** y en la **Figura 5.1** se muestran los resultados de la prueba de centrifugación del agua congénita a 40 °C mostrando los valores de turbidez del sobrenadante. De la **Figura 5.1** se observa que, a partir de una velocidad de 6,000 rpm, los resultados de la centrifugación comienzan a variar poco entre los tiempos de centrifugación además, es apreciable que para una velocidad de 9,000 rpm se logra una remoción de entre el 70 % y 85 % de la turbidez, lo cual indica que dicho tratamiento provee buenos resultados para eliminar los sólidos disueltos. En el Anexo B se muestran las imágenes de las muestras después de ser centrifugadas.

**Tabla 5.1** Resultados de la prueba de centrifugación.

Velocidad (rpm)	Turbidez (FAU)				
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
0	142	142	142	142	142
3000	75	52	50	39	50
6000	43	35	35	38	39
9000	42	35	29	24	24
12000	42	33	30	33	17

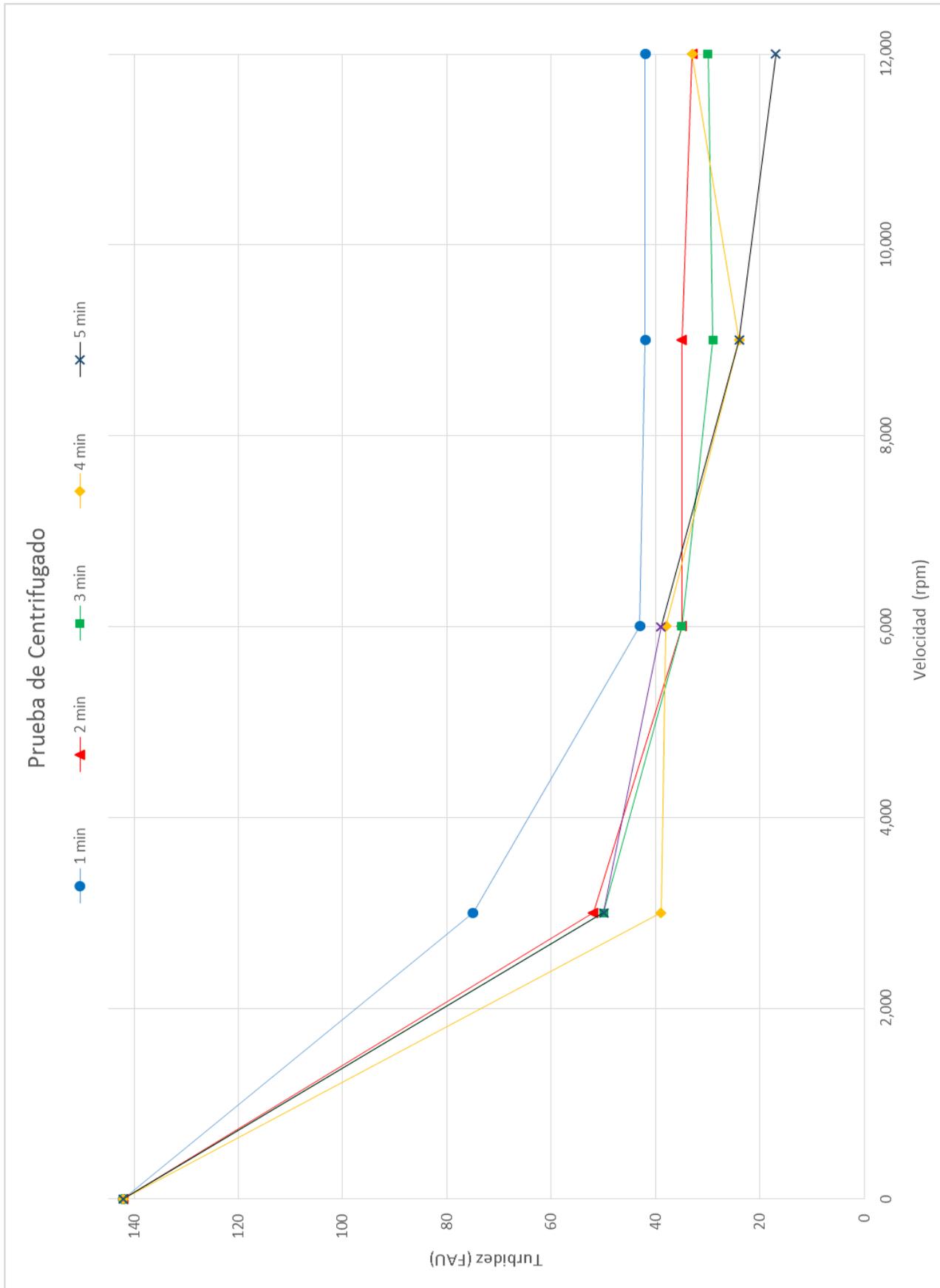


Figura 5.1 Resultados de la prueba de centrifugación.



## 5.2 Prueba de precipitación

De la mezcla de 1 g/L de cal, después de ser filtrada para remover la cal que se encontraba en suspensión, se calculó que la concentración de la solución remanente era 837 ppm de CaO. Los resultados obtenidos de las pruebas de precipitación a temperatura ambiente (14 °C – 19 °C) realizadas con la solución de 837 ppm y las suspensiones de 3 g/L y 6 g/L fueron el volumen añadido, pH, turbidez y conductividad. La concentración de cal en durante los experimentos fue calculada como se muestra en la ecuación 5.1.

$$C = \frac{C_I V_C}{V_I + V_C} \tag{5.1}$$

Donde:

C = la concentración de cal como CaO en la mezcla junto con el agua congénita (ppm).

C<sub>I</sub> = la concentración de la mezcla de cal como CaO (ppm).

V<sub>I</sub> = el volumen inicial de la muestra de agua congénita (mL).

V<sub>C</sub> = el volumen adicionado de la solución o suspensión de cal (mL).

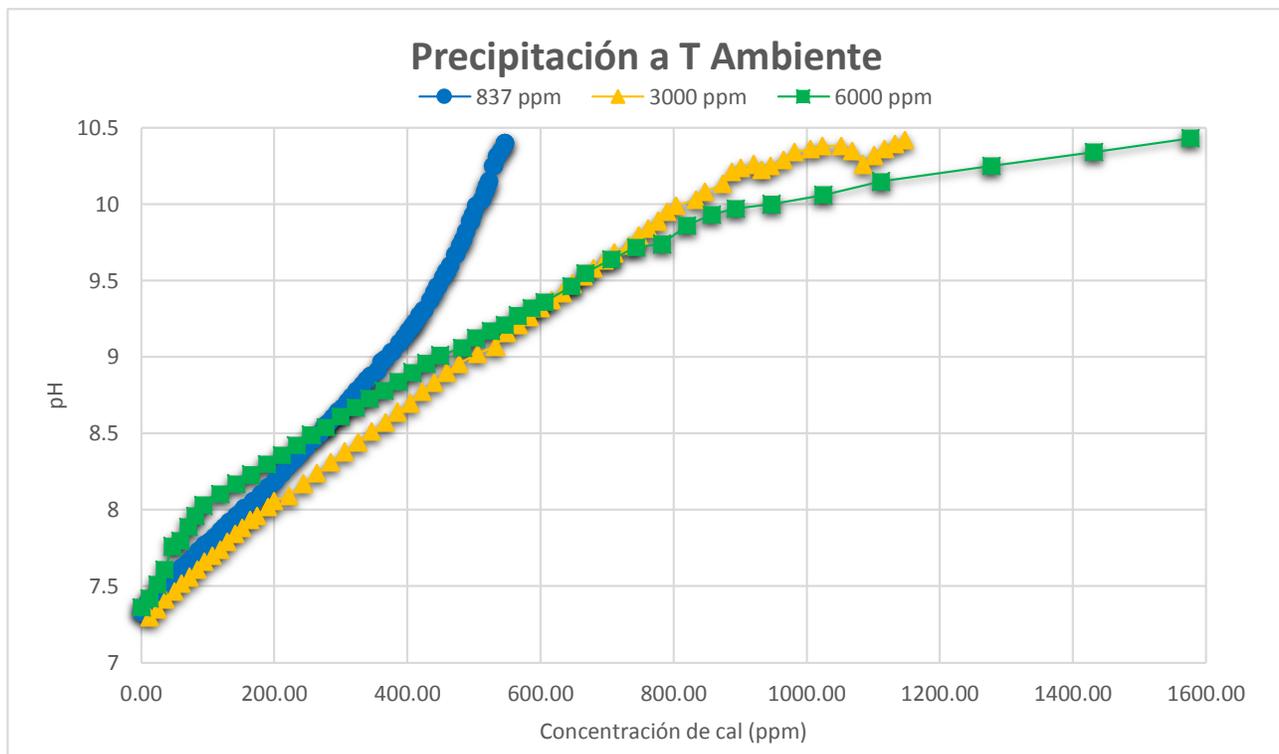
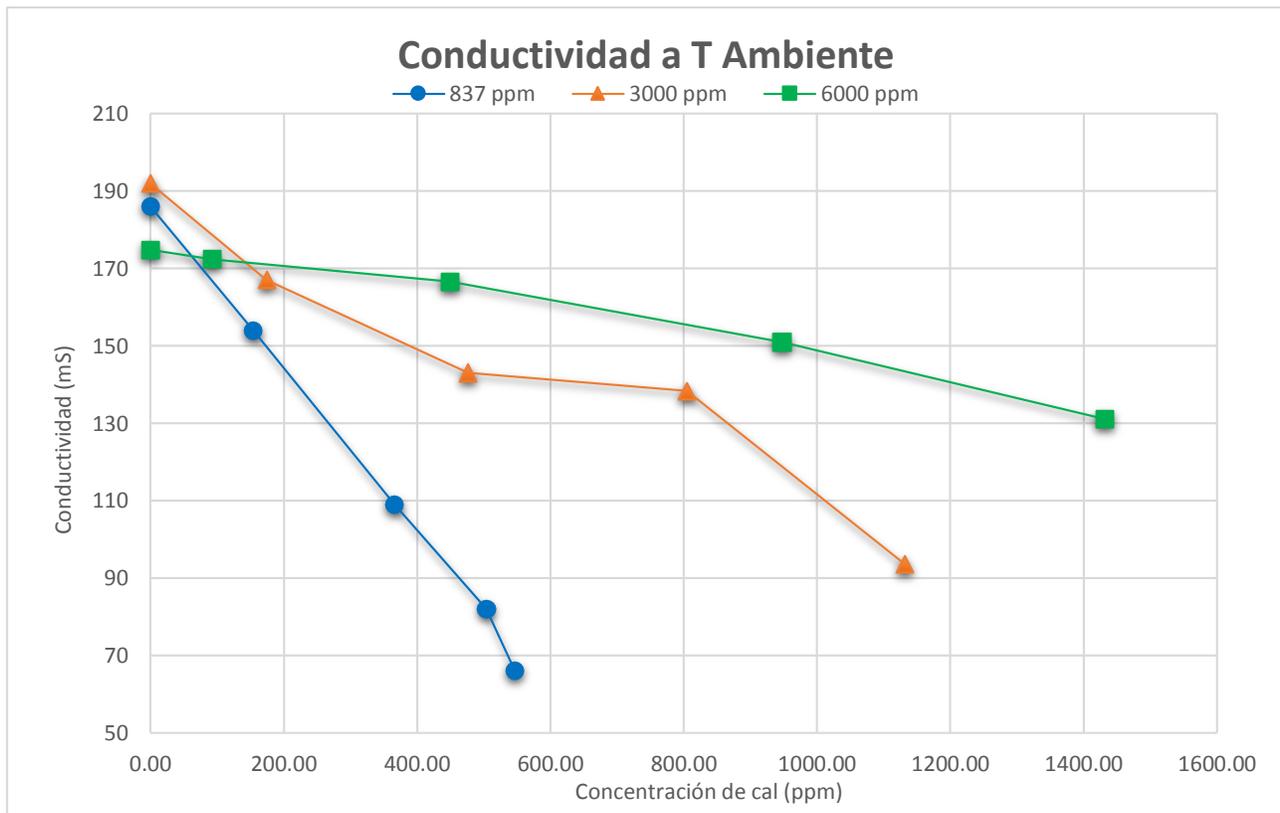


Figura 5.2 Resultados del pH en la prueba de precipitado a temperatura ambiente.



En la **Figura 5.2** se graficó pH contra concentración de cal donde se puede observar que la dosificación de la solución de 837 ppm aumenta el pH con una menor concentración de cal que con las suspensiones, esto se debe a que como la cal se encuentra en solución, aumenta el pH en menor cantidad que si se encontrara en suspensión (sin disociar) ya que existe una mayor concentración de iones  $\text{OH}^-$  que son los responsables del aumento del pH.

En la **Figura 5.3** se muestra el comportamiento de la conductividad en función de la concentración de cal en donde se observa que la conductividad disminuye rápidamente con la solución de 837 ppm pero, para las suspensiones de 3,000 ppm y 6,000 ppm, se observa que la reducción de la conductividad es baja. Esto se debe a que, como la conductividad es un reflejo de los iones en solución, los iones  $\text{OH}^-$  presentes reaccionan con los iones metálicos y precipitan en forma de hidróxidos (reacción 1 y 2) pero, mientras exista  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en suspensión, este se disociará como se muestra en la reacción 3 y siempre existirán estos iones en solución, por ello, la conductividad en las suspensiones de 3,000 ppm y 6,000 ppm no disminuye mucho.



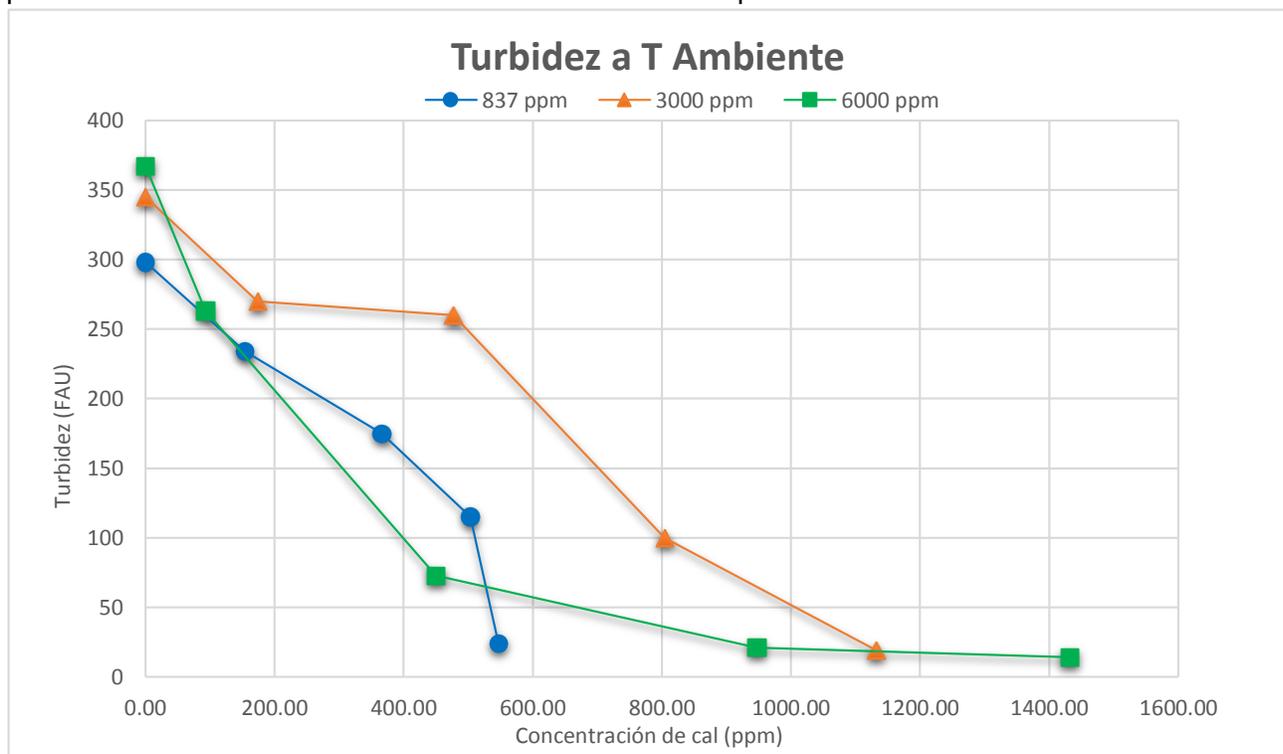
**Figura 5.3** Comportamiento de la conductividad en función de la concentración de la cal.



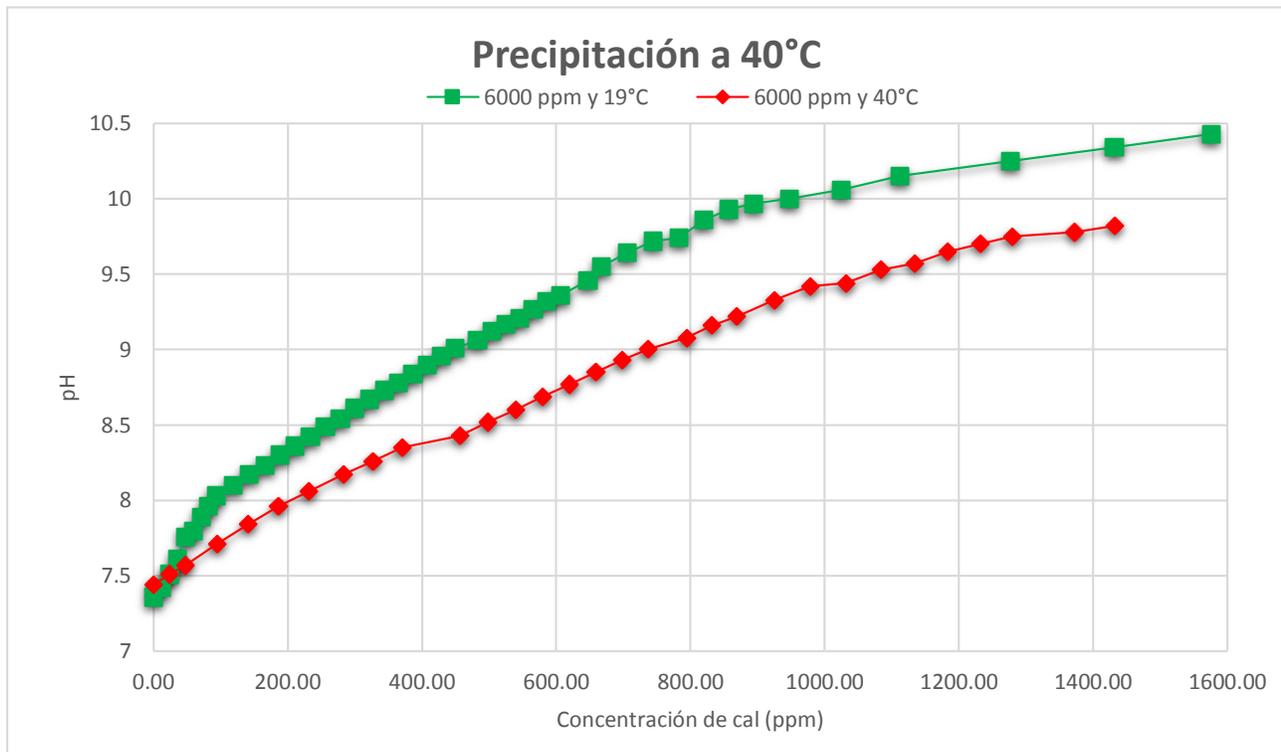
En la **Figura 5.4** se muestra el cambio de la turbidez en función de la concentración de cal, en donde se observa que la turbidez disminuye con mayor eficacia cuando cal se encuentra en solución ya que la suspensión de cal promueve la turbidez de la mezcla. Por otro lado, la suspensión de 6,000 ppm presenta mejores resultados que la de 3,000 ppm ya que la suspensión más concentrada tiende a precipitar más rápido, provocando que el sobrenadante sea un poco más claro.

Como, tanto la turbidez como la conductividad se redujeron entre el 20 % y el 95 % al añadir cal en las tres concentraciones realizadas, se puede deducir que el  $\text{Ca(OH)}_2$  es capaz de reaccionar con los elementos presentes y que los compuestos resultantes precipiten y puedan ser retirados fácilmente.

La prueba de precipitación a 40 °C se hizo de la misma manera que las pruebas anteriores a temperatura ambiente pero, solo utilizando la suspensión a 6,000 ppm ya que mostró mejores resultados en las pruebas de sedimentación que las otras mezclas de cal. La **Figura 5.5** muestra de manera comparativa los resultados de la prueba realizada a temperatura ambiente y a 40 °C, en donde se aprecia que, como el  $\text{Ca(OH)}_2$  tiene menor solubilidad a altas temperaturas, su disociación también será menor, por lo que el pH no aumenta de la misma manera como lo hace a temperatura ambiente.



**Figura 5.4** Comportamiento de la turbidez en función de la concentración de cal.



*Figura 5.5 Comparación entre los resultados de las pruebas de precipitación a temperatura ambiente y a 40 °C.*

En la **Figura 5.6** se compara el comportamiento de la conductividad respecto a la concentración de cal a las dos temperaturas de estudio y donde se observa que a 40 °C, en un principio se presenta una mayor conductividad lo cual sugiere que varios de los sólidos suspendidos presentes en el agua congénita aumenta su solubilidad a mayor temperatura, lo que genera mayor concentraciones de iones en solución y, a su vez, un valor de conductividad mayor. Sin embargo, esto no impide que la eficacia de la cal para precipitar estos iones sea la misma que a temperatura ambiente e incluso mejor.

En la **Figura 5.7** se muestran los resultados del comportamiento de la turbidez en función de la concentración de cal tanto para temperatura ambiente como para 40 °C y se observan resultados similares a los de la **Figura 5.6**, ya que a 40 °C la dosificación de cal puede lograr que la turbidez se reduzca hasta a el mismo valor y con la misma concentración a pesar que no reducen el parámetro a la misma velocidad.

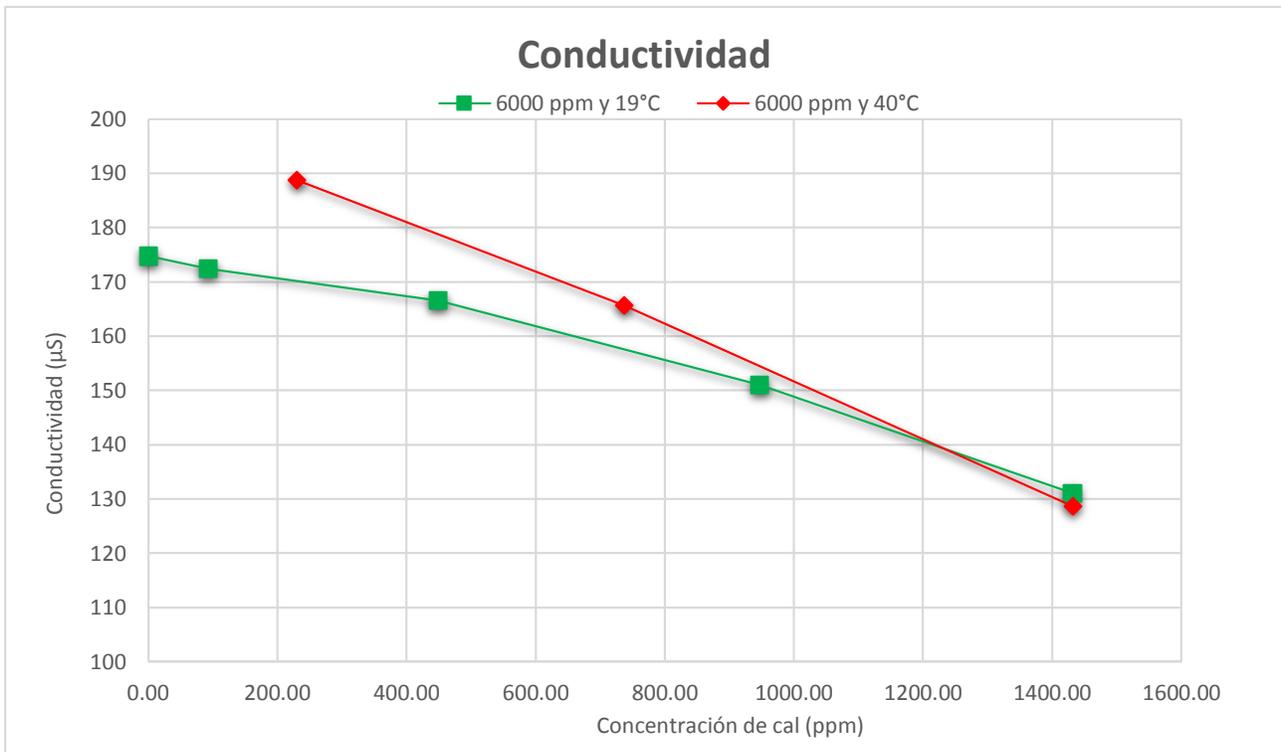


Figura 5.6 Comportamiento de la conductividad en función de la concentración de cal a temperatura ambiente y a 40 °C.

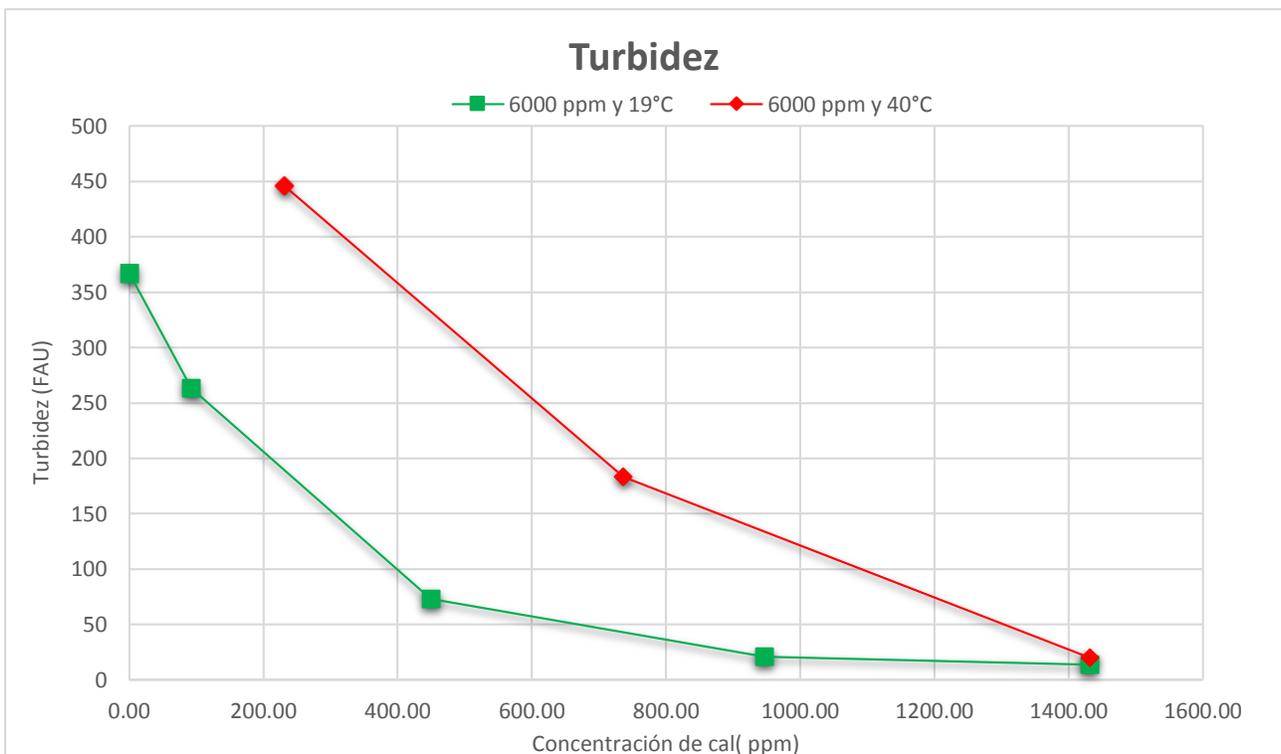


Figura 5.7 Comportamiento de la turbidez en función de la concentración de cal a temperatura ambiente y a 40 °C.



### 5.3 Prueba de sedimentación

En la prueba de sedimentación se verificó que el tipo de partículas presentes en el agua congénita tratada con las suspensiones de cal son partículas tipo 3, así como se muestra en la **Figura 5.8**. En el Anexo B se muestra un seguimiento fotográfico de la prueba de sedimentación donde se puede observar el comportamiento del agua congénita durante la prueba. En la **Tabla 5.2** se muestran los resultados de la prueba de sedimentación donde se indica el tiempo y la altura de la capa límite, dichos datos fueron graficados y se muestran en la **Figura 5.9**. En el Anexo B se muestra un seguimiento fotográfico de la prueba de sedimentación donde se puede observar el comportamiento del agua congénita durante la prueba. En la **Tabla 5.2** se muestran los resultados de la prueba de sedimentación donde se indica el tiempo y la altura de la capa límite, dichos datos fueron graficados y se muestran en la **Figura 5.9**. Al aplicar la metodología de determinación de área de sedimentación, la cual se explica en el Anexo D, se obtiene que el área necesaria para el sedimentador es de  $3\,471\text{ m}^2$  y de los datos de la **Figura 5.9** se observa que se requiere de aproximadamente de un tiempo de 20 min para que la mayoría de los sólidos suspendidos sedimenten.



*Figura 5.8 Prueba de sedimentación al tiempo de 10 min. Se puede observar la zona de clarificación y la de espesamiento.*



Tabla 5.2 Tiempo y altura de la capa límite de la prueba de sedimentación.

t (min)	H (cm)	t (min)	H (cm)
0	28	20	5.6
2	26.3	25	5.0
4	23.2	30	4.7
6	19.4	35	4.5
8	16.3	40	4.3
10	13.2	45	4.1
12	10.2	50	4.0
14	7.9	55	3.9
16	6.8	60	3.7
18	6.2		

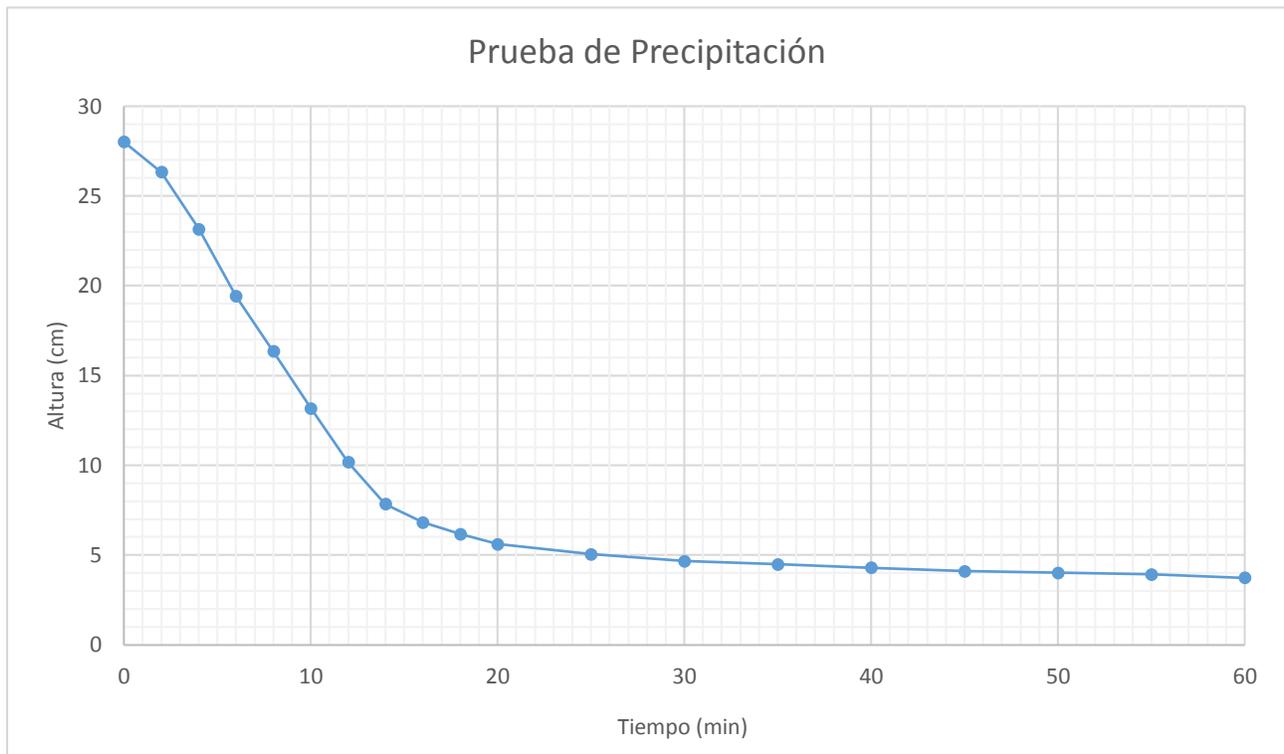


Figura 5.9 Resultados de la prueba de sedimentación.

#### 5.4 Prueba de recirculación de lodos

En la **Tabla 5.3** se muestran los datos de pH, concentración de cal en la mezcla y la masa de lodos recirculadas en cada uno de los cinco ciclos que se realizaron para la prueba de recirculación, la concentración de cal después de agregar los lodos fue obtenida con el valor de pH indicado por el potenciómetro y con la curva a 40 °C de la **Figura 5.5**. La **Tabla 5.4** muestra los datos de tiempo contra altura de la capa límite para cada ciclo de sedimentación y en las **Figuras 5.10-5.14** se graficaron los



datos para cada ciclo. Por último, con la metodología para determinar el área de un sedimentador (ver Anexo D), se expresan las áreas obtenidas para uno de los cinco procesos de sedimentación en la

**Tabla 5.5.***Tabla 5.3 Resultados de la pruebas de precipitación con recirculación de lodos.*

Número de ciclo	pH al agregar lodos	pH al agregar cal	Masa de cal agregada (g)	Masa recirculada (g)
1°	-----	9.7	174	14.8334
2°	8.33	9.72	132	26.3920
3°	8.2	9.71	150	21.8286
4°	8.33	9.75	156	19.3030
5°	8.43	9.71	150	24.4486

*Tabla 5.4 Resultados de la pruebas de sedimentación con recirculación de lodos.*

1°		2°		3°		4°		5°	
t (min)	H (cm)								
0	23.6	0	20.7	0	21.3	0	22.8	0	20.6
1	21.1	1	18.7	1	19.2	1	20.3	1	18.7
2	16.9	2	14.8	2	14.7	2	17.0	2	15.6
3	11.3	3	10.2	3	10.8	3	13.0	3	12.6
4	6.2	4	7.4	4	7.6	4	9.7	4	9.0
5	5.1	5	6.1	5	6.0	5	7.8	6	7.6
6	4.6	6	5.3	6	5.4	6	6.8	8	6.6
8	4.1	8	4.7	8	4.6	8	6.0	10	5.9
10	3.9	10	4.3	10	4.3	10	5.4	15	5.2
20	3.2	15	3.8	15	3.7	15	4.6	20	4.8
30	2.9	20	3.4	20	3.4	20	4.1	30	4.2
60	2.8	30	3.0	30	3.1	30	3.7	60	3.5
		60	2.6	60	2.6	60	3.1		

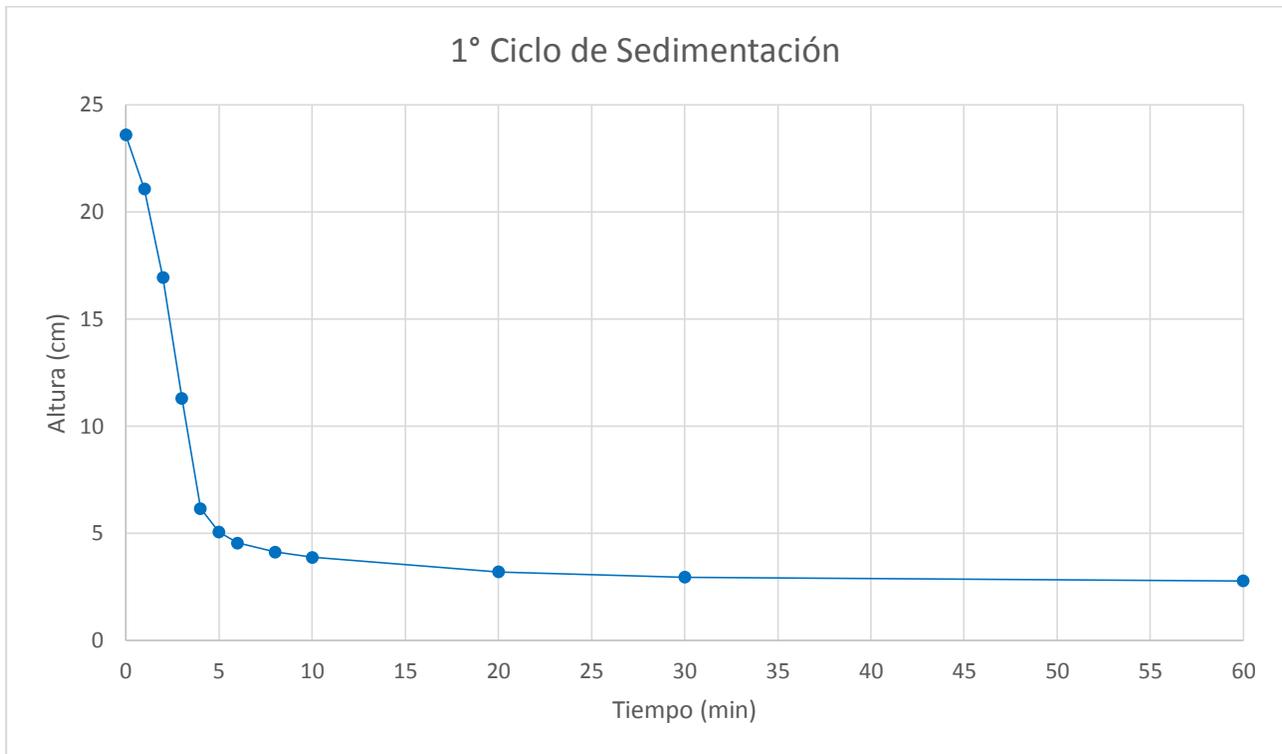


Figura 5.10 Resultados de la prueba de sedimentación para el 1° ciclo.

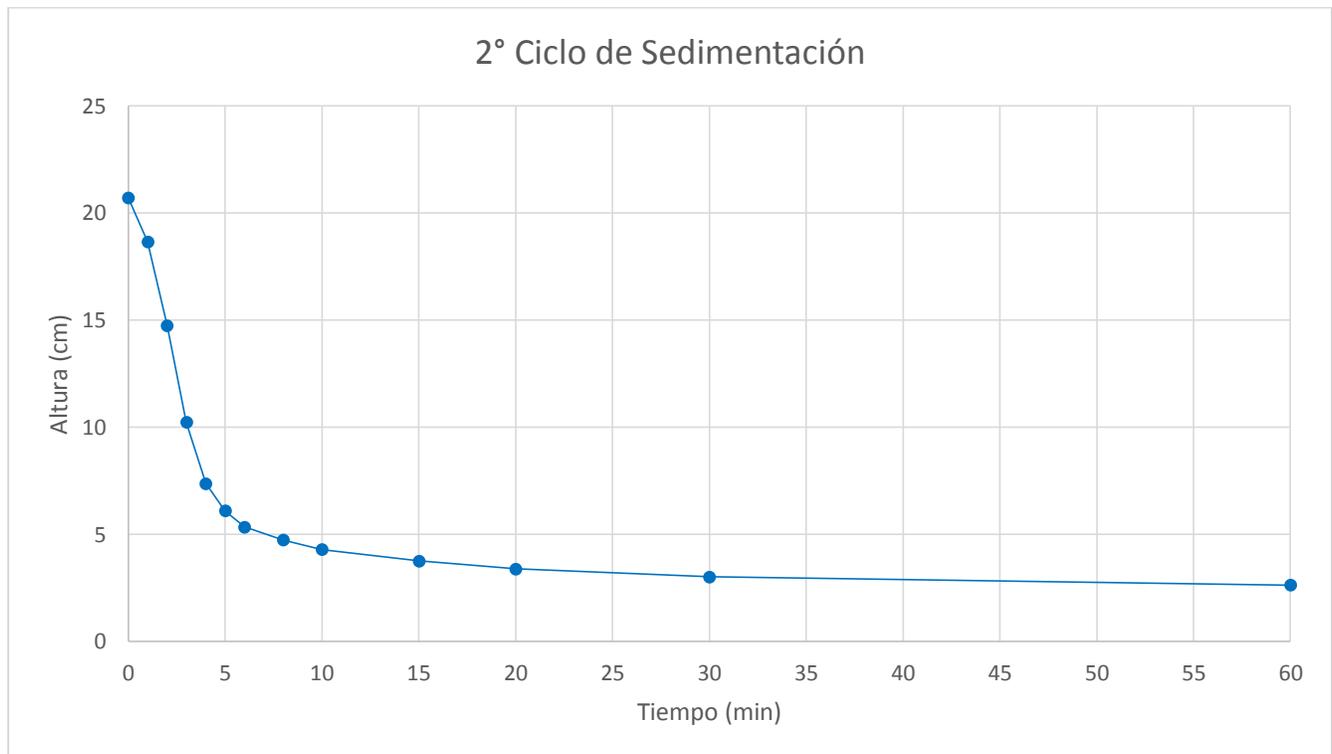


Figura 5.11 Resultados de la prueba de sedimentación para el 2° ciclo.

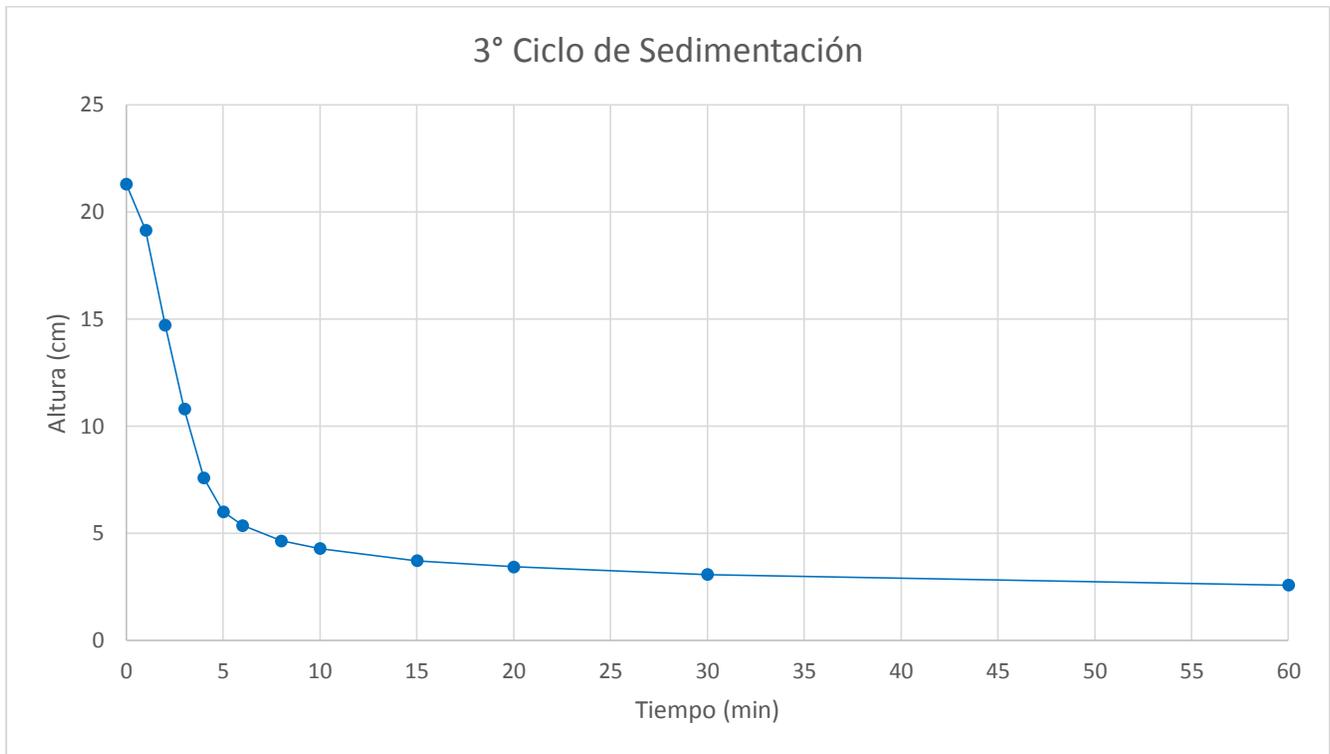


Figura 5.12 Resultados de la prueba de sedimentación para el 3° ciclo.

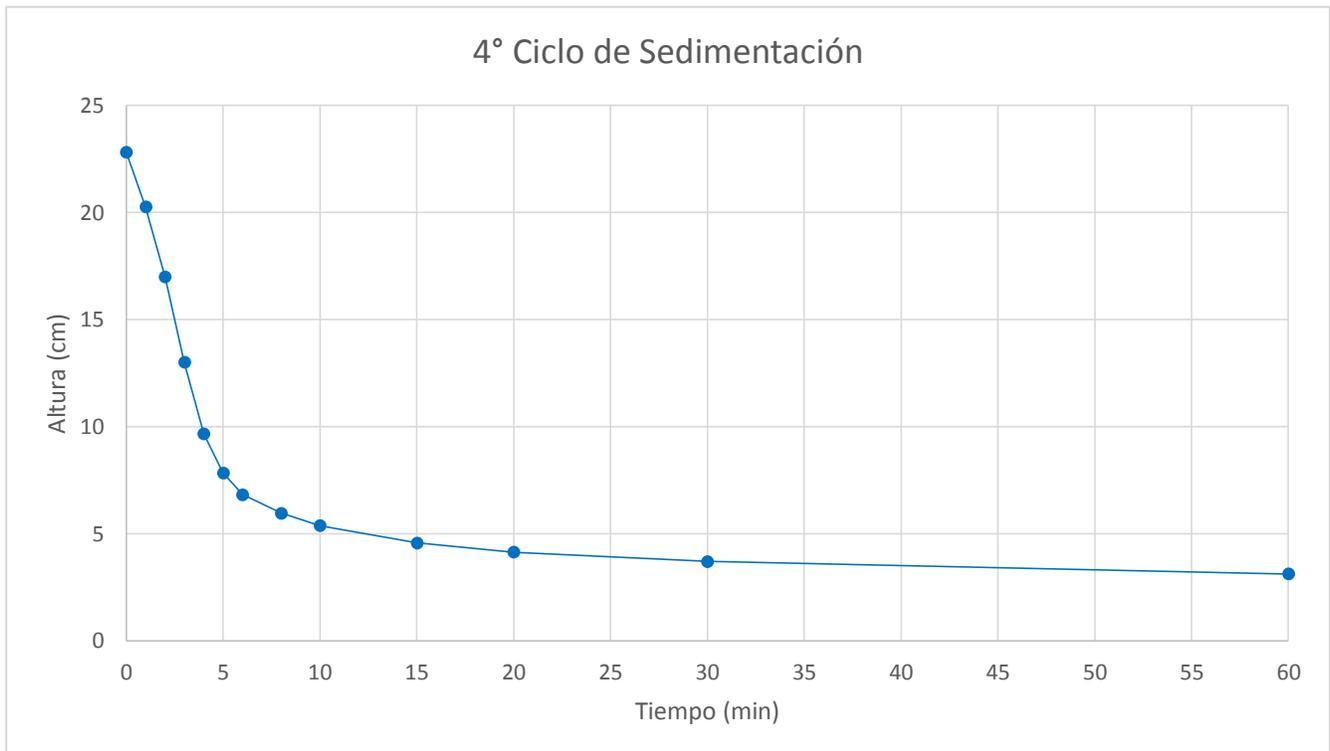
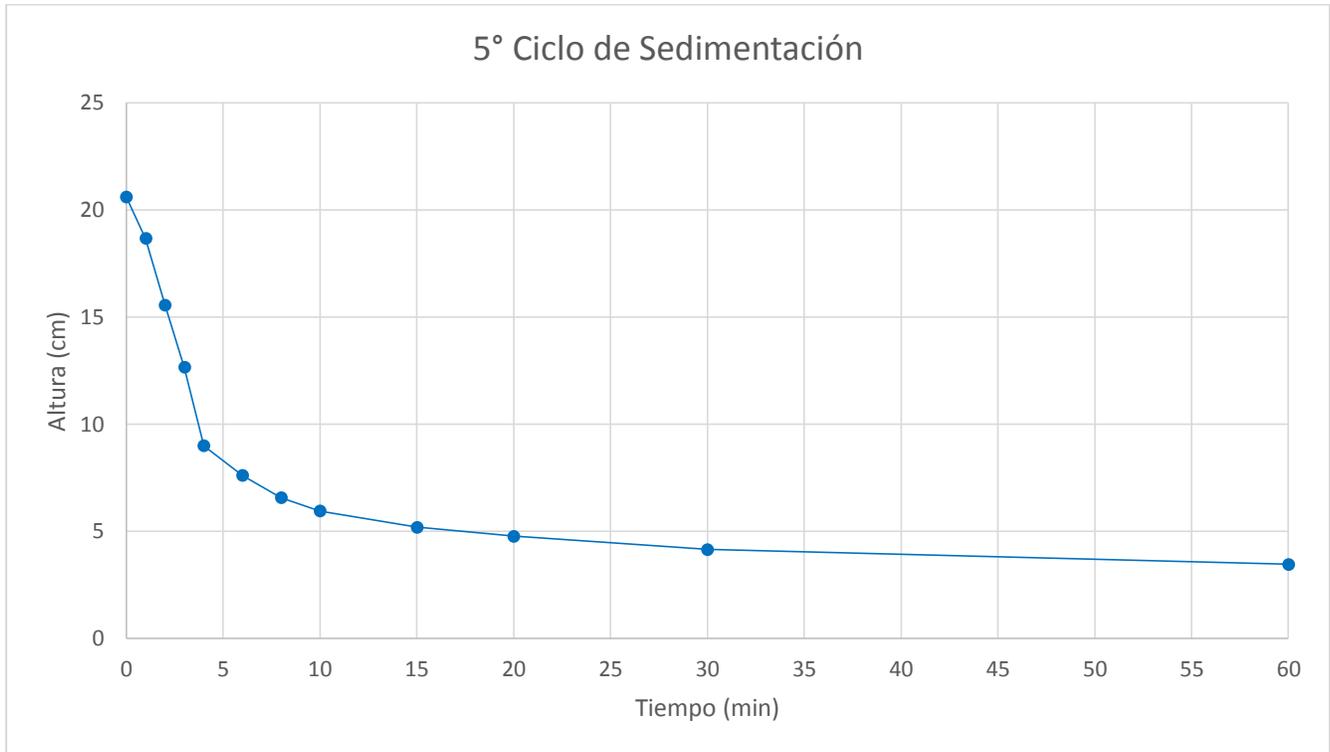


Figura 5.13 Resultados de la prueba de sedimentación para el 4° ciclo.



**Figura 5.14** Resultados de la prueba de sedimentación para el 5° ciclo.

**Tabla 5.5** Resultados de la prueba de recirculación de lodos.

Ciclo	Lodos totales (g/100 ml)	Área del Sedimentador m <sup>2</sup>
1°	14.8334	1,502
2°	26.5920	2,418
3°	21.8286	2,192
4°	19.3030	2,140
5°	24.4468	2,389

Observando toda la información se logra apreciar que al recircular los lodos el pH de las mezclas aumentó hasta 8.2 – 8.44, la concentración de cal dentro de la mezcla aumentó hasta 304 – 423 ppm, lo que se traduce como un ahorro de cal entre el 19 % y 25 %. Comparando el proceso de sedimentación a temperatura ambiente (**Figura 5.9**) y a una temperatura de 40 °C (**Figura 5.10**) se observa que a 40 °C la sedimentación se lleva a cabo más rápido tardando 9 min mientras que a temperatura ambiente se toma 20 min además, el área de sedimentador requerida a 40 °C es de 1,502 m<sup>2</sup> lo cual es más de la mitad de los 3,471 m<sup>2</sup> requeridos para la precipitación a temperatura ambiente. Por otro lado, el área



más grande que se obtuvo de las pruebas de recirculación fue de 2,418 m<sup>2</sup> y tardó solo 12 min, lo que equivalen a un sedimentador 30 % más pequeño y un tiempo 40 % comparado con la sedimentación a temperatura ambiente lo que significa que es preferible realizar este tratamiento a 40 °C



## 6 CONCLUSIONES

La centrifugación del agua congénita a una velocidad de 12,000 rpm durante 5 minutos es capaz de remover hasta el 85 % la turbidez inicial, lo cual se traduce como una remoción del 89 % de la turbidez y por ende, de los sólidos disueltos, sin embargo, a una velocidad de 6,000 rpm y 2 minutos es más que necesario para obtener hasta un 70 % de remoción.

Las mejores condiciones para precipitar los sólidos suspendidos es utilizando la suspensión de 6 g/L de cal llegando a una concentración total en el agua congénita de 1,400 ppm de CaO a una temperatura de 40 °C ya que, a pesar de que solo reduce la conductividad un 32 %, es capaz de reducir la turbidez y sólidos suspendidos hasta un 95 %.

La sedimentación de los lodos que se forman al agregar cal al agua congénita es 55 % más rápido y requiere un área de sedimentación 58 % menor si se realiza a 40 °C que a temperatura ambiente (14 °C-19 °C)

El recircular 2000 g de los lodos por cada m<sup>3</sup> de agua es capaz de generar un ahorro de entre 19 % y 25 % de la cal utilizada para el tratamiento de precipitación de metales y sólidos suspendidos.

Para realizar el tratamiento de agua congénita por medio de precipitación-sedimentación por medio de la cal y la recirculación de lodos producidos, se requiere que un sedimentador con un área de 2,500 m<sup>2</sup> y un tiempo de sedimentación de 12 min.



## 7 BIBLIOGRAFÍA

Alley, B., Beebe, A., Rodgers Jr, J., Castle, J. W. (2011) *Chemical and physical characterization of produced waters from conventional and unconventional fossil fuel resources*. Chemosphere.

Alzahrani, S., Mohammad, A. W., Abdullah, P., Jaafar, O. (2013) *Potential tertiary treatment of produced water using highly hydrophilic nanofiltration and reverse osmosis membranes*. Journal of Environmental Chemical Engineering.

Alzahrani, S., Mohammad, A. W., Hilal, N., Abdullah, P., Jaafar, O. (2013) *Identification of foulants, fouling mechanisms and cleaning efficiency for NF and RO treatment of produced water*. Separation and Purification Technology.

Ayres, Gilbert, H. (1970) *Análisis Químico Cualitativo* 2° Edición. Editorial HARLA-México.

Ayoub, G. M., Merhebi, F. *Characteristics and quantities of sludge produced by coagulating wastewater with seawater bittern, lime and caustic*. Advances in Environmental Research.

Belbase, S., Urynowicz, M. A., Vance, G. F., Dangi, M. B. (2013) *Passive remediation of coalbed natural gas co-produced water using zeolite*. Journal of Environmental Management.

Bethany L. Alley, Willis, B., Rodgers Jr., J., Castle, J. W. (2013) *Water depths and treatment performance of pilot-scale free water surface constructed wetland treatment systems for simulated fresh oilfield produced water*. Ecological Engineering.

Bezerra Rocha, J. H., Soares Gomes, M. M., Suely Fernandes, N., Ribeiro da Silva, D., Martínez-Huitle, C. A. (2011) *Application of electrochemical oxidation as alternative treatment of produced water generated by Brazilian petrochemical industry*. Fuel Processing Technology.

Botello, A. V., Rendón von Osten, J., Gold-Bouchot, G., Agraz-Hernández, C. *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. 2da. Edición. U.A.C., U.N.A.M., I.N.E., SEMARNAT, U.J.A.T, U.I.A., Gobierno del Estado de Veracruz-COEPSA, H. Ayuntamiento de Coatzacoalcos, Veracruz.

Brown, Lemay, Bursten, Murphy. *Química, Ciencia Central* 12° Edición. Editorial Pearson.

Bundtland, C., H. (1987) *Our common future: Brudtland report*. ONU.



Burriel Martí, F., Lucena Conde, F., Arribas Jimeno, S., Hernández Méndez, J. (2008) *Química Analítica Cualitativa*. 3° Edición. Editorial Thomson.

Cabral da Silva. A. J., Vieira dos Santos, E., de Oliveira Morais, C. C., Martínez-Huitle, C. A., Leal Castro. S. S. (2013) *Electrochemical treatment of fresh, brine and saline produced water generated by petrochemical industry using Ti/IrO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and BDD in flow reactor*. Chemical Engineering Journal.

Castillo Escalante, I. (2012) *Problemas de Calidad del Agua en México*. Comisión Nacional del Agua.

Chang, R. *Química* 10° Edición. Editorial McGraw Hill.

Coday, B. D., Xu, P., Beaudry, E. G., Herron, J., Lampi, K., Hancock, N. T., Cath, T. Y. (2013) *The sweet spot of forward osmosis: Treatment of produced water, drilling wastewater, and other complex and difficult liquid streams*. Desalination.

Cruz Hernández, J., Islas Juárez, R., Márquez Ramírez, E., Medina González, A. (2005) *INFLUENCIA DEL AGUA DE INYECCION DURANTE UN PROCESO DE RECUPERACION SECUNDARIA EN YACIMIENTOS ARENO-ARCILLOSOS*. Colegio de Ingenieros del Petroleo.

Dahm, K., Mayer, X., Deboux, J., Taffler, D., (2010) *USER MANUAL Produced Water Treatment and Beneficial Use Screening Tool*. Research Partnership to Secure Energy for America.

División de Información y Relaciones Externas del UNFPA (2011) *UNFPA estado de la población mundial 2011. 7 mil millones de personas. Su mundo, sus probabilidades*. Fondo de Población de las Naciones Unidas.

Ebrahimia, M., Shams Ashaghia, K., Engela, L., Willershausena, D., Mundb, P., Bolduanb, P., Czermak, P. (2009) *Characterization and application of different ceramic membranes for the oil-field produced water treatment*. Desalination.

Fernández Durán. R. (2008) *EL CREPÚSCULO DE LA ERA TRÁGICA DEL PETRÓLEO Pico del oro negro y colapso financiero (y ecológico) mundial*. 1ra. Edición, Virus Editorial.

Forrest, F. C. J. (1982) *Aspectos de Ingeniería de la Inyección de Agua*. 1ra. Edición. Society of Petroleum Engineers of AIME

Foust, A. S., Wenzel L. A., Maus, L., Andersen L. B. *Principios de Operaciones Unitarias* Editorial CECSA.



Geankoplis, C. *Procesos de Transporte y Principios de procesos de Separación* 4° Edición. Editorial CECSA.

González Reyes, F. (2011) *INGENIERÍA DE PROCESO APLICADA A LA CENTRAL DE ALMACENAMIENTO Y BOMBEO TAJÍN*. Universidad Veracruzana.

Hayes. T., Arthur, D., (2004) *OVERVIEW OF EMERGING PRODUCED WATER TREATMENT TECHNOLOGIES*. 11<sup>th</sup> Annual International Petroleum Environmental Conference, Albuquerque, New Mexico.

Hill, J. W., Petricci, R. H., (1999) *General Chemistry* 2° Edición. Editorial Prentice Hall

Hladik, M. L., Focazio, M. J., Mark Engle, M. (2013) *Discharges of produced waters from oil and gas extraction via wastewater treatment plants are sources of disinfection by-products to receiving streams*. Science of the Total Environment.

Jiménez Cruz, F. (2002) *IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN LAS*

*ACTIVIDADES PETROLERAS EN MÉXICO*. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México.

Kemmer F. N., McCallion, J. (1999) *MANUAL DEL AGUA Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. Editorial McGraw Hill.

Lü, Z. F., Zhan F. T., Wang Z. X., Zhang S. D. (2008) *Separation and composition characterization of acidic components in water produced by polymer flooding in Gudao Oilfield*. Journal of Fuel Chemistry and Technology.

Martínez Herrera, G. (2012) *Ingeniería Ambiental para Ingenieros*. U.M.S.N.H.

Martínez Melo, L. (2000) *Petróleo crudo en México y su comercialización* U.N.A.M.

Martínez Quiroz. J. J. (2009) *DESHIDRATACIÓN DE CRUDO PESADO EN LA TERMINAL MARÍTIMA DOS BOCAS*. U.N.A.M.

McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriot P. (2007) *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* 7° Edición. Editorial McGraw Hill Serie: Ingeniería Química.

Mijaylova Nacheva, P., Birkle, P., Ramírez Camperos, E., Sandoval Yoal, . (2005) *TRATAMIENTO DE AGUAS DE LA DESALACIÓN DEL PETRÓLEO PARA SU APROVECHAMIENTO EN INYECCIÓN AL SUBSUELO*. Anuario IMTA.



Morales-Bautista, C., Domínguez-Rodríguez, V., Adams, R. H. (2011) *ESTUDIO CINÉTICO DEL INTERCAMBIO CATIONICO CON  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  Y EVALUACIÓN DE LA FERTILIDAD EN UN SUELO ARCILLOSO CONTAMINADO CON AGUAS CONGÉNITAS*. Bioagro.

Muñoz Cruz, A. (2008) *CARACTERIZACIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. U.A.E.H.

Navarro Sierra, J. R. (2008) *Tratamiento de aguas congénitas de extracción de pozos mediante ferrato de potasio. Planta de dos Bocas, Tabasco*. U.N.A.M.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Norma Oficial Mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003. Establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos.

Ottero, M. A., Pividal, A. J., Fraile, M. J., Centeno, J. D., Senderos, A. (2009) *Geología* 3° Edición. Editorial Laberinto.

Ottaviano, J. G., Cai, J., Murphy, R. S. (2014) *Assessing the Ddecontamination Efficiency of a Three-Component Flocculating System in the Treatment of Oilfield-Produced Water*. Water Research.

Orem, W., Tatu, C., Varonka, M., Lerch, H., Bates, A., Engle, M., Crosby, L., McIntosh, J. (2014) *Organic substances in produced and formation water from unconventional natural gas extraction in coal and shale*. Coal Geology.

Pardue, M. J., Castle, J. W., Rodgers Jr, J. H., Huddleston III, G. M. (2013) *Treatment of oil and grease in produced water by a pilot-scale constructed wetland system using biogeochemical processes*. Chemosphere.

Paris Ferrer, M. (2001) *Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos*. 2° Edición.

PEMEX (2012) *INFORME DE RESPONSABILIDAD SOCIAL*. Talleres Gráficos de México.

Petrucci, Herring, Madura, Bissonnette. *Química General* 10° Edición. Editorial Pearson.



Plumlee, M. H., Debroux, J. F., Taffler, D., Mayer, X., Dahm, K. G., Hancock, N. T., Guerra, K. L., Xu, P., Drewes, J. E., Cath, T. Y. (2013) *Coalbed methane produced water screening tool for treatment technology and beneficial use*. Journal of Unconventional Oil and Gas Resources.

PNUMA (2007) *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial*. GEO4 medio ambiente para el desarrollo. Dinamarca.

Qabazard, H. M., Al-Zayer, F. A., Irawan, P., Janan, R., Windholz, H., Christodoulides, P., Moudassir, M., Stöger, K., Kalirai, H., Kriz, S., Sattar, M., Khonsari, S. (2011) *Annual Statistical Bulletin 2010/2011*. Organization of the Petroleum Exporting Countries.

Ramalho, R. S. (1996) *Tratamiento de Aguas Residuales*. 2da. Edición. Editorial Reverté.

Reynolds, R. R., Kiker, R. D. (2003) *Produced Water and Associated Issues*. Petroleum Technology Transfer Council.

SEMARNAT (2008) *Informe de la situación del medio ambiente en México*.

SEMARNAT (2011) *¿Y el medio ambiente? Problemas en México y en el mundo*.

SEMARNAT (2012) *Estadísticas del agua en México*.

Sharghi, E. A., Bonakdarpour, B. (2013) *The study of organic removal efficiency and halophilic bacterial mixed liquor characteristics in a membrane bioreactor treating hypersaline produced water at varying organic loading rates*. Bioresource Technology.

Skalak, K. J., Engle, M. A., Rowan, E. L., Jolly, G. D., Conko, K. M., Benthem, A. J., Kraemer, T. F. (2013) *Surface disposal of produced waters in western and southwestern Pennsylvania: Potential for accumulation of alkali-earth elements in sediments*. International Journal of Coal Geology.

Skoog, D. D., Wast, D. M., Holler, F. J., Crouch, S. R., (2005) *Fundamentos de Química Analítica* 8ª Edición. Editorial Thomson

Soares Freire, A., Erthal Santelli, R. (2012) *Trace elements determination in high salinity petroleum produced formation water by high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry after matrix separation using Chelex-100® resin*. Spectrochimica Acta Part B.

Sorrell, S., Speirs, J., Bentley, R., Brandt, A., Miller, R. (2010) *Global oil depletion: A review of the evidence*. Energy Policy.



U.S. Department of Energy, National Petroleum Technology Office. (2006) *A Guide to Practical Management of Produced Water from Onshore Oil and Gas Operations in the United States*. DE-PS26-04NT15460-02

U.S. Energy Information Administration. (2013) *Total Energy*.

Valderrama, C., Granados, R., Cortina, J. L. (2013) *Stabilisation of dewatered domestic sewage sludge by lime addition as raw material for the cement industry: Understanding process and reactor performance*. Chemical Engineering Journal.

Wandera, D., Wickramasinghe, S. R., Husson, S. M., (2011) *Modification and characterization of ultrafiltration membranes for treatment of produced water*. Journal of Membrane Science.

Wang, X., Goual, L., Colberg, P. J. S. (2012) *Characterization and treatment of dissolved organic matter from oilfield produced waters*. Journal of Hazardous Materials.

Yunker, J. M., Walsh, M. E. (2013) *Bench-scale investigation of an integrated adsorption-coagulation-dissolved air flotation process for produced water treatment*. Journal of Environmental Chemical Engineering

Zaror Zaror. C. A. (2000) *INTRODUCCION A LA INGENIERIA AMBIENTAL PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS*. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.



## ANEXO A

### Marco Legal

#### **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996, QUE ESTABLECE LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.**

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos. -Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

JULIA CARABIAS LILLO, Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 32 Bis fracciones I, IV y V de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 85, 86 fracciones I, III y VII, 92 fracciones II y IV y 119 de la Ley de Aguas Nacionales; 5o. fracciones VIII y XV, 8o. fracciones II y VII, 36, 37, 117, 118 fracción II, 119 fracción I inciso a), 123, 171 y 173 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 38 fracción II, 40 fracción X, 41, 45, 46 fracción II y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, he tenido a bien expedir la siguiente Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales;

#### **CONSIDERANDO**

Que en cumplimiento a lo dispuesto en la fracción I del artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, el Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, se publicó en el **Diario Oficial de la Federación** el 24 de junio de 1996, a fin de que los interesados en un plazo de 90 días naturales presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, sito en avenida Revolución 1425, mezanina planta alta, colonia Tlacopac, código postal 01040, de esta ciudad.

Que durante el plazo a que se refiere el considerando anterior y de conformidad con lo dispuesto en el artículo 45 del ordenamiento legal citado, estuvieron a disposición del público los documentos a que se refiere dicho precepto.

Que de acuerdo con lo que disponen las fracciones II y III del artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los comentarios presentados por los interesados fueron analizados en el seno del citado Comité, realizándose las modificaciones procedentes a dicha Norma; las respuestas a los comentarios de referencia fueron publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 24 de diciembre de 1996.

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de Normas Oficiales Mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, en sesión de fecha 30 de octubre de 1996, aprobó la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, por lo que he tenido a bien expedir la siguiente:

#### **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996, QUE ESTABLECE LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.**

##### **1. Objetivo y campo de aplicación**

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales.

##### **2. Referencias**

Norma Mexicana NMX-AA-003 Aguas residuales - Muestreo, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 25 de marzo de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-004 Aguas - Determinación de sólidos sedimentables en aguas residuales - Método del cono Imhoff, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 13 de septiembre de 1977.

Norma Mexicana NMX-AA-005 Aguas - Determinación de grasas y aceites - Método de extracción soxhlet, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 8 de agosto de 1980.



Norma Mexicana NMX-AA-006 Aguas - Determinación de materia flotante – Método visual con malla específica, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 5 de diciembre de 1973.

Norma Mexicana NMX-AA-007 Aguas - Determinación de la temperatura - Método visual con termómetro, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 23 de julio de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-008 Aguas - Determinación de pH - Método potenciométrico, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 25 de marzo de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-026 Aguas - Determinación de nitrógeno total – Método Kjeldahl, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 27 de octubre de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-028 Aguas - Determinación de demanda bioquímica de oxígeno - Método de incubación por diluciones, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 6 de julio de 1981.

Norma Mexicana NMX-AA-029 Aguas - Determinación de fósforo total – Métodos espectrofotométricos, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 21 de octubre de 1981.

Norma Mexicana NMX-AA-034 Aguas - Determinación de sólidos en agua – Método gravimétrico, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 3 de julio de 1981.

Norma Mexicana NMX-AA-042 Aguas - Determinación del número más probable de coliformes totales y fecales - Método de tubos múltiples de fermentación, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 22 de junio de 1987.

Norma Mexicana NMX-AA-046 Aguas - Determinación de arsénico en agua – Método espectrofotométrico, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 21 de abril de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-051 Aguas - Determinación de metales – Método espectrofotométrico de absorción atómica, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 22 de febrero de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-057 Aguas - Determinación de plomo - Método de la ditizona, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 29 de septiembre de 1981.

Norma Mexicana NMX-AA-058 Aguas - Determinación de cianuros – Método colorimétrico y titulométrico, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de diciembre de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-060 Aguas - Determinación de cadmio - Método de la ditizona, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 26 de abril de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-064 Aguas - Determinación de mercurio - Método de la ditizona, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 3 de marzo de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-066 Aguas - Determinación de cobre - Método de la neocuproína, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 16 de noviembre de 1981.

Norma Mexicana NMX-AA-078 Aguas - Determinación de zinc - Métodos colorimétricos de la ditizona I, la ditizona II y espectrofotometría de absorción atómica, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 12 de julio de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-079 Aguas Residuales - Determinación de nitrógeno de nitratos (Brucina), publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de abril de 1986.

Norma Mexicana NMX-AA-099 Determinación de nitrógeno de nitritos - Agua potable, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 11 de febrero de 1987.

### 3. Definiciones

#### 3.1 Aguas costeras

Son las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fija el derecho internacional; así como las aguas marinas interiores, las lagunas y esteros que se comuniquen permanente o intermitentemente con el mar.



### 3.2 Aguas nacionales

Las aguas propiedad de la Nación, en los términos del párrafo quinto del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

### 3.3 Aguas residuales

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

### 3.4 Aguas pluviales

Aquellas que provienen de lluvias, se incluyen las que provienen de nieve y granizo.

### 3.5 Bienes nacionales

Son los bienes cuya administración está a cargo de la Comisión Nacional del Agua en términos del artículo 113 de la Ley de Aguas Nacionales.

### 3.6 Carga contaminante

Cantidad de un contaminante expresado en unidades de masa por unidad de tiempo, aportada en una descarga de aguas residuales.

### 3.7 Condiciones particulares de descarga

El conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos y de sus niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual, determinados por la Comisión Nacional del Agua para el responsable o grupo de responsables de la descarga o para un cuerpo receptor específico, con el fin de preservar y controlar la calidad de las aguas conforme a la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento.

### 3.8 Contaminantes básicos

Son aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno<sub>5</sub>, nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl de nitritos y de nitratos, expresadas como mg/litro de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH.

### 3.9 Contaminantes patógenos y parasitarios

Son aquellos microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los coliformes fecales y los huevos de helminto.

### 3.10 Cuerpo receptor

Son las corrientes, depósitos naturales de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas cuando puedan contaminar el suelo o los acuíferos.

### 3.11 Descarga

Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando éste es un bien del dominio público de la Nación.



### 3.12 Embalse artificial

Vaso de formación artificial que se origina por la construcción de un bordo o cortina y que es alimentado por uno o varios ríos o agua subterránea o pluvial.

### 3.13 Embalse natural

Vaso de formación natural que es alimentado por uno o varios ríos o agua subterránea o pluvial.

### 3.14 Estuario

Es el tramo del curso de agua bajo la influencia de las mareas que se extiende desde la línea de costa hasta el punto donde la concentración de cloruros en el agua es de 250 mg/L.

### 3.15 Humedales naturales

Las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénegas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos, originadas por la descarga natural de acuíferos.

### 3.16 Límite máximo permisible

Valor o rango asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales.

### 3.17 Metales pesados y cianuros

Son aquellos que, en concentraciones por encima de determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc y cianuros.

### 3.18 Muestra compuesta

La que resulta de mezclar el número de muestras simples, según lo indicado en la Tabla A.1. Para conformar la muestra compuesta, el volumen de cada una de las muestras simples deberá ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma.

**TABLA A.1**

<b>FRECUENCIA DE MUESTREO</b>			
<b>HORAS POR DÍA QUE OPERA EL PROCESO GENERADOR DE LA DESCARGA</b>	<b>NÚMERO DE MUESTRAS SIMPLES</b>	<b>INVÉRVALO ENTRE TOMA DE MUESTRAS SIMPLES (HORAS)</b>	
		<b>MÍNIMO</b>	<b>MÁXIMO</b>
Menor que 4	Mínimo 2	N.E.	N.E.
De 4 a 8	4	1	2
Mayor que 8 y hasta 12	4	2	3
Mayor que 12 y hasta 18	6	2	3
Mayor que 18 y hasta 24	6	3	4

N.E. = No especificado



### 3.19 Muestra simple

La que se tome en el punto de descarga, de manera continua, en día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio y en el momento del muestreo.

El volumen de cada muestra simple necesario para formar la muestra compuesta se determina mediante la siguiente ecuación:

$$VMSi = VMC \times (Qi / Qt)$$

Donde:

VMSi = volumen de cada una de las muestras simples "i", litros.

VMC = volumen de la muestra compuesta necesario para realizar la totalidad de los análisis de laboratorio requeridos, litros.

Qi = caudal medido en la descarga en el momento de tomar la muestra simple, litros por segundo.

Qt = S Qi hasta Qn, litros por segundo.

### 3.20 Parámetro

Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad física, química y biológica del agua.

#### 3.21 Promedio diario (P.D.)

Es el valor que resulta del análisis de una muestra compuesta. En el caso del parámetro grasas y aceites, es el promedio ponderado en función del caudal, y la media geométrica para los coliformes fecales, de los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples tomadas para formar la muestra compuesta. Las unidades de pH no deberán estar fuera del rango permisible, en ninguna de las muestras simples.

#### 3.22 Promedio mensual (P.M.)

Es el valor que resulte de calcular el promedio ponderado en función del caudal, de los valores que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas (Promedio diario).

### 3.23 Riego no restringido

La utilización del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas en forma ilimitada como forrajes, granos, frutas, legumbres y verduras.

### 3.24 Riego restringido

La utilización del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas, excepto legumbres y verduras que se consumen crudas.

### 3.25 Río

Corriente de agua natural, perenne o intermitente, que desemboca a otras corrientes, o a un embalse natural o artificial, o al mar.

### 3.26 Suelo

Cuerpo receptor de descargas de aguas residuales que se utiliza para actividades agrícolas.



### 3.27 Tratamiento convencional

Son los procesos de tratamiento mediante los cuales se remueven o estabilizan los contaminantes básicos presentes en las aguas residuales.

### 3.28 Uso en riego agrícola

La utilización del agua destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas y su preparación para la primera enajenación, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial.

### 3.29 Uso público urbano

La utilización de agua nacional para centros de población o asentamientos humanos, destinada para el uso y consumo humano, previa potabilización.

## 4. Especificaciones

**4.1** La concentración de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo permisible en las Tablas A.2 y A.3 de esta Norma Oficial Mexicana. El rango permisible del potencial hidrógeno (pH) es de 5 a 10 unidades.

**4.2** Para determinar la contaminación por patógenos se tomará como indicador a los coliformes fecales. El límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola) es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente.

**4.3** Para determinar la contaminación por parásitos se tomará como indicador los huevos de helminto. El límite máximo permisible para las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego no restringido, y de cinco huevos por litro para riego restringido.

**4.4.** Al responsable de la descarga de aguas residuales que antes de la entrada en vigor de esta Norma Oficial Mexicana se le hayan fijado condiciones particulares de descarga, podrá optar por cumplir los límites máximos permisibles establecidos en esta Norma, previo aviso a la Comisión Nacional del Agua.

**4.5.** Los responsables de las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales deben cumplir con la presente Norma Oficial Mexicana de acuerdo con lo siguiente:

a) Las descargas municipales tendrán como plazo límite las fechas de cumplimiento establecidas en la Tabla A.4. El cumplimiento es gradual y progresivo, conforme a los rangos de población. El número de habitantes corresponde al determinado en el XI Censo Nacional de Población y Vivienda, correspondiente a 1990, publicado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

b) Las descargas no municipales tendrán como plazo límite hasta las fechas de cumplimiento establecidas en la Tabla A.5. El cumplimiento es gradual y progresivo, dependiendo de la mayor carga contaminante, expresada como demanda bioquímica de oxígeno<sub>5</sub> (DBO<sub>5</sub>) o sólidos suspendidos totales (SST), según las cargas del agua residual, manifestadas en la solicitud de permiso de descarga, presentada a la Comisión Nacional del Agua.

**4.6** Las fechas de cumplimiento establecidas en las Tablas A.4 y A.5 de esta Norma Oficial Mexicana podrán ser adelantadas por la Comisión Nacional del Agua para un cuerpo receptor en específico, siempre y cuando exista el estudio correspondiente que valide tal modificación.

**4.7** Los responsables de las descargas de aguas residuales municipales y no municipales, cuya concentración de contaminantes en cualquiera de los parámetros básicos, metales pesados y cianuros, que rebasen los límites máximos permisibles señalados en las Tablas A.2 y A.3 de esta Norma Oficial Mexicana, multiplicados por cinco, para cuerpos receptores tipo B (ríos, uso público urbano), quedan obligados a presentar un programa de las acciones u obras a realizar para el control de la calidad del agua de sus descargas a la Comisión Nacional del Agua, en un plazo no mayor de 180 días naturales, a partir de la publicación de esta Norma en el **Diario Oficial de la Federación**.



**TABLA A.2**

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																				
PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO		HUMEDALES NATURALES (B)	
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante (3)	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub>	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

(1) Instantáneo (2) Muestra Simple Promedio Pondera (3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006. P.D.= Promedio Diario; P.M. = Promedio Mensual; N.A. = No es aplicable. (A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

**TABLA A.3**

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS																				
PARÁMETROS (*)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO		HUMEDALES NATURALES (B)	
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuros	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(\*) Medidos de manera total. P.D. = Promedio Diario P.M. = Promedio Mensual N.A. = No es aplicable (A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.



TABLA A.4

DESCARGAS MUNICIPALES	
FECHA DE CUMPLIMIENTO A PARTIR DE	RANGO DE POBLACIÓN
1 de enero de 2000	Mayor de 50,000 habitantes
1 de enero de 2005	De 20,001 a 50,000 habitantes
1 de enero de 2010	De 2,501 a 20,000 habitantes

TABLA A.5

DESCARGAS NO MUNICIPALES		
FECHA DE CUMPLIMIENTO A PARTIR DE:	CARGA CONTAMINANTE	
	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO <sub>5</sub> t/d (toneladas/día)	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES t/d (toneladas/día)
1 de enero de 2000	Mayor de 3.0	mayor de 3.0
1 de enero de 2005	de 1.2 a 3.0	de 1.2 a 3.0
1 de enero de 2010	menor de 1.2	menor de 1.2

TABLA A.6

DESCARGAS MUNICIPALES	
RANGO DE POBLACION	FECHA LÍMITE PARA PRESENTAR PROGRAMA DE ACCIONES
Mayor de 50,000 habitantes	30 de junio de 1997
De 20,001 a 50,000 habitantes	31 de diciembre de 1998
De 2,501 a 20,000 habitantes	31 de diciembre de 1999

TABLA A.7

CARGA CONTAMINANTE DE LAS DESCARGAS NO MUNICIPALES	
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO <sub>5</sub> Y/O SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (toneladas/día)	FECHA LIMITE PARA PRESENTAR PROGRAMA DE ACCIONES
Mayor de 3.0	30 de junio de 1997
De 1.2 a 3.0	31 de diciembre de 1998
Menor de 1.2	31 de diciembre de 1999



Los demás responsables de las descargas de aguas residuales municipales y no municipales, que rebasen los límites máximos permisibles de esta norma, quedan obligados a presentar un programa de las acciones u obras a realizar para el control de la calidad de sus descargas a la Comisión Nacional del Agua, en los plazos establecidos en las Tablas A.6 y A.7.

Lo anterior, sin perjuicio del pago de derechos a que se refiere la Ley Federal de Derechos y a las multas y sanciones que establecen las leyes y reglamentos en la materia.

**4.8** El responsable de la descarga queda obligado a realizar el monitoreo de las descargas de aguas residuales para determinar el promedio diario y mensual. La periodicidad de análisis y reportes se indican en la Tabla A.8 para descargas de tipo municipal y en la Tabla A.9 para descargas no municipales. En situaciones que justifiquen un mayor control, como protección de fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano, emergencias hidroecológicas o procesos productivos fuera de control, la Comisión Nacional del Agua podrá modificar la periodicidad de análisis y reportes. Los registros del monitoreo deberán mantenerse para su consulta por un periodo de tres años posteriores a su realización.

**4.9** El responsable de la descarga estará exento de realizar el análisis de alguno o varios de los parámetros que se señalan en la presente Norma Oficial Mexicana, cuando demuestre que, por las características del proceso productivo o el uso que le dé al agua, no genera o concentra los contaminantes a exentar, manifestándolo ante la Comisión Nacional del Agua, por escrito y bajo protesta de decir verdad. La autoridad podrá verificar la veracidad de lo manifestado por el usuario. En caso de falsedad, el responsable quedará sujeto a lo dispuesto en los ordenamientos legales aplicables.

**4.10** En el caso de que el agua de abastecimiento registre alguna concentración promedio mensual de los parámetros referidos en los puntos 4.1, 4.2 y 4.3 de la presente Norma Oficial Mexicana, la suma de esta concentración al límite máximo permisible promedio mensual, es el valor que el responsable de la descarga está obligado a cumplir, siempre y cuando lo notifique por escrito a la Comisión Nacional del Agua, para que ésta dictamine lo procedente.

**TABLA A.8**

RANGO DE POBLACION	FRECUENCIA DE MUESTREO Y ANALISIS	FRECUENCIA DE REPORTE
mayor de 50,000 habitantes	MENSUAL	TRIMESTRAL
De 20,001 a 50,000 habitantes	TRIMESTRAL	SEMESTRAL
De 2,501 a 20,000 habitantes	SEMESTRAL	ANUAL

**TABLA A.9**

DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO5 (toneladas/día)	DE t/d	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (toneladas/día)	t/d	FRECUENCIA MUESTREO	DE	FRECUENCIA REPORTE	DE
mayor de 3.0		mayor de 3.0		MENSUAL		TRIMESTRAL	
de 1.2 a 3.0		de 1.2 a 3.0		TRIMESTRAL		SEMESTRAL	
menor de 1.2		menor de 1.2		SEMESTRAL		ANUAL	

**4.11** Cuando se presenten aguas pluviales en los sistemas de drenaje y alcantarillado combinado, el responsable de la descarga tiene la obligación de operar su planta de tratamiento y cumplir con los límites máximos permisibles de esta Norma Oficial Mexicana, o en su caso con sus condiciones particulares de descarga, y podrá a través de una obra de desvío derivar el caudal excedente. El responsable de la descarga tiene la obligación de reportar a la Comisión Nacional del Agua el caudal derivado.

**4.12** El responsable de la descarga de aguas residuales que, como consecuencia de implementar un programa de uso eficiente y/o reciclaje del agua en sus procesos productivos, concentre los contaminantes en su descarga, y en consecuencia rebase los límites máximos permisibles establecidos en la presente Norma, deberá solicitar ante la Comisión Nacional del Agua se analice su caso particular, a fin de que ésta le fije condiciones particulares de descarga.



## 5. Métodos de prueba

Para determinar los valores y concentraciones de los parámetros establecidos en esta Norma Oficial Mexicana, se deberán aplicar los métodos de prueba indicados en el punto 2 de esta Norma Oficial Mexicana. El responsable de la descarga podrá solicitar a la Comisión Nacional del Agua, la aprobación de métodos de prueba alternos. En caso de aprobarse, dichos métodos podrán ser autorizados a otros responsables de descarga en situaciones similares.

## 6. Verificación

La Comisión Nacional del Agua llevará a cabo muestreos y análisis de las descargas de aguas residuales, de manera periódica o aleatoria, con objeto de verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos para los parámetros señalados en la presente Norma Oficial Mexicana.

## 7. Grado de concordancia con normas y recomendaciones internacionales

7.1 No hay normas equivalentes, las disposiciones de carácter interno que existen en otros países no reúnen los elementos y preceptos de orden técnico y jurídico que en esta Norma Oficial Mexicana se integran y complementan de manera coherente, con base en los fundamentos técnicos y científicos reconocidos internacionalmente.

## 8. Bibliografía

**8.1** APHA, AWWA, WPCF, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. U.S.A. (Métodos normalizados para el análisis del agua y aguas residuales. 19a. Edición. E.U.A.)

**8.2** Code of Federal Regulations. Title 40. Parts 100 to 149; 400 to 424; and 425 to 629. Protection of Environment 1992. USA. (Código de Normas Federales. Título 40. Partes 100 a 149; 400 a 424; y 425 a 629. Protección al Ambiente. E.U.A.)

**8.3** Ingeniería sanitaria y de aguas residuales, 1988. Gordon M. Fair, John Ch. Geyer, Limusa, México.

**8.4** Industrial Water Pollution Control, 1989. 2nd Edition. USA. (Control de la contaminación industrial del agua Eckenfelder W.W. Jr. 2a. Edición Mcgraw-Hill International Editions. E.U.A.)

**8.5** Manual de Agua para Usos Industriales, 1988. Sheppard T. Powell. Ediciones Ciencia y Técnica, S.A. 1a. edición. Volúmenes 1 al 4. México.

**8.6** Manual de Agua, 1989. Frank N. Kemmer, John McCallion Ed. Mcgraw-Hill. Volúmenes 1 al 3. México.

**8.7** U.S.E.P.A. Development Document for Effluent Limitation Guidelines And New Source Performance Standard For The 1974 (Documento de Desarrollo de La U.S.E.P.A. para guías de límites de efluentes y estándares de evaluación de nuevas fuentes para 1974).

**8.8** Water Treatment Chemicals. An Industrial Guide, 1991. (Tratamiento químico del agua. Una guía industrial) Flick, Ernest W. Noyes Publications. E.U.A.

**8.9** Water Treatment Handbook, 1991. (Manual de tratamiento de agua. Degremont 6a. Edición Vol. I y II. E.U.A.)

**8.10** Wastewater Engineering Treatment. Disposal, Reuse, 1991. 3rd Edition. U.S.A. (Ingeniería en el tratamiento de aguas residuales. Disposición y reúso. Metcalf And Eddy. Mcgraw-Hill International Editions. 3a. Edición. E.U.A.)

**8.11** Estudio de Factibilidad del Saneamiento del Valle de México. Informe Final. Dic. 1995. Comisión Nacional del Agua, Departamento del Distrito Federal, Estado de Hidalgo y Estado de México.

**8.12** Guía Para el Manejo, Tratamiento y Disposición de Lodos Residuales de Plantas de Tratamiento Municipales. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial. México, 1994.

**8.13** Sistemas Alternativos de Tratamiento de Aguas Residuales y Lodos Producidos. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial. México, 1994.



- 8.14** Impact of Wastewater Reuse on Groundwater In The Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico. Overseas Development Administration. Phase 1, Report - February 1995.
- 8.15** Evaluación de la Toxicidad de Descargas Municipales. Comisión Nacional del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Noviembre de 1993.
- 8.16** Tratabilidad del Agua Residual Mediante el Proceso Primario Avanzado. Instituto de Ingeniería de la UNAM. 1994-1995.
- 8.17** Estudio de la Desinfección del Efluente Primario Avanzado. Instituto de Ingeniería de la UNAM. 1994-1995.
- 8.18** Formación y Migración de Compuestos Organoclorados a través de Columnas Empaquetadas con Suelo de la Zona de Tula-Mezquital-Actopan. Instituto de Ingeniería de la UNAM. 1995-1996.
- 8.19** Estudio de Calidad y Suministro del Agua para Consumo Doméstico del Valle del Mezquital. Instituto de Ingeniería de la UNAM. 1995-1996.
- 8.20** Estudio de Impacto Ambiental Asociado al Proyecto de Saneamiento del Valle de México. Instituto de Ingeniería de la UNAM. 1995-1996.
- 8.21** Proyecto de Normatividad Integral para Mejorar la Calidad del Agua en México. Instituto de Ingeniería de la UNAM. 1995-1996.
- 8.22** Estudio de Disponibilidad de Agua en México en Función del Uso, Calidad y Cantidad. Instituto de Ingeniería de la UNAM. 1995.
- 8.23** Cost - Effective Water Pollution Control in The Northern Border Of Mexico. Institute For Applied Environmental Economics (Tme), 1995.
- 8.24** XI Censo General de Población y Vivienda. INEGI / CONAPO 1990.
- 8.25** Normas Oficiales Mexicanas para Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores: NOM-001-SEMARNAT/1993 a NOM-033-ECOL/1993, publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 18 de octubre de 1993; NOM-063-ECOL/1994 a NOM-065- ECOL/1994, publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 5 de enero de 1995; NOM-066-ECOL/1994 a NOM-068-ECOL-1994, publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 6 de enero de 1995; NOM-069-ECOL/1994 y NOM-070-ECOL/1994, publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 9 de enero de 1995; y NOM-071-ECOL-1994 a NOM-073-ECOL-1994, publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 11 de enero de 1995.
- 8.26** Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. SEMARNAP. Instituto de Ecología. México, D.F.
- 8.27** Catálogo Oficial de Plaguicidas Control Intersectorial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas. SARH, SEDESOL, SSA y SECOFI. México, D.F. 1994.
- 8.28** Indicadores CONAPO/CNA. Socioeconómicos e Índice de Marginación Municipal 1990.
- 8.29** Bases para el Manejo Integral de la Cantidad y Calidad del Agua en México. Instituto de Ingeniería de la UNAM. 1995.
- 8.30** Manejando las Aguas Residuales en Zonas Urbanas Costeras. Reporte 1993. EUA. Comité Sobre el Manejo de las Aguas Residuales en Zonas Urbanas Costeras. Consejo de Ciencia y Tecnología sobre Agua. Comisión de Sistemas Técnicos e Ingeniería. Consejo Nacional de Investigación.
- 8.31** NMX-AA-087-1995-SCFI. Análisis de Agua.- Evaluación de Toxicidad Aguda con Daphnia Magna Straus (Crustacea-Cladocera).- Método de Prueba.
- 8.32** NMX-AA-110-1995-SCFI. Análisis de Agua.- Evaluación de Toxicidad Aguda con Artemia Franciscana Kellogs (Crustacea-Anostraca).- Método de Prueba.
- 8.33** NMX-AA-112-1995-SCFI. Análisis de Agua y Sedimento.- Evaluación de Toxicidad aguda con Photobacterium Phosphoreum.- Método de Prueba.



## 9. Observancia de esta Norma

9.1 La vigilancia del cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, por conducto de la Comisión Nacional del Agua, y a la Secretaría de Marina en el ámbito de sus respectivas atribuciones, cuyo personal realizará los trabajos de inspección y vigilancia que sean necesarios. Las violaciones a la misma se sancionarán en los términos de la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

9.2 La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**.

9.3 Se abrogan las normas oficiales mexicanas que a continuación se indican:

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de las centrales termoeléctricas convencionales.

Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria productora de azúcar de caña.

Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de refinación de petróleo y petroquímica.

Norma Oficial Mexicana NOM-004-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de fabricación de fertilizantes excepto la que produzca ácido fosfórico como producto intermedio.

Norma Oficial Mexicana NOM-005-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de fabricación de productos plásticos y polímeros sintéticos.

Norma Oficial Mexicana NOM-006-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de fabricación de harinas.

Norma Oficial Mexicana NOM-007-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de la cerveza y de la malta.

Norma Oficial Mexicana NOM-008-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de fabricación de asbestos de construcción.

Norma Oficial Mexicana NOM-009-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria elaboradora de leche y sus derivados.

Norma Oficial Mexicana NOM-010-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de las industrias de manufactura de vidrio plano y de fibra de vidrio.

Norma Oficial Mexicana NOM-011-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de productos de vidrio prensado y soplado.

Norma Oficial Mexicana NOM-012-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria hulera.

Norma Oficial Mexicana NOM-013-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria del hierro y del acero.

Norma Oficial Mexicana NOM-014-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria textil.



Norma Oficial Mexicana NOM-015-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de la celulosa y el papel.

Norma Oficial Mexicana NOM-016-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de bebidas gaseosas.

Norma Oficial Mexicana NOM-017-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de acabados metálicos.

Norma Oficial Mexicana NOM-018-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de laminación, extrusión y estiraje de cobre y sus aleaciones.

Norma Oficial Mexicana NOM-019-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de impregnación de productos de aserradero.

Norma Oficial Mexicana NOM-020-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de asbestos textiles, materiales de fricción y selladores.

Norma Oficial Mexicana NOM-021-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria del curtido y acabado en pieles.

Norma Oficial Mexicana NOM-022-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de matanza de animales y empaqueo de cárnicos.

Norma Oficial Mexicana NOM-023-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de envasado de conservas alimenticias.

Norma Oficial Mexicana NOM-024-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria elaboradora de papel a partir de celulosa virgen.

Norma Oficial Mexicana NOM-025-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria elaboradora de papel a partir de fibra celulósica reciclada.

Norma Oficial Mexicana NOM-026-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de restaurantes o de hoteles.

Norma Oficial Mexicana NOM-027-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria del beneficio del café.

Norma Oficial Mexicana NOM-028-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de preparación y envasado de conservas de pescados y mariscos y de la industria de producción de harina y aceite de pescado.

Norma Oficial Mexicana NOM-029-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de hospitales.

Norma Oficial Mexicana NOM-030-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de jabones y detergentes.

Norma Oficial Mexicana NOM-032-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola.



Norma Oficial Mexicana NOM-33-ECOL-1993, que establece las condiciones bacteriológicas para el uso de las aguas residuales de origen urbano o municipal o de la mezcla de éstas con la de los cuerpos de agua, en el riego de hortalizas y productos hortofrutícolas. Publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 18 de octubre de 1993.

La nomenclatura de las normas oficiales mexicanas antes citadas está en términos del Acuerdo por el que se reforma la nomenclatura de 58 Normas Oficiales Mexicanas en materia de Protección Ambiental, publicado en el **Diario Oficial de la Federación** el 29 de noviembre de 1994.

Asimismo se abrogan las siguientes normas oficiales mexicanas:

Norma Oficial Mexicana NOM-063-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria vinícola.

Norma Oficial Mexicana NOM-064-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de la destilería.

Norma Oficial Mexicana NOM-065-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de las industrias de pigmentos y colorantes, publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 5 de enero de 1995.

Norma Oficial Mexicana NOM-066-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de la galvanoplastia.

Norma Oficial Mexicana NOM-067-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de los sistemas de alcantarillado o drenaje municipal.

Norma Oficial Mexicana NOM-068-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de aceites y grasas comestibles de origen animal y vegetal, publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 6 de enero de 1995.

Norma Oficial Mexicana NOM-069-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de componentes eléctricos y electrónicos.

Norma Oficial Mexicana NOM-070-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de preparación, conservación y envasado de frutas, verduras y legumbres en fresco y/o congelados, publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 9 de enero de 1995.

Norma Oficial Mexicana NOM-071-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de productos químicos inorgánicos.

Norma Oficial Mexicana NOM-072-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de las industrias de fertilizantes fosfatados, fosfatos, polifosfatos, ácido fosfórico, productos químicos inorgánicos fosfatados, exceptuando a los fabricantes de ácido fosfórico por el proceso de vía húmeda.

Norma Oficial Mexicana NOM-073-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de las industrias farmacéutica y **farmoquímica**, publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 11 de enero de 1995.

## TRANSITORIO

**UNICO.** A partir de la entrada en vigor de esta Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT- 1996, el responsable de la descarga de aguas residuales:

1) Que cuente con planta de tratamiento de aguas residuales, está obligado a operar y mantener dicha infraestructura de saneamiento, cuando su descarga no cumpla con los límites máximos permisibles de esta Norma.

Puede optar por cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en esta Norma Oficial Mexicana, o los establecidos en sus condiciones particulares de descarga, previa notificación a la Comisión Nacional del Agua.



En el caso de que la calidad de la descarga que se obtenga con dicha infraestructura no cumpla con los límites máximos permisibles establecidos en esta Norma Oficial Mexicana, debe presentar a la Comisión Nacional del Agua, en los plazos establecidos en las Tablas A.6 y A.7, su programa de acciones u obras a realizar para cumplir en las fechas establecidas en las Tablas A.4 y A.5, según le corresponda.

Los que no cumplan, quedarán sujetos a lo dispuesto en la Ley Federal de Derechos.

En el caso de que el responsable de la descarga opte por cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en esta Norma Oficial Mexicana y que descargue una mejor calidad de agua residual que la establecida en esta Norma, puede gozar de los beneficios e incentivos que para tal efecto establece la Ley Federal de Derechos.

- 2) Que se hubiere acogido a los Decretos Presidenciales que otorgan facilidades administrativas y fiscales a los usuarios de Aguas Nacionales y sus Bienes Públicos inherentes, publicados en el **Diario Oficial de la Federación** el 11 de octubre de 1995, en la materia, quedará sujeto a lo dispuesto en los mismos y en lo conducente a la Ley Federal de Derechos.
- 3) No debe descargar concentraciones de contaminantes mayores a las que descargó durante los últimos tres años o menos, si empezó a descargar posteriormente, de acuerdo con sus registros y/o con los informes presentados ante la Comisión Nacional del Agua en ese periodo si su descarga tiene concentraciones mayores a las establecidas como límite máximo permisible en esta Norma. Los responsables que no cumplan con esta especificación quedarán sujetos a lo dispuesto en la Ley Federal de Derechos.
- 4) Que establezca una nueva instalación industrial, posterior a la publicación de esta Norma Oficial Mexicana en el **Diario Oficial de la Federación**, no podrá acogerse a las fechas de cumplimiento establecidas en la Tabla A.5 de esta Norma y debe cumplir con los límites máximos permisibles para su descarga, 180 días calendario después de iniciar la operación del proceso generador, debiendo notificar a la Comisión Nacional del Agua dicha fecha.
- 5) Que incremente su capacidad o amplíe sus instalaciones productivas, posterior a la publicación de esta Norma Oficial Mexicana en el **Diario Oficial de la Federación**, éstas nuevas descargas no podrán acogerse a las fechas de cumplimiento establecidas en la Tabla A.5 de esta Norma y debe cumplir con los límites máximos permisibles para éstas, 180 días calendario después de iniciar la operación del proceso generador, debiendo notificar a la Comisión Nacional del Agua dicha fecha.
- 6) Que no se encuentre en alguno de los supuestos anteriores, deberá cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en esta Norma Oficial Mexicana, sujeto a lo dispuesto en la Ley Federal de Derechos, en lo conducente.

México, Distrito Federal, a los once días del mes de diciembre de mil novecientos noventa y seis.- La Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, **Julia Carabias Lillo**.- Rúbrica.



**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-143-SEMARNAT-2003, QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES AMBIENTALES PARA EL MANEJO DE AGUA CONGÉNITA ASOCIADA A HIDROCARBUROS.**

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

JUAN RAFAEL ELVIRA QUESADA, Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con fundamento en el artículo 32 bis fracciones I y IV de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 5 fracciones V y XIII, 36, 37 Bis, 108, 109, 117 fracciones II y III, 118 fracción II, 119, 120 fracción IV, 121, 130 y 161 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 4 y 86 fracción III de la Ley de Aguas Nacionales; 38 fracción II, 40 fracción X, 46 y 47 fracción I de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 34 y 137 del Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales; 1, 4 y 8 fracción V del Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**CONSIDERANDO**

Que el Proyecto de Norma Oficial Mexicana fue aprobado por el Comité Consultivo Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales, en sesión celebrada el 21 de mayo de 2003, y que de conformidad con el artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, se publicó el 24 de agosto de 2004, para consulta pública a efecto de que los interesados, dentro de los 60 días naturales contados a partir de la fecha de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**, presentarán sus comentarios ante el citado Comité, sito en bulevar Adolfo Ruiz Cortines número 4209, quinto piso, Fraccionamiento Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, código postal 14210, Distrito Federal, o en el correo electrónico: aescamilla@semarnat.gob.mx.

Que durante el plazo mencionado la Manifestación de Impacto Regulatorio a que se refiere el artículo 45 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, estuvo a disposición del público para su consulta en el domicilio del Comité antes señalado.

Que de conformidad con lo establecido en el artículo 47 fracciones II y III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los interesados presentaron sus comentarios al Proyecto de Norma en cuestión, los cuales fueron analizados por el citado comité realizándose las modificaciones procedentes al Proyecto y que las respuestas a los comentarios y modificaciones antes citados fueron publicados en el **Diario Oficial de la Federación** el 16 de febrero de 2005.

Que cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de Normas Oficiales Mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales en sesión de fecha 30 de noviembre de 2004 aprobó para publicación las respuestas a los comentarios, así como las modificaciones correspondientes a la presente Norma Oficial Mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003, Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos, por lo que he tenido a bien expedir la siguiente:

**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-143-SEMARNAT-2003, QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES AMBIENTALES PARA EL MANEJO DE AGUA CONGENITA ASOCIADA A HIDROCARBUROS**

**Prefacio**

En la elaboración de esta Norma Oficial Mexicana participaron:

- Ø SECRETARIA DE AGRICULTURA, GANADERIA, PESCA Y ALIMENTACION
- Ø SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
- Ø SECRETARIA DE ENERGIA
- Ø SECRETARIA DE MARINA
- Ø SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
  - Dirección General de Energía y Actividades Extractivas
  - Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas
  - Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental
  - Dirección General del Sector Primario y Recursos Naturales Renovables
  - Coordinación de Asesores del C. Secretario
- Ø COMISION NACIONAL DEL AGUA
- Ø PROCURADURIA FEDERAL DE PROTECCION AL AMBIENTE
- Ø INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
- Ø PETROLEOS MEXICANOS
  - Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental Pemex Exploración y Producción
- Ø INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
- Ø COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
- Ø ASOCIACION DE INGENIEROS PETROLEROS DE MEXICO



## 0. Introducción

El agua congénita o de formación, es agua salada que se encuentra dentro de la roca, asociada a la presencia de hidrocarburos. Contiene sales disueltas, como cloruros de calcio y sodio, carbonatos de sodio, cloruros de potasio, sulfatos de calcio o de bario, entre otros; puede incluso contener algunos metales. La concentración de estos componentes puede ocasionar impactos negativos al medio ambiente cuando su manejo y disposición no son adecuados.

Los riesgos ambientales que se presentan en el manejo y disposición del agua congénita son: la eventual contaminación de acuíferos en el proceso de inyección a formaciones receptoras, la contaminación de cuerpos receptores si no se cuenta con parámetros de limpieza, y la contaminación del suelo cuando se producen derrames accidentales en su transporte.

La tendencia mundial coincide en que las opciones óptimas para la disposición del agua congénita asociada a la producción de hidrocarburos es su inyección en formaciones receptoras subterráneas, o su disposición en el mar.

En México, durante 2002, en la explotación de petróleo crudo y gas natural, se produjeron 12.09 millones de metros cúbicos de agua congénita, de los cuales se reinyectó 86.4 % y se dispuso en cuerpos receptores, el 14.6 % restante.

Lo anterior hace necesaria la elaboración y expedición de una Norma Oficial Mexicana que establezca las especificaciones técnicas ambientales para su adecuado manejo y disposición.

## 1. Objetivo

Establecer especificaciones en materia ambiental para el manejo e inyección en formaciones receptoras, del agua congénita que se asocia a hidrocarburos y los límites máximos permisibles de los parámetros para su descarga a cuerpos receptores.

## 2. Campo de aplicación

Es de observancia obligatoria para el Organismo que maneje agua congénita en todo el territorio nacional y en las zonas marinas mexicanas.

## 3. Referencias

NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales (aclaración publicada en el DOF, el 30 de abril de 1997).

NOM-004-CNA-1996, Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.

NOM-115-SEMARNAT-2003, Que establece las especificaciones de protección ambiental que deben observarse en las actividades de perforación y mantenimiento de pozos petroleros terrestres para exploración y producción en zonas agrícolas, ganaderas y eriales, fuera de áreas naturales protegidas o terrenos forestales.

## 4. Definiciones

Para los efectos de esta Norma Oficial Mexicana se consideran las definiciones contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización, la Ley de Aguas Nacionales, la Ley Federal del Mar y las que a continuación se mencionan.

### 4.1 Agua congénita

Agua asociada al hidrocarburo en el yacimiento y que surge durante la extracción del mismo. Contiene sales y puede tener metales. Se considera un subproducto no aprovechable.

### 4.2 Condensados

Líquido producido por la condensación del gas natural. Está compuesto por proporciones variables de butano, propano, pentano y fracciones más pesadas, con poco o nada de metano y etano.

### 4.3 Contenedor

Depósito para el almacenamiento temporal y transporte de agua congénita.

### 4.4 Contenedor cisterna

Es aquella cisterna de al menos 450 litros de capacidad cuyo depósito esté provisto de todos los elementos estructurales y aditamentos que sean necesarios para el transporte de líquidos peligrosos. El contenedor cisterna debe poder ser transportado por tierra y por mar, y ser cargado y descargado sin necesidad de desmontar sus elementos estructurales exteriores del tanque y poder ser elevado cuando esté lleno.

### 4.5 Formación receptora

Estrato o depósito compuesto en su totalidad por roca porosa y permeable del subsuelo localizado por debajo de un acuífero.

### 4.6 Fractura



Fisura o grieta de la formación, natural o inducida.

#### 4.7 Inyección

Acción de disponer el agua congénita en formaciones receptoras, a través de pozos.

#### 4.8 Manejo

Alguna o el conjunto de las actividades siguientes: separación, transporte, almacenamiento, inyección y disposición final de agua congénita.

#### 4.9 Pozo para la inyección de agua congénita

Obra de ingeniería construida especialmente para disponer agua congénita en formaciones receptoras o pozo petrolero agotado que cumpla con las especificaciones de la presente Norma.

#### 4.10 Sellar o taponar

Trabajos necesarios para aislar las formaciones perforadas de tal manera que se eviten invasiones de agua congénita o hidrocarburos a acuíferos o a la superficie.

### 5. Especificaciones

#### 5.1 Manejo del agua congénita

El agua congénita asociada a los hidrocarburos debe ser dispuesta en cuerpos receptores o en formaciones receptoras en el subsuelo.

En caso de presentarse derrames o infiltraciones al suelo durante el manejo del agua congénita debe atenderse a lo dispuesto en la normatividad vigente en materia de restauración de suelos y saneamiento de acuíferos.

##### 5.1.1 Separación

5.1.1.1 Durante los procesos de separación de hidrocarburos y agua congénita se deben evitar derrames o infiltraciones al suelo.

##### 5.1.2 Almacenamiento temporal

5.1.2.1 Las presas para almacenamiento temporal del agua congénita deben evitar filtraciones al suelo; para ello, deben construirse sobre una capa de arcilla, con un espesor, grado de compactación y humedad del material para obtener un coeficiente de permeabilidad  $1 \times 10^{-7}$  cm/seg, o bien sobre un material sintético equivalente en su permeabilidad.

5.1.2.2 Los contenedores para almacenamiento temporal de agua congénita deben contar con diques para la contención de derrames o fugas, con capacidad igual o superior al volumen del contenedor.

##### 5.1.3 Transporte

5.1.3.1 El transporte de agua congénita que contenga 15 % o más condensados se hará en contenedores cisterna.

5.1.3.2 El porcentaje de condensados en el agua congénita se determinará mediante medidores de fases y de volúmenes.

5.1.3.3 Para el transporte de agua congénita en contenedores cisterna se debe llevar una bitácora o registros que permitan dar seguimiento a los volúmenes transferidos entre instalaciones.

##### 5.1.4 Caracterización

5.1.4.1 La caracterización del agua congénita se realizará con los métodos establecidos por las normas competentes, a efecto de determinar la concentración de hidrocarburos para fines del punto 5.1.5.1 de la presente Norma; con los establecidos en las normas correspondientes, para la determinación de sólidos y sales disueltas para fines de los puntos 5.1.5.2 y 5.1.5.3; y con los establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, para caracterizar los contaminantes básicos y metales pesados referenciados en la misma, cuando se descargue el agua congénita en cuerpos receptores.

5.1.5 Límites máximos permisibles de parámetros para la descarga del agua congénita a un cuerpo receptor.

5.1.5.1 El límite máximo permisible de hidrocarburos para la descarga de agua congénita en cuerpos receptores de agua dulce es de 15 mg/l, y en aguas costeras y zonas marinas es de 40 mg/L.

5.1.5.2 El límite máximo permisible de sólidos disueltos totales (SDT) para la descarga de agua congénita en cuerpos receptores de agua dulce es de 500 mg/L.

5.1.5.3 El límite máximo permisible de sólidos disueltos totales (SDT) para la descarga de agua congénita en aguas costeras es de 32,000 mg/L, y su descarga debe ser a una distancia que sobrepase los 2 km mar adentro. Cuando las concentraciones de sólidos disueltos totales sobrepasen las del cuerpo al que se descarga, su descarga se tiene que efectuar través de difusores que permitan la dispersión y asimilación inmediata.

##### 5.1.6 Características de los pozos para la inyección de agua congénita

5.1.6.1 Los pozos petroleros agotados que se utilicen para la inyección de agua congénita deben cumplir con lo especificado en los numerales 5.1.6.2 al 5.1.6.4 de esta Norma Oficial Mexicana.

5.1.6.2 No debe existir comunicación entre los acuíferos y los pozos; para ello, la tubería de revestimiento debe ir cementada desde la superficie del suelo hasta la formación receptora.



**5.1.6.3** Se debe contar con equipos que permitan medir la hermeticidad de los pozos mediante el registro diario de la presión y el flujo de inyección. En caso de pérdida de hermeticidad se debe suspender de inmediato la inyección.

**5.1.6.4** La formación receptora se debe localizar debajo de un estrato impermeable.

#### **5.1.7 Especificaciones para la inyección**

**5.1.7.1** La inyección de agua congénita sólo podrá realizarse toda vez que en su manejo no se incorporen sustancias diferentes a los desincrustantes, inhibidores de corrosión y secuestrantes de oxígeno, desemulsificantes, biocidas y en general, las sustancias necesarias para proteger el pozo y realizar un manejo seguro de dicha agua congénita. Cuando se le añadan sustancias adicionales al agua congénita a inyectar, ésta debe tratarse para restaurarle sus características previas a la adición de dichas sustancias.

**5.1.8** Especificaciones sobre la separación de agua congénita en el interior del pozo en producción.

**5.1.8.1** Cuando el proceso de separación de agua congénita se lleve a cabo en el interior del pozo, se observará lo dispuesto en los numerales 5.1.6.2 al 5.1.6.4.

#### **5.2 Abandono del sitio**

**5.2.1** Los pozos de inyección de agua congénita que ya no se vayan a utilizar para ese u otro fin, deben taponarse como lo establece la NOM-004-CNA-1996.

**5.2.2** El abandono del sitio de los pozos de inyección de agua congénita, debe hacerse conforme a la NOM115-SEMARNAT-2003 o la regulación aplicable para el lugar donde se encuentre el pozo.

#### **5.3 Disposición de sólidos separados del agua congénita**

**5.3.1** Los lodos resultantes del tratamiento del agua congénita deben manejarse conforme a la normatividad aplicable. **5.4** Monitoreo

**5.4.1** Cuando el agua congénita sea inyectada, se debe contar con bitácoras o registros de presiones y volúmenes inyectados.

**5.4.2** Cuando el agua congénita se descargue a cuerpos receptores, se deben llevar a cabo monitoreos semestrales de las descargas.

#### **6. Evaluación de la conformidad**

La evaluación de la conformidad de la presente Norma Oficial Mexicana se realizará de acuerdo a lo dispuesto por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento, además de lo siguiente:

**6.1** El procedimiento de evaluación de la conformidad se llevará a cabo por las Unidades de Verificación (UV's) y los laboratorios acreditados y aprobados, y en ausencia de éstos la evaluación se realizará por parte de las autoridades competentes.

**6.2** Se deben conservar los documentos que se enlistan a continuación:

**6.2.1** La bitácora o registros de los volúmenes transportados de agua congénita.

**6.2.2** Los estudios geológicos y geofísicos que den certidumbre a lo dispuesto en el numeral 5.1.6.4.

**6.2.3** Las bitácoras o registros de presiones y volúmenes inyectados.

**6.2.4** Los resultados de monitoreos semestrales para verificar que se cumplen los límites establecidos en el 5.1.5.1 a 5.1.5.3.

#### **7. Grado de concordancia con normas internacionales**

Esta Norma no coincide con ninguna norma internacional por no existir norma internacional sobre el tema que integre las disposiciones técnicas ambientales que se establecen en la presente.

#### **8. Bibliografía**

Ley de Aguas de Nacionales. Publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 1 de diciembre de 1992, con adiciones y reformas.

Ley Federal de Derechos. Publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 1 de enero de 2002.

Ley Federal del Mar. Publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 8 de enero de 1986, con adiciones y reformas.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Publicada en el **Diario Oficial de la Federación**, el 28 de enero de 1988, con adiciones y reformas. Y reformas publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** del 31 de diciembre de 2001.

Reglamento para prevenir y controlar la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias. Publicado en el **Diario Oficial de la Federación** el 23 de enero de 1979.

NMX-AA-117-SCFI-2001, Análisis de agua-Determinación de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP's) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas- Métodos de prueba.



NMX-Z-013/1-1977, Guía para la redacción, estructuración y presentación de las normas oficiales mexicanas.

NOM-032-SCT2/1995, Para el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos. Especificaciones y características para la construcción y reconstrucción de contenedores cisterna destinados al transporte multimodal de materiales de las clases 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

NOM-057-SEMARNAT-1993 Que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.

MARPOL 73/78. Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, celebrado del 8 de octubre al 2 de noviembre de 1973.

Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas. Guías de inyección para la disposición de agua congénita. Reporte No. 2.80/302. Enero 2000.

Comisión de ferrocarriles de Texas. Código Administrativo de Texas. Inyección de fluidos en yacimientos productores.

OSPAR. Convención para la Protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico Noreste. Recomendaciones 2001/1 para el manejo del agua congénita desde instalaciones marítimas. Junio 2001.

Agencia de los Estados Unidos de Protección al Medio Ambiente. Programa de inyección al subsuelo. EUA, enero de 2001.

### 9. Observancia de esta Norma

La observancia del cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales por conducto de la Comisión Nacional del Agua, en coordinación con la Secretaría de Marina, en el ámbito de sus respectivas atribuciones, cuyo personal realizará los trabajos de inspección, vigilancia, y, en su caso, de imposición de sanciones en los términos establecidos en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Ley de Aguas Nacionales, el Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias, y demás disposiciones legales aplicables.

### TRANSITORIO

**UNICO.-** La presente Norma Oficial Mexicana, entrará en vigor 60 días después de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**.

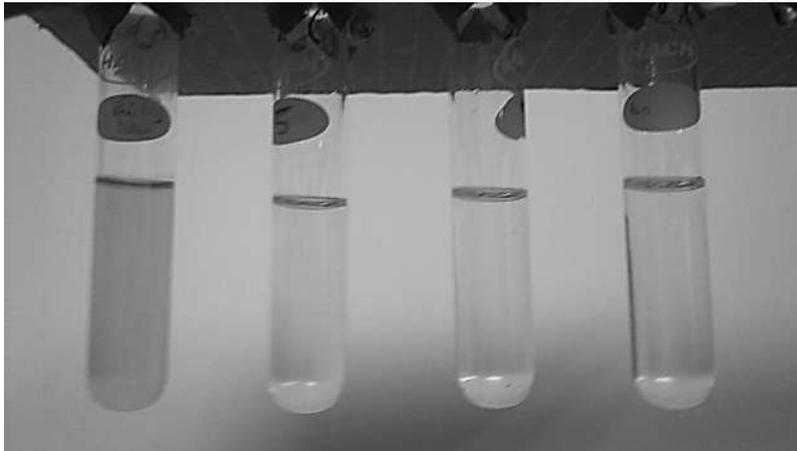
Provéase la publicación de esta Norma Oficial Mexicana en el **Diario Oficial de la Federación**.

México, Distrito Federal, a los seis días del mes de enero de dos mil cinco.- El Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, **Juan Rafael Elvira Quesada**.- Rúbrica.

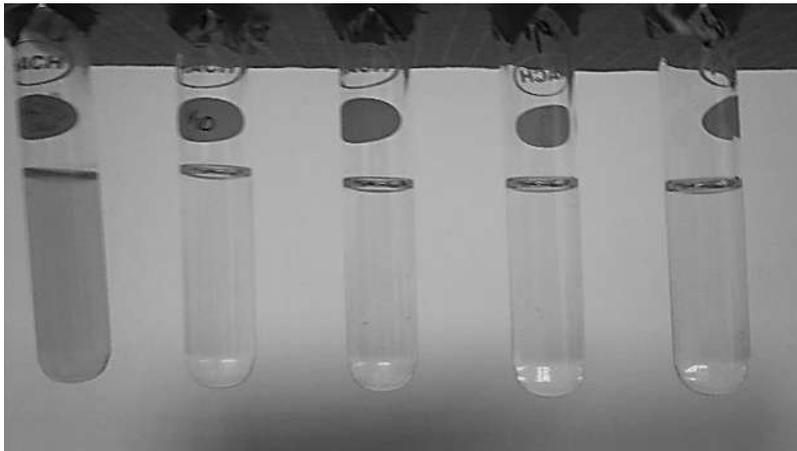


## ANEXO B

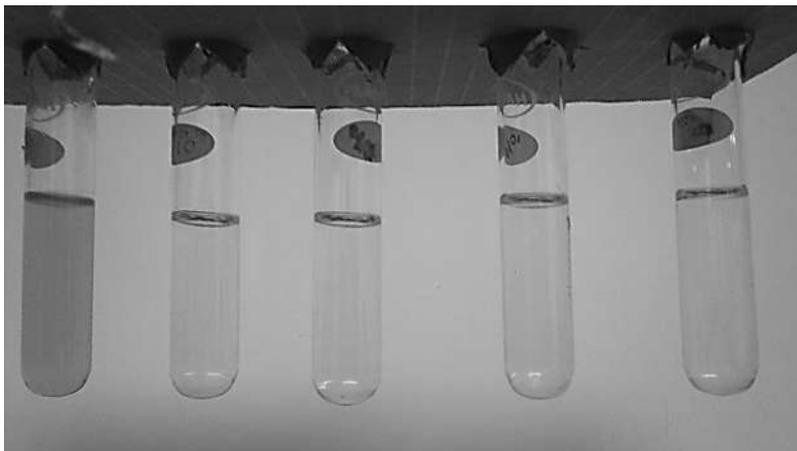
### Muestras de la Prueba de Centrifugación



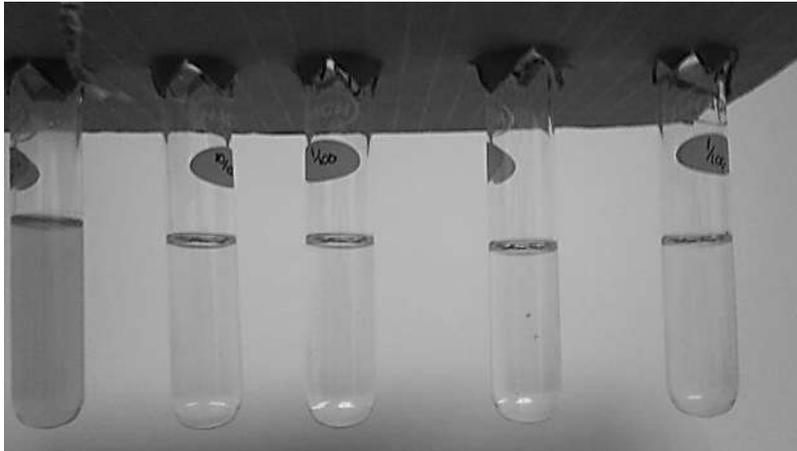
*Figura B.1* Muestras centrifugadas durante un minuto a 0 rpm, 3,000 rpm, 6,000 rpm y 9,000 rpm.



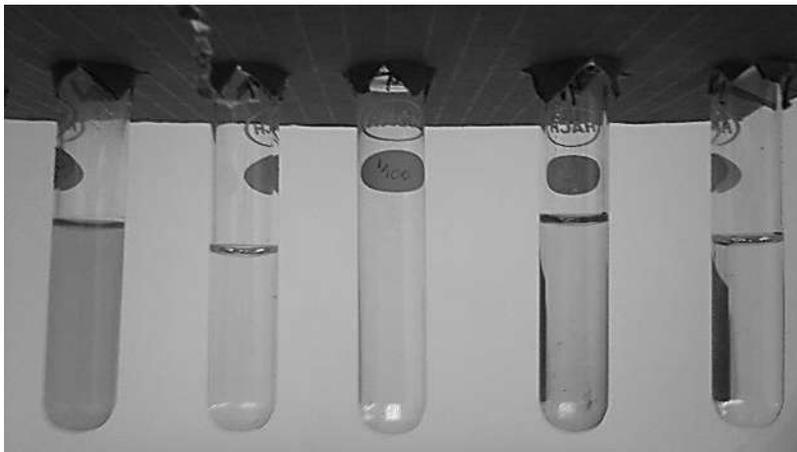
*Figura B.2* Muestras centrifugadas durante dos minutos a 0 rpm, 3,000 rpm, 6,000 rpm, 9,000 rpm y 12,000 rpm.



*Figura B.3* Muestras centrifugadas durante tres minutos a 0 rpm, 3,000 rpm, 6,000 rpm, 9,000 rpm y 12,000 rpm.



**Figura B.4** Muestras centrifugadas durante cuatro minutos a 0 rpm, 3,000 rpm, 6,000 rpm, 9,000 rpm y 12,000 rpm.

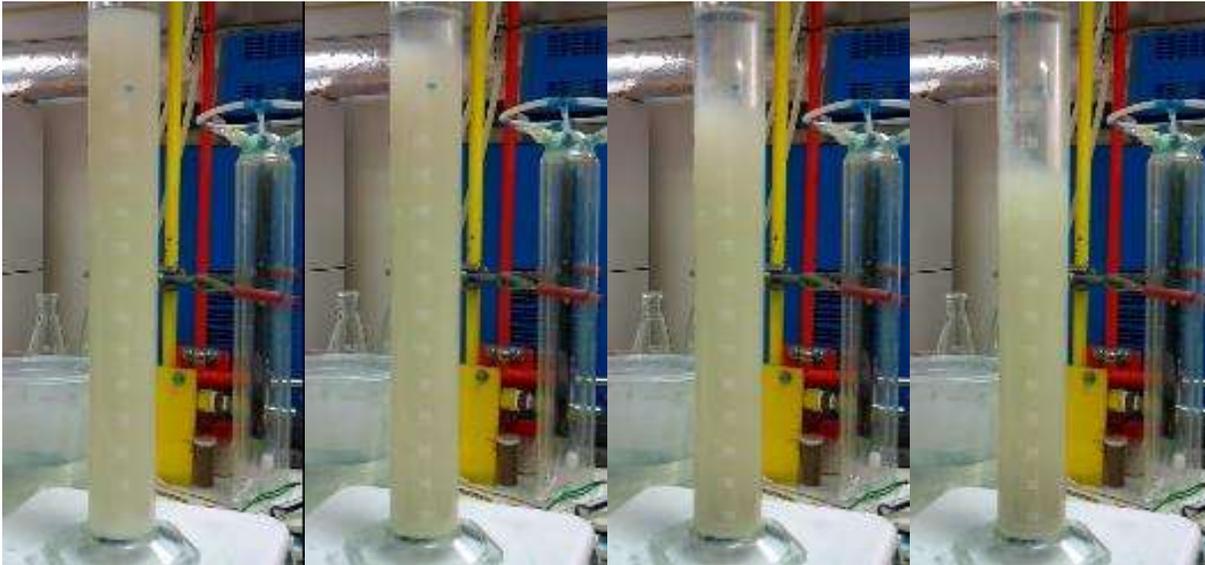


**Figura B.5** Muestras centrifugadas durante cinco minutos a 0 rpm, 3,000 rpm, 6,000 rpm, 9,000 rpm y 12,000 rpm.

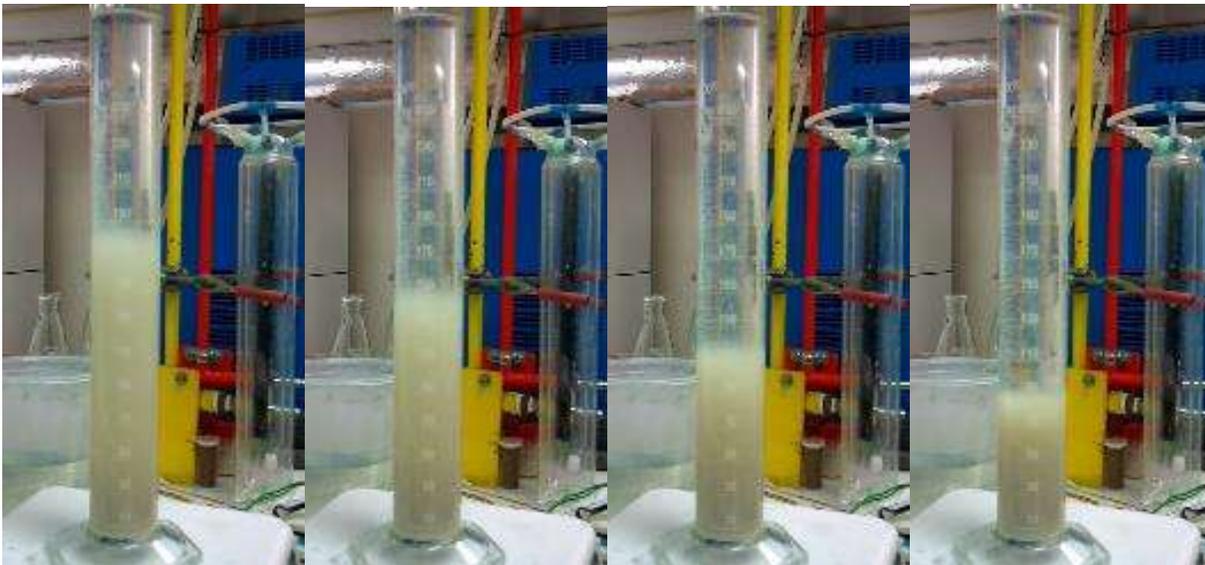


## ANEXO C

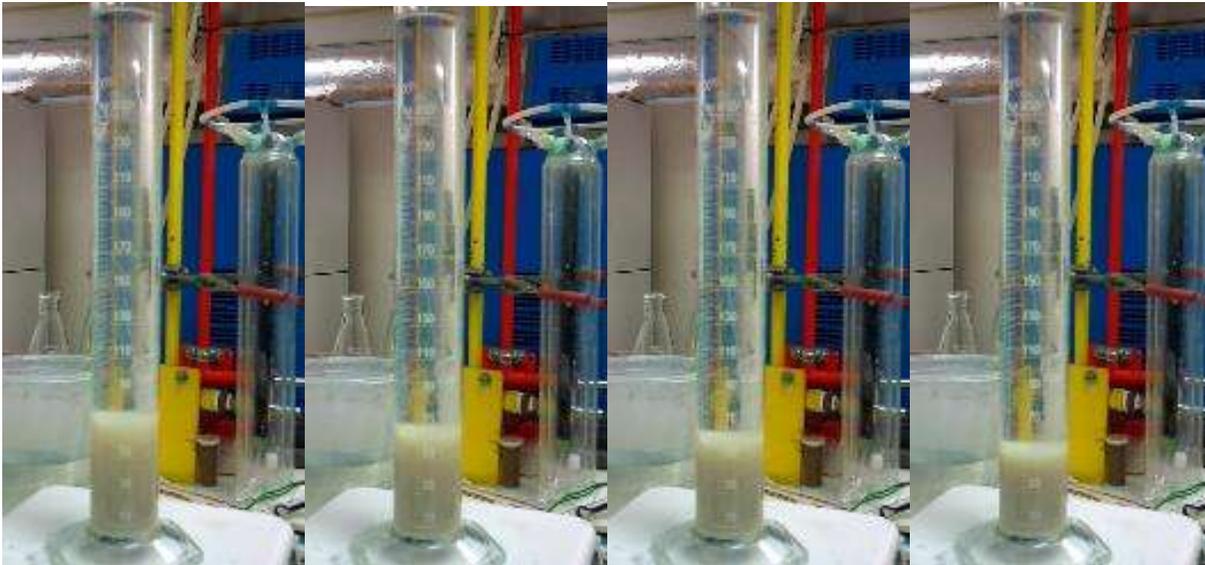
### Imágenes de la Prueba de Sedimentación a Temperatura ambiente



*Figura C.1* Prueba de sedimentación al transcurrir 0 min, 2 min, 4 min y 6 min.



*Figura C.2* Prueba de sedimentación al transcurrir 8 min, 10 min, 12 min y 14 min.



*Figura C.3 Prueba de sedimentación al transcurrir 16 min, 18 min, 20 min y 25 min.*



*Figura C.4 Prueba de sedimentación al transcurrir 30 min, 40 min, 50 min y 60 min.*

Los videos de la prueba de sedimentación y de recirculación de lodos pueden ser vistos en el DVD anexo.

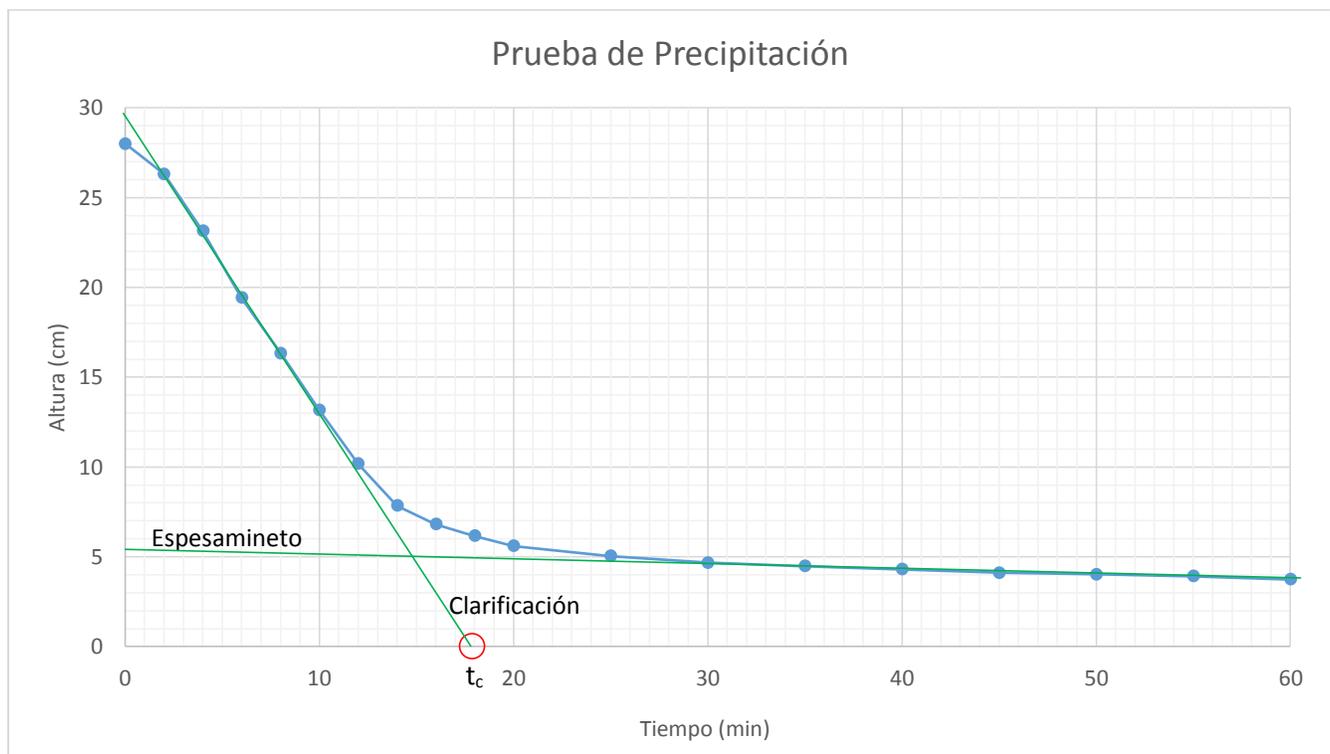


## ANEXO D

### Determinación del Área de Sedimentación para Sedimentación Retardada.

Como se puede observar en las figuras del Anexo D, se observa que, durante el proceso de precipitación, se presente una interface entre la fase del clarificado y la de lodos, la cual reduce su altura conforme pasa el tiempo. Debido a que los sedimentos que se presentan en este tipo de sedimentación se forman a velocidades muy diferentes, se necesita encontrar experimentalmente la velocidad de precipitación en cada prueba. Para explicar la determinación del área de sedimentación requerida para cada sedimentación, tomaremos como ejemplo la **Figura 5.9**.

Primero se trazan dos rectas que representan la línea de clarificación y la línea de espesamiento (líneas verdes) como se muestran en la **Figura D.1**, después se traza una bisectriz (línea roja) en el ángulo formado por las líneas de clarificación y espesamiento, y en el punto donde toque la curva de sedimentación, se traza una tangente (línea morada) hasta el eje de las abscisas.



**Figura D.7.6** Curva de precipitación con las líneas de clarificación y espesamiento y el tiempo de clarificación.

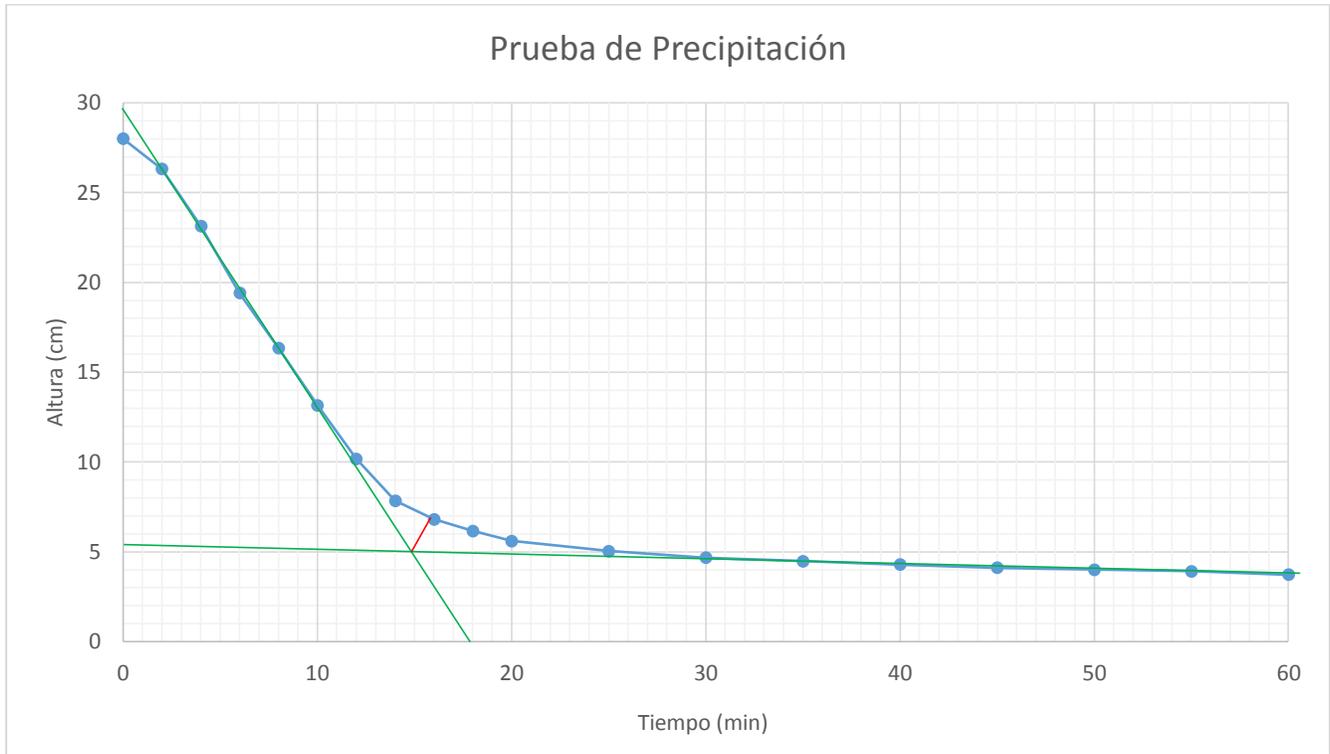


Figura D.2 Curva de precipitación que muestra la bisectriz.

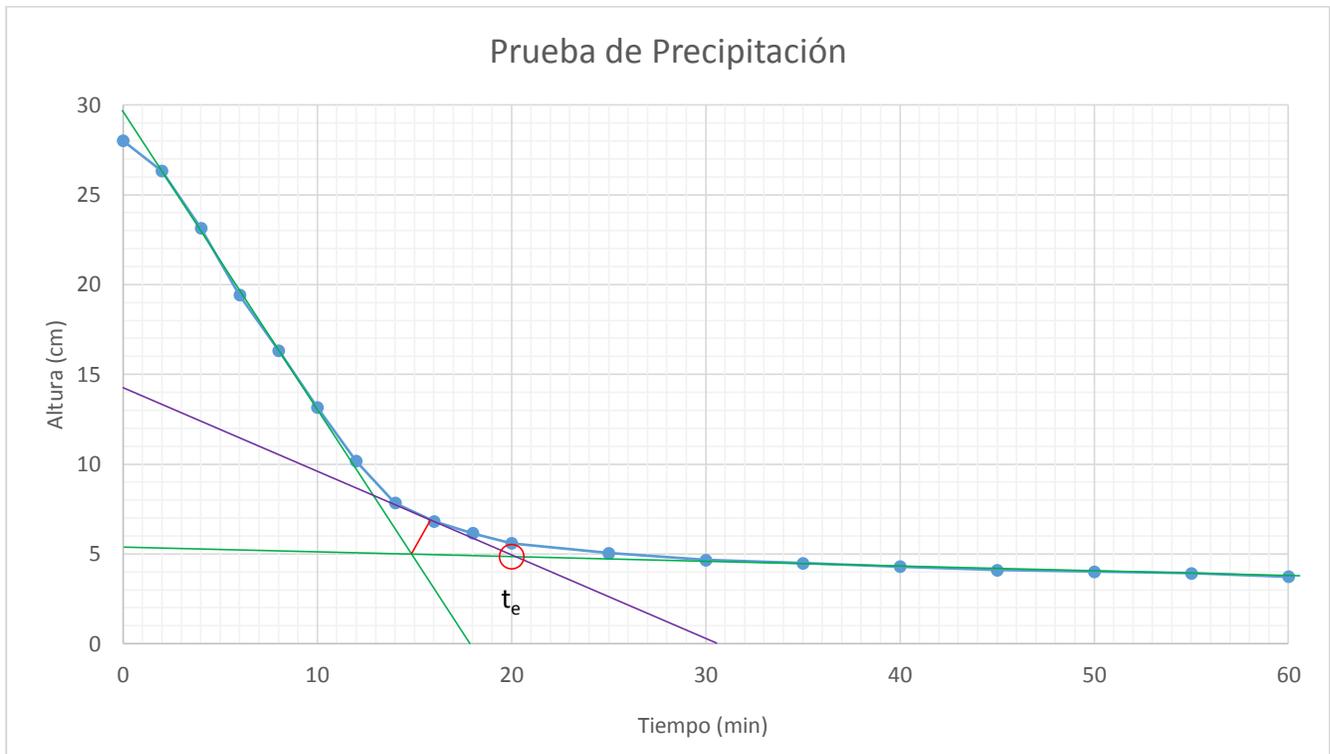


Figura D.3 Curva de precipitación que muestra la tangente y la determinación del tiempo de espesamiento.



Las ecuaciones de diseño son:

$$Ae = 1.5 \frac{Qt_e}{H_0} \quad (D.1)$$

$$Ac = 2 \frac{Q}{v_0} \quad (D.2)$$

Donde:

$Ae$  = Área de espesamiento ( $m^2$ ).

$Ac$  = Área de clarificación ( $m^2$ ).

$Q$  = Flujo del agua a tratar ( $m^3/min$ ).

$t_e$  = Tiempo de espesamiento (min).

$H_0$  = Altura inicial de la columna de líquido (m).

$v_0$  = Velocidad de sedimentación (m/min) la cual se define como:

$$v_0 = \frac{H_0}{t_c} \quad (D.3)$$

Donde:

$t_u$  = Tiempo de clarificación (min).

El área del sedimentador será cualquiera de las dos área cuyo valor sea el mayor. El flujo de agua congénita a tratar es de 250 000 barriles por día o  $27.8 m^3/min$ .

$$251\,402 \frac{\text{barril}}{\text{día}} \left| \frac{159 L}{1 \text{ barril}} \right| \left| \frac{1 m^3}{1000 L} \right| \left| \frac{1 \text{ día}}{24 h} \right| \left| \frac{1 h}{60 \text{ min}} \right| = 27.8 m^3/min$$

La altura  $H_0$  en el caso de la prueba de precipitación es de 0.28 m (28 cm),  $t_e$  se determina en el punto donde la tangente y la línea de espesamiento se cruzan (ver **Figura D.3**) cuyo valor es de 20 min. Estos datos se sustituyen en la ecuación D.1:

$$Ae = 1.5 \frac{(27.8 m^3/min)(20 \text{ min})}{(0.28 m)}$$

$$\boxed{Ae = 2979 m^2}$$



El valor de  $t_c$  se determina en el punto donde se cruzan la línea de clarificación y el eje de las abscisas (ver **Figura D.1**) cuyo valor es de 17.8 min. Sustituyendo en la ecuación D.3:

$$v_0 = \frac{0.28 \text{ m}}{17.8 \text{ min}}$$

$$v_0 = 0.0157 \text{ m/min}$$

Ahora, sustituyendo el valor de la velocidad en la ecuación D.2:

$$Ac = 2 \frac{(27.8 \text{ m}^3/\text{min})}{(0.0157 \text{ m/min})}$$

$$\boxed{Ac = 3\,572 \text{ m}^2}$$

Teniendo ambas áreas, comparamos cuál es la más grande:

$$Ac = 3\,572 \text{ m}^2 > 2\,979 \text{ m}^2 = Ae$$

Por lo tanto, el área del sedimentador requerida para la prueba de sedimentación, es de 3 572 m<sup>2</sup>.