

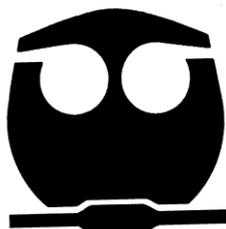


**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**"TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES CON
ALTERNATIVAS FACTIBLES Y ECONÓMICAS"**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE
INGENIERA QUÍMICA
PRESENTA
MARIANA GARCÍA VERA



MÉXICO D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dr. Jesús Gracia Fadrique
VOCAL: Dr. Víctor Manuel Luna Pabello
SECRETARIO: M. en C. Ma. Guadalupe Lemus Barajas
1er. SUPLENTE: Dr. José Agustín García Reynoso
2° SUPLENTE: M. en C. Cristina del Carmen Jiménez Curiel

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

LABORATORIO DE SUPERFICIES
ED. B PRIMER PISO, LAB. 104
FACULTAD DE QUÍMICA
CIUDAD UNIVERSITARIA

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Jesús Gracia Fadrique

SUSTENTANTE:

Mariana García Vera

La única verdad es la realidad ...

Aristóteles

Agradecimientos

A DIOS por iluminar siempre mi camino, darme fortalezas para seguir adelante y lograr mis metas, por TODO.

A mis PAPÁS.

Josefina Vera y Salvador Bazán. Por ser la base de mi vida y porque con su confianza y amor he logrado alcanzar mis metas. Por desvelarse y divertirse conmigo en mis tareas, viajes y aventuras.

A mis HERMANOS.

Emilio, Salvador, Alejandro, Juan Carlos, Patricia, Nadlleli y Josefina. Por ser el gran equipo juntos, por el apoyo incondicional en mis tropiezos y triunfos. Por consentirme y quererme tanto.

A mis TIAS.

Teresita y Olga mi Chuna. Por su amor, cuidado y apoyo que siempre he tenido de ustedes. Chuna siempre estarás en mi corazón, mi ángel.

A mis AMIGOS.

Alejandra y Servando por su gran amistad, amor y apoyo, por las risas y todo cuanto hemos pasado y disfrutado juntos, los quiero demasiado. A David por su apoyo incondicional, por ser un gran amigo. Jerry, Ivonne, Juanchez, Ruth, Mechis, gracias por su cariño y su hermosa amistad. A Delia y Karla por haber sido las mejores amigas que he tenido. A Alejandro por compartir juntos momentos únicos e inolvidables en mi vida y durante la carrera, gracias.

A mi Equipo de Trabajo.

Al Dr. Jesús Gracia por su apoyo, colaboración y su tiempo dedicados para hacer posible la realización de este trabajo. A la maestra Miriam, y todos mis compañeros del laboratorio que me brindaron su amistad y apoyo, Ricardo, Lalo, José, Caro, Xime, Esteban, Melisa, Federico.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la excelente educación académica que me ha brindado y así poder continuar satisfactoriamente con mi desarrollo profesional. Orgullosamente PUMA.

ÍNDICE

OBJETIVO	1
RESUMEN	2
PROBLEMÁTICA	3
HIPÓTESIS	4
CAPÍTULO 1. Antecedentes	5
1.1 Introducción	5
1.2 El agua en el mundo	6
1.3 Situación actual en México	6
1.4 Usos del agua en México	8
1.4.1 Uso agrícola	8
1.4.2 Uso para abastecimiento público	9
1.4.3 Uso en termoeléctricas	9
1.5 Contaminación de agua	10
1.5.1 Detergentes como contaminantes	11
1.6 Aguas residuales: Clasificación y reuso del agua en México	11
1.7 Estándares de calidad del agua	12
1.8 Referencias	13
CAPÍTULO 2. Fundamentos teóricos	14
2.1 Aguas residuales	14
2.2 Principios para el tratamiento de aguas residuales	14
2.2.1 Coagulación y Floculación de contaminantes del agua	17
2.2.2 Etapas de tratamiento de aguas residuales	18
2.3 Aguas grises	19
2.4 Características del agua gris	20
2.4.1 Cantidad de agua	20
2.4.2 Compuestos biodegradables	21
2.4.3 Patógenos	21

2.4.4	Nutrientes	22
2.4.5	Metales pesados y otros contaminantes tóxicos	22
2.5	Fuentes de agua gris en el hogar	23
2.6	Manejo de agua gris	23
2.7	Tensoactivos	24
2.8	Propiedades de los tensoactivos	25
2.9	Clasificación de tensoactivos	26
2.10	Detergencia	28
2.11	Jabones	28
2.12	Detergentes	30
2.13	Shampoos	35
2.14	Tensión superficial	35
2.15	Presión superficial	37
2.16	Termodinámica de superficies	37
2.16.1	Energía libre de Gibbs	38
2.16.2	Influencia de la temperatura	39
2.16.3	Influencia de la concentración de soluto	39
2.17	Adsorción	39
2.17.1	Adsorción de tensoactivos	41
2.17.2	Influencia de electrolitos	42
2.17.3	Influencia de la temperatura	42
2.18	Tipos de adsorción	43
2.19	Isoterma de adsorción sólido-líquido	44
2.20	Modo de operación. Sistemas discontinuos y de flujo continuo	45
2.21	Adsorbentes	47
2.21.1	Alúmina	48
2.21.2	Sílica gel	49
2.21.3	Carbón activado	50
2.21.4	Zeolitas	51
2.22	Génesis de las zeolitas	53
2.22.1	Estructura y clasificación	54

2.22.2 Zeolitas en México	56
2.23 Propiedades de las zeolitas	57
2.23.1 Porosidad	57
2.23.2 Intercambio iónico	58
2.24 Referencias	61
CAPÍTULO 3. Metodología experimental	65
3.1 Muestras de agua gris	65
3.2 Etapas experimentales	65
3.3 Reacción-adsorción con hidróxido de calcio	66
3.3.1 Experimental	66
3.4 Alternativas de tratamiento para la segunda etapa	67
3.5 Precipitación con dióxido de carbono	68
3.5.1 Experimental	68
3.6 Tratamiento con alumbre	70
3.6.1 Experimental	71
3.7 Tratamiento con clorhidróxido de aluminio	71
3.7.1 Experimental	72
3.8 Ablandamiento de agua con carbonato de sodio	73
3.8.1 Experimental	73
3.9 Ablandamiento de agua con tequesquite	74
3.9.1 Experimental	74
3.10 Intercambio iónico con zeolitas	75
3.10.1 Experimental	76
3.11 Referencias	78
CAPÍTULO 4. Resultados y Análisis	79
4.1 Caracterización fisicoquímica del agua gris	79
4.2 Reacción-adsorción con hidróxido de calcio	80
4.3 Precipitación con dióxido de carbono	82
4.4 Tratamiento con alumbre	86
4.5 Tratamiento con clorhidróxido de aluminio	87

4.6	Ablandamiento de agua con carbonato de sodio	89
4.7	Ablandamiento de agua con tequesquite	90
4.8	Intercambio iónico con zeolitas	91
4.9	Caracterización fisicoquímica del agua tratada	95
4.10	Caracterización biológica de las aguas grises y tratadas	97
4.11	Propuesta	98
4.12	Residuos	100
CAPÍTULO 5. Conclusiones		101
Apéndice A. Figuras complementarias al texto		103
A.1	Referencias	104
Apéndice B. Parámetros de caracterización		105
B.1	Introducción	105
B.2	Parámetros fisicoquímicos	106
B.2.1	Tensión superficial	106
B.2.2	Conductividad	107
B.2.3	Turbidez	108
B.2.4	pH	108
B.2.5	Dureza	109
B.3	Parámetros biológicos	112
B.3.1	Demanda química de oxígeno (DQO)	112
B.3.2	Huevos de helminto	114
B.4	Referencias	117
Apéndice C. Información de los materiales		118
C.1	Materiales	118
C.2	Costos	118
C.3	Información técnica de los materiales	119
C.4	Referencias	125

OBJETIVO

Proponer tecnologías que involucren procedimientos prácticos y económicos además de materiales accesibles en el mercado doméstico e industrial, para la recuperación de las aguas residuales grises domésticas y/o industriales generada en los procesos de detergencia principalmente en los de cuidado personal y de lavandería, mediante procesos fisicoquímicos.

RESUMEN

La urgencia de desarrollar medidas que permitan usar racionalmente el agua, así como la necesidad de implementar procesos prácticos y económicamente costeables, acordes a la realidad de un país en vías de desarrollo como México, fueron los dos ejes principales para esta investigación que se orienta en el tratamiento de aguas grises mediante procesos fisicoquímicos tales como, precipitación, adsorción, coagulación e intercambio iónico.

Las fuentes de agua gris consideradas para el tratamiento son las que provienen del aseo personal. Las aguas grises provenientes de la cocina y las que contienen contaminación fecal (aguas negras) fueron descartadas debido a su alto contenido de materia orgánica.

El tratamiento del agua gris se efectuó mediante dos etapas. La primera etapa consistió en la adición de hidróxido de calcio lo cual permite la eliminación de los tensoactivos iónicos y la adsorción de gran parte de los tensoactivos no iónicos, además de ayudar a eliminar las bacterias presentes en el agua gris debido al pH alcalino que alcanza la solución. Para mejorar la calidad del agua tratada es necesario eliminar el exceso de hidróxido de calcio en solución que influye en el pH y en la dureza del agua. Se desarrollaron procesos alternos como segunda etapa del tratamiento de las aguas grises. Para la disminución en la dureza el uso de carbonato de sodio, tequesquite y zeolitas. Para la estabilización del pH así como en la disminución en la dureza se consideró el uso de dióxido de carbono, alumbre y clorhidróxido de aluminio.

PROBLEMÁTICA

De acuerdo a las tendencias actuales de crecimiento poblacional, uso y manejo del agua, se estima que al año 2030, la situación del agua en México se tornará crítica¹. En un orbe de grandes dimensiones como lo es la Ciudad de México, el uso sustentable del agua es un tema de primera necesidad para asegurar que futuras generaciones dispongan de este recurso vital.

Con el fin de hacer frente a la disminución de la disponibilidad del agua en los próximos años, será necesario realizar acciones para reducir su demanda, a través del incremento en la eficiencia del uso del agua para el riego de cultivos y en los sistemas de distribución de agua en las ciudades. Además, deberán incrementarse significativamente los volúmenes de agua residual tratada y su reuso, con el fin de aumentar la disponibilidad de agua con calidad adecuada para los usos a los que se destina.

Por las razones mencionadas, los gobiernos y las dependencias internacionales promueven todas las medidas de conservación de agua. Una vertiente está encaminada al tratamiento de aguas residuales, en específico de las aguas grises debido a la menor concentración de contaminantes que este tipo de agua suele tener comparado con las aguas negras.

¹ Programa Nacional Hídrico 2007-2012. Junio 2008. CONAGUA.

HIPÓTESIS

Es posible la optimización del uso del agua mediante alternativas que involucren procesos económicos y funcionales que promuevan la recuperación y posterior reutilización de las aguas grises tratadas provenientes del hogar y/o de la industria.

1.1 Introducción

Estudios en todo el mundo han mostrado que independientemente de la riqueza o pobreza de un país, hay muchos argumentos a favor de la descentralización del manejo de los recursos naturales. Esto no es una afirmación dogmática, sino una afirmación basada en la observación de lo que funciona¹.

En la gaceta UNAM publicada el 3 de diciembre del 2009 se menciona que “La Universidad Nacional Autónoma de México a través del Consejo Universitario, instituyó el Programa de manejo, Uso y Reuso del Agua en la UNAM (PUMAGUA), el cual tiene como finalidad desarrollar las bases científicas y metodológicas para lograr el uso y manejo eficiente del agua en todos sus campus, conocer la calidad del agua suministrada y la calidad de las aguas residuales que se generan para determinar el tratamiento de las mismas, satisfacer las necesidades de la comunidad universitaria, con menos agua y con la calidad adecuada”.

El Dr. José Narro Robles, Rector de la Universidad Nacional Autónoma de México, hizo público el acuerdo por el que se establece el proyecto de la red del agua UNAM, el cual tiene por objetivos establecer un mecanismo para propiciar la participación interdisciplinaria de la comunidad universitaria en equipos multidisciplinarios para la generación y difusión del conocimiento, el desarrollo de capacidades y ejecución de proyectos que resuelvan los problemas que enfrenta el país en relación con el agua.

La urgencia de desarrollar medidas que permitan usar racionalmente el agua, así como la necesidad de implementar procesos prácticos y económicamente costeados, acordes a la realidad de un país en vías de desarrollo como México, fueron los dos ejes principales para esta

investigación que se orienta en el tratamiento de aguas grises mediante procesos fisicoquímicos tales como, precipitación, adsorción, coagulación e intercambio iónico.

1.2 El agua en el mundo

El agua es el compuesto químico más abundante de la biósfera, además de ser una de las sustancias más importantes del medio natural, es imprescindible para el sustento de vida en nuestro planeta. Según una de las estimaciones más aceptadas, poco más del 97% del volumen de agua existente en nuestro planeta es agua salada y está contenida en océanos y mares; mientras que apenas algo menos del 3% es agua dulce o de baja salinidad.

Del volumen total de agua dulce, estimado en unos 38 millones de kilómetros cúbicos, poco más del 75% está concentrado en casquetes polares, nieves eternas y glaciares; el 21% está almacenado en el subsuelo, y el 4% restante corresponde a los cuerpos y cursos de agua superficial (lagos y ríos)². Las Figuras 1.1 y 1.2 ubicadas en el apéndice A muestran la disponibilidad promedio de agua en diversos países así como las tarifas domésticas de agua potable, saneamiento e impuestos asociados al servicio en algunas ciudades del mundo.

1.3 Situación Actual en México

El Plan Nacional de Desarrollo 2007- 2012 del programa nacional hídrico de CONAGUA asume como premisa básica la búsqueda del desarrollo humano sustentable, es decir, que todos los mexicanos tengamos una

vida digna sin comprometer el patrimonio de las generaciones futuras. En este contexto, el adecuado manejo y preservación del agua cobra un papel fundamental, dada su importancia en el bienestar social, el desarrollo económico y la preservación de la riqueza ecológica de nuestro país.

Cuando se vincula al agua con el bienestar social, básicamente es referido al suministro de los servicios de agua potable y alcantarillado a la población, así como al tratamiento de las aguas residuales. Es importante que se tenga presente que dos terceras partes del territorio nacional son áridas o semiáridas, lo que obliga al uso eficiente del agua en todas las actividades, tanto en el riego como en la industria y en el hogar.

La situación anterior cobra especial relevancia si se considera que la población del país se ha cuadruplicado en los últimos 55 años, al pasar de 25 millones de habitantes en el año de 1950 a 103 millones en el año 2005. Es notable la concentración en las zonas urbanas, donde el número de habitantes se ha incrementado de 11 a 79 millones en el periodo antes referido.

A nivel país, el mayor crecimiento poblacional y económico se ha generado en las zonas con menor disponibilidad de agua; así, en el centro y norte, donde se tiene el 31% de la disponibilidad nacional se concentra el 77% de la población, situación que contrasta con la zona sureste, donde existe el 69% de la disponibilidad y únicamente se ubica el 23% de la población. La Figura 1.3 muestra la evolución de la disponibilidad del agua en México del año 1950 al 2006. La Figura 1.4 (Apéndice A) muestra las tarifas domésticas de agua potable, alcantarillado y/o saneamiento en algunas ciudades en el 2007.

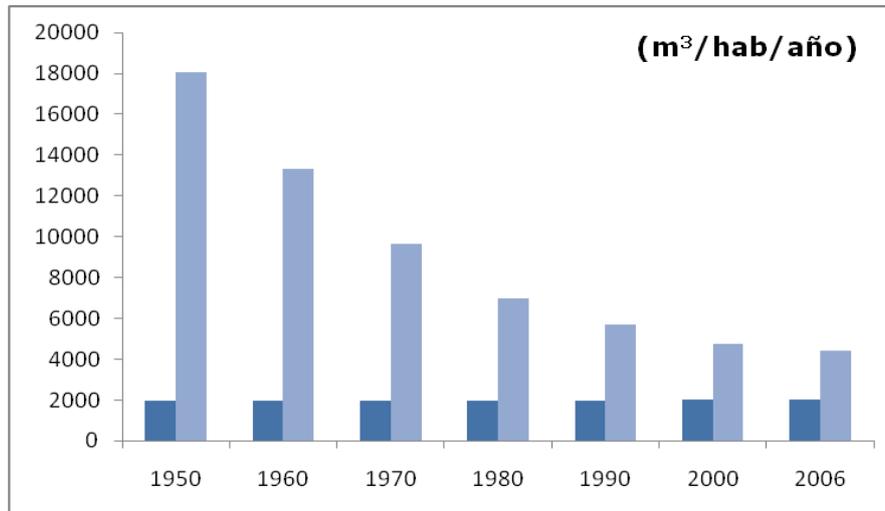


Figura 1.3 Evolución de la disponibilidad del agua en México³.

1.4 Usos del agua en México

1.4.1 Uso agrícola

El principal uso del agua en México es el agrícola, el cual se refiere principalmente al agua utilizada para el riego de cultivos. La superficie dedicada a las labores agrícolas en México varía entre los 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie cosechada de entre 18 a 22 millones de hectáreas por año⁴. Por otra parte, la población ocupada en este rubro oscila entre los 4 y 5 millones de personas y se estima que dependen directamente de la actividad entre 20 y 25 millones de mexicanos, en su mayoría población rural. México ocupa el sexto lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego con 6.46 millones de hectáreas.

1.4.2 Uso para abastecimiento público

El uso para abastecimiento público incluye la totalidad del agua entregada a través de las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios), así como a las diversas industrias y servicios conectados a dichas redes. De acuerdo con los Censos de Captación, Tratamiento y Suministro de Agua realizados por el INEGI a los organismos operadores del país, se determinó que en el 2003 el 82% del agua suministrada por las redes de agua potable fue para uso doméstico y el 18% restante para industrias y servicios. Por otro lado, comparando los datos de 1998 con los de 2003 de los Censos, se observa que en estos cinco años el volumen de agua empleada por los organismos operadores se incrementó en 22%. Otro dato relevante es que en el año 2003 el porcentaje de agua facturada respecto al total de agua empleada por los organismos operadores fue del 49%, lo que indica que el restante 51% del volumen se perdió en fugas, fue objeto de tomas clandestinas o bien correspondió a deficiencias en el padrón de usuarios.

1.4.3 Uso en termoeléctricas

El agua incluida en este rubro se refiere a la utilizada en centrales de vapor, duales, carboeléctricas, de ciclo combinado, de turbogás y de combustión interna. En el año 2007, las centrales termoeléctricas generaron 198.79 TWh, lo que representó el 87.0% del total de energía eléctrica producida en el país. En las plantas correspondientes existe una capacidad instalada de 38 799 MW, es decir el 77.8% del total del país. La Figura 1.5 muestra el consumo en los diferentes sectores del agua en México.

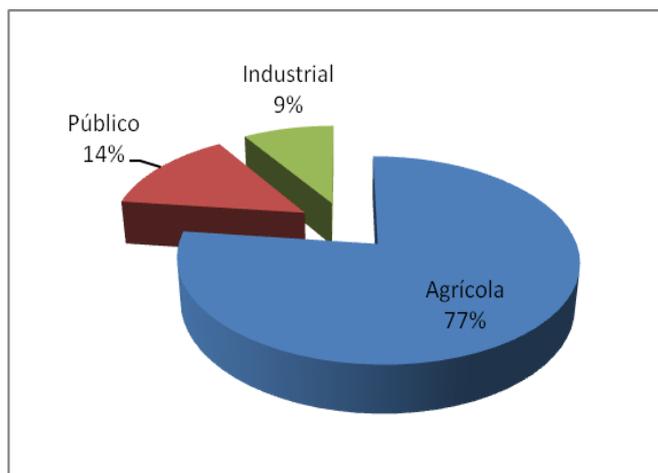


Figura 1.5 Sectores de consumo del agua en México³.

1.5 Contaminación del agua

El agua es primordial para la salud y la supervivencia de los seres vivos. Un aumento del nivel de vida entraña un mayor consumo de agua, de hecho, la relativa abundancia y seguridad del suministro hídrico en los países industrializados es, en gran medida, el factor que ha facilitado el desarrollo económico. Sin embargo, incluso en estos países hoy en día el agua no es un recurso abundante y disponible en cantidad y calidad suficiente para sus diversos usos.

Un contaminante se define como "toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural"⁵. El término contaminante es muy amplio y se refiere a una gama de compuestos que incluyen desde nutrientes, que dan lugar a un enriquecimiento del ecosistema, a compuestos tóxicos que pueden ser carcinógenos (causantes de cáncer), mutágenos (causan daño a los genes) o teratogénicos (causan anomalías a embriones en desarrollo).

1.5.1 Detergentes como contaminantes

Los detergentes entran en las aguas limpias y residuales principalmente por descarga de residuos acuosos del lavado doméstico e industrial de ropa y otras operaciones de limpieza. Un tensoactivo combina en una sola molécula un grupo hidrófobo con uno hidrófilo. Dichas moléculas tienden a congregarse en las interfases entre el medio acuoso y las otras fases del sistema, como aire, líquidos oleosos y partículas, impartiendo por tanto propiedades tales como formación de espuma, emulsificación y suspensión de partículas. En las aguas, la concentración de tensoactivos suele ser inferior a 0.1 mg/L excepto en las proximidades de una desembocadura u otra fuente de entrada puntual. Un alto contenido de detergentes en agua puede provocar formación de espuma, toxicidad para la vida acuática y crecimiento desmesurado de la flora acuática por el aporte de fosfatos⁶.

1.6 Aguas Residuales: Clasificación y reuso del agua en México

Las aguas residuales se definen como "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"⁷.

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las aguas residuales municipales corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado municipales urbanos y rurales, en tanto que las aguas residuales industriales son aquellas descargadas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida. De las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales se estima que

en el año 2007 en México se reutilizaron 4 722 millones de metros cúbicos de agua (equivalente a un caudal de 150 m³/s).

En el reuso de agua de origen municipal destaca la transferencia de aguas residuales colectadas en las redes de alcantarillado hacia cultivos agrícolas. En una menor proporción se reutilizan dichas aguas en las industrias, así como en las termoeléctricas. En el reuso de agua de origen industrial (no municipal) destacan las aguas residuales de los ingenios azucareros en el cultivo de caña en el estado de Veracruz.

1.7 Estándares de calidad del agua

Los requisitos para la calidad del agua se establecen de acuerdo con el uso al que se destina la misma. Por lo común su calidad se juzga como el grado en el cual el agua se ajusta a los estándares físicos, químicos y biológicos que fija el usuario. La calidad no es tan fácil de medir como la cantidad de agua en virtud de las múltiples pruebas que se necesitan para verificar que se alcanzan estos estándares. Es importante conocer los requisitos de calidad para cada uso a fin de determinar si se requiere un tratamiento del agua y, de ser así, qué procesos se deben aplicar para alcanzar la calidad deseada.

1.8 Referencias

- ¹ David B. Brooks. Pensar global pero actuar local: El caso del agua, Canadá. Recuperado el día 30 de noviembre 2009. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/dbrooks.pdf>
- ² CONAGUA. <http://www.cna.gob.mx>
- ³ Programa Nacional Hídrico 2007-2012. Junio 2008. CONAGUA.
- ⁴ Estadísticas del agua en México. Edición 2008. CONAGUA (pp. 7-15, 53-55, 86, 164).
- ⁵ Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente. Artículo 3o. 16 de Mayo de 2008.
- ⁶ NMX-AA-039-SCFI-2001. Secretaría de Economía. Análisis de aguas - Determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba.
- ⁷ Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehusen en servicios al público.
- ⁸ Henry, J. Glynn y Heinke, Gary W. Ingeniería Ambiental. 2ª ed. Ed. Pearson Educación. México 1999.
- ⁹ El agua en México. Recuperado el mes de Noviembre del 2009, de <http://www.fusda.org/revista11pdf/Revista11%20-5ELAGUAENMEXICO%20.pdf>

2.1 Aguas residuales

Las aguas residuales se definen como "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"¹.

En el hogar, existen dos tipos de agua residual, de las cuales cada una puede ser tratada y usada de varias maneras. El agua negra es agua que ha sido mezclada con desechos del excusado. El agua negra requiere tratamiento biológico o químico y desinfección antes de reusarla. El agua gris es agua residual proveniente del baño, lavadora y cocina que no ha sido mezclada con el agua residual del excusado.

2.2 Principios para el tratamiento de aguas residuales

La norma oficial mexicana en materia ambiental (NOM-003-SEMARNAT-1997), clasifica a los contaminantes contenidos en las aguas residuales como:

- **Contaminantes básicos:** Son aquellos compuestos o parámetros que pueden ser removidos o estabilizados mediante procesos convencionales. Dentro de esta clasificación se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, demanda bioquímica de oxígeno₅ y sólidos suspendidos totales.
- **Contaminantes patógenos y parasitarios:** Son los 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. Dentro de esta clasificación sólo se consideran los coliformes fecales medidos como NMP o UFC/100 mL (número más probable o unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros) y los huevos de helminto medidos como h/L (huevos por litro).

Además de estos contaminantes que son considerados dentro de la norma mexicana, es importante tomar en cuenta otras de las características de las aguas residuales para diseñar procesos de tratamiento óptimos. Los contaminantes encontrados en aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos orgánicos químicos inorgánicos y biológicos.

Procesos físicos. Los procesos físicos no transforman los contaminantes, simplemente los remueven del agua. Algunos de los procesos físicos incluyen cribado, sedimentación, flotación y filtración entre otros. El cribado se emplea para la reducción de sólidos en suspensión de tamaños distintos, la distancia o las aberturas de las rejillas dependen del objeto de las mismas. La sedimentación se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de las mismas; la eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran. La flotación es un proceso para separar sólidos de baja densidad o partículas líquidas (por ej.: aceites o petróleo) de una fase líquida, la separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas.

Procesos biológicos. La mayor parte de los componentes orgánicos de las aguas residuales sirven como alimento (sustrato) que proporciona energía para el crecimiento microbiano. Éste es el principio que se utiliza en el tratamiento biológico de los residuos, en donde ciertos organismos, principalmente bacterias (con la ayuda de protozoarios), transforman el sustrato orgánico en dióxido de carbono, agua y células nuevas. Los

microorganismos pueden ser aerobios (necesitan oxígeno libre), anaerobios (no requieren oxígeno libre) o facultativos (crecen con o sin oxígeno).

Procesos químicos. Muchos procesos químicos son de uso común para el tratamiento de aguas residuales industriales. El tratamiento químico solo o combinado con otros procesos, suele ser necesario para residuos que no son susceptibles de tratamiento por medios biológicos. Algunos de los procesos químicos incluyen desinfección, precipitación química, intercambio iónico, adsorción, ósmosis inversa y ultrafiltración entre otros.

La adsorción constituye uno de los procesos más utilizados dentro de los sistemas de tratamiento terciario de las aguas residuales, se emplea fundamentalmente para retener contaminantes de naturaleza orgánica presentes, en general, en concentraciones bajas, lo que dificulta su eliminación por otros procedimientos, además de la eliminación de compuestos fenólicos, hidrocarburos aromáticos nitrados, derivados clorados, sustancias coloreadas, así como otras que comunican olor y sabor a las aguas.

La ósmosis inversa está basada en la búsqueda fundamental del equilibrio. Si dos fluidos que contienen diferente concentración de sólidos disueltos son puestos en contacto, estos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Cuando estos dos fluidos están separados por una membrana semi-permeable (que deja pasar el fluido y no los sólidos disueltos), un fluido que contenga una menor concentración se moverá a través de la membrana hacia el fluido que contenga una mayor concentración de sólidos disueltos. Después de un tiempo el nivel de agua será mayor a uno de los lados de la membrana. La diferencia en altura se denomina presión osmótica. Aplicando en la columna del fluido una presión superior a la presión osmótica, obtendremos el efecto inverso. Los

fluidos son presionados de vuelta a través de la membrana, mientras que los sólidos disueltos permanecen en la columna.

La ultrafiltración es definida como un método de filtración de flujo transversal, similar a la ósmosis inversa pero con presiones más bajas, que utiliza una membrana para separar partículas coloidales pequeñas y moléculas grandes del agua y otros líquidos. Situada entre la ósmosis inversa y la microfiltración en lo que se refiere al tamaño de partículas que se eliminan, la ultrafiltración típicamente filtra partículas entre 0.002 a 0.1 micras (μm) y rechaza sustancias orgánicas de peso molecular mayor que 1,000 mientras que deja pasar iones y sustancias orgánicas menores².

2.2.1 Coagulación y Floculación de contaminantes del agua

El agua consta de tres tipos principales de impurezas: físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista físico se puede hablar que los sólidos totales que son impurezas del agua se pueden clasificar como partículas no filtrables o en suspensión, filtrables o disueltas y una tercera posibilidad es el caso intermedio que corresponde a los coloides. En general los coloides no tienen un límite fijo de tamaño y se suelen estudiar bajo un enfoque fisicoquímico desde el punto de vista de sus propiedades. Los coloides se pueden clasificar en liofílicos si se estabilizan con capas de hidratación o en liofóbicos si presentan repulsión por el solvente y por tanto son más inestables. Existen dos clases de coloides: orgánicos e inorgánicos. Según sea el tipo de aglomerado que conforman se clasifican en moleculares (polímeros) y en micelares.

La coagulación y floculación son dos procesos dentro de la etapa de clarificación en el tratamiento de aguas. La coagulación es el fenómeno de

desestabilización de las partículas coloidales, que puede conseguirse especialmente por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas. Se llama coagulante al producto utilizado para esta neutralización.

La agrupación de las partículas descargadas, al ponerse en contacto unas con otras, constituye la floculación, que da lugar a la formación de flóculos capaces de ser retenidos en una fase posterior del tratamiento del agua. Algunos productos pueden favorecer la formación del flóculo; a éstos se les llama floculantes. La separación sólido-líquido, del flóculo formado y del agua, puede hacerse por filtración, por decantación o flotación, seguidas o no de filtración.

En el tratamiento de aguas residuales urbanas, con frecuencia es tal la concentración de materia en suspensión que puede conseguirse una floculación mediante simple agitación. Con el fin de favorecer la eliminación de la contaminación coloidal, puede introducirse un coagulante.

Las aguas residuales industriales presentan composiciones variables, según la industria considerada. En algunos casos, el agua contiene un constituyente capaz de flocular por simple agitación o que lo hace mediante la adición de un floculante, otras veces es necesario utilizar un coagulante que de origen a un precipitado que pueda flocularse a continuación.

2.2.2 Etapas de tratamiento de aguas residuales

Las etapas de tratamiento de las aguas residuales consisten en pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario. Los pretratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos de

diferentes tamaños o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una neutralización u homogeneización. Los tipos fundamentales de tratamientos primarios son: el cribado, la sedimentación, la flotación y neutralización y homogeneización. El tratamiento secundario se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios, uno de los procesos llevados a cabo en esta etapa es el de lodos activados. El tratamiento terciario es la serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario convencional. Algunos de los tipos de tratamiento terciario son: separación de sólidos en suspensión, adsorción, intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis, oxidación química y desinfección entre otros.

2.3 Aguas grises

El agua gris es el agua residual proveniente de la regadera, lavabos, lavadora y lavaplatos. La Figura 2.1 muestra esquemáticamente las fuentes de agua gris que se encuentran en el hogar. Las aguas grises pueden contener bacterias, virus y químicos que ponen en riesgo la salud y el ambiente si se le da un mal manejo; el agua gris tiene que ser manejada cuidadosamente para evitar inundaciones, olores, y la incontrolada liberación de químicos y elementos antropogénicos incluyendo microorganismos dentro del ambiente.

En áreas rurales el manejo del agua gris es pocas veces un gran problema, pues los volúmenes de agua gris son pequeños y su contenido de nocividad ambiental o sustancias infecciosas es bajo. El agua gris se puede introducir dentro del suelo o reusarla. En áreas urbanas la situación es diferente. El consumo de agua y el uso de químicos en el hogar cada

vez van incrementando. Más gente y casas por volumen limitan el espacio para cuidar el agua gris y ahí incrementa el riesgo de los problemas ambientales y el contacto humano con las condiciones de no saneamiento del agua. Por consiguiente en la ciudad se necesita, el diseño cuidadoso y mantenimiento de sistemas técnicos para la recolección, tratamiento y descarga de aguas grises.

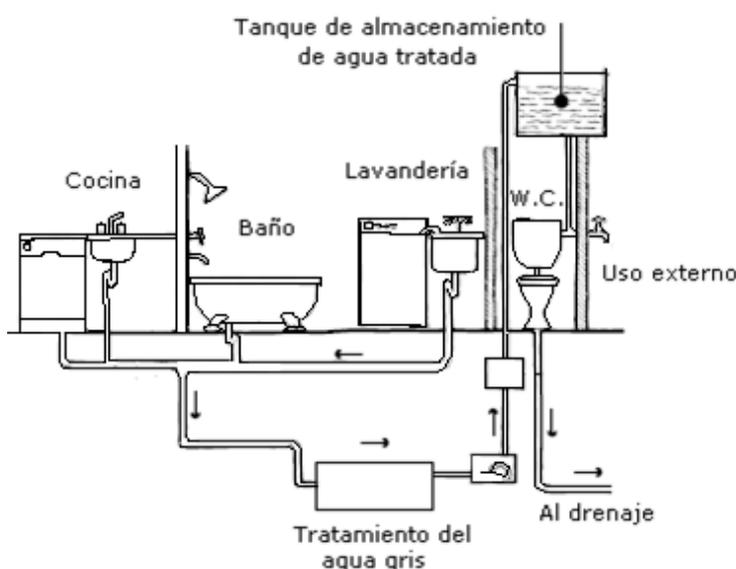


Figura 2.1 Fuentes de agua gris en el hogar³.

2.4 Características del agua gris

2.4.1 Cantidad de agua

La cantidad de agua residual producida en el hogar puede variar por mucho. Las aguas grises, provenientes de la regadera, lavadora y lavabo, constituyen entre el 50 y 80% del volumen total de aguas residuales que se producen en el hogar⁴. Un uso eficiente del agua es esencial donde los recursos hídricos son escasos, pero también da más opciones para las soluciones rentables, de volumen y del ahorro de espacio para el tratamiento de aguas grises. El consumo de agua puede ser reducido con

la introducción de dispositivos de ahorro de agua y un sistema de pago basado en la cantidad de agua consumida. El desarrollo de las ciudades industrializadas en Europa, tales como Alemania, Noruega y Suecia, muestran que esto es posible sin poner en peligro el suministro o comodidad de los residentes.

2.4.2 Compuestos biodegradables

La composición del agua gris varía mucho, pues refleja el estilo de vida de los residentes y su elección por el uso de químicos en el hogar para lavar los platos, lavandería, etc. Una de las características del agua gris es que tienen a menudo altas concentraciones de material orgánico fácilmente degradable como grasa, aceite y otras sustancias empleadas en la cocina, así como jabón y tensoactivos de los detergentes.

2.4.3 Patógenos

El contenido de patógenos en el agua gris es bajo. El riesgo de infección está relacionado con su contaminación fecal. Como una fuente separada, el agua gris no contiene heces fecales por lo que es a menudo considerada como inofensiva. Todavía, muchas autoridades públicas alrededor del mundo consideran al agua gris como nociva para la salud. Una explicación para esto es que puede haber números elevados en indicadores de bacterias en agua gris. Recientes investigaciones han demostrado que las enterobacterias de coliformes tienden a crecer en el agua gris porque contiene compuestos orgánicos fácilmente degradables. El uso de las bacterias coliformes como indicadores bacterianos tiende por lo tanto a sobreestimar la carga fecal y el riesgo potencial encontrados en el agua gris. El hecho de que el agua gris se vuelva fácilmente anaerobio y cree

malos olores puede contribuir a la creencia de que es un peligro para la salud.

2.4.4 Nutrientes

Las aguas grises normalmente contienen bajos niveles de nutrientes comparado con las aguas residuales ordinarias de los sistemas de agua natural. Los niveles de nitrógeno y otros nutrientes de plantas son siempre bajos pero en algunas aguas grises se han encontrado altas concentraciones de fósforo. Este fósforo viene de los detergentes, el cual es utilizado para ablandar el agua. Los detergentes libres de fosfatos están disponibles ya en el mercado.

2.4.5 Metales pesados y otros contaminantes tóxicos

El contenido de metales pesados y contaminantes orgánicos en las aguas grises es bajo generalmente, pero puede incrementarse como resultado de la adición de sustancias nocivas al ambiente. Los metales en el agua gris se originan de la misma agua, de la corrosión del sistema del tanque de almacenamiento y del polvo, cubiertos (cuchillos), de los tintes y de los productos químicos utilizados en el hogar.

Muchos de los contaminantes orgánicos del agua residual están en la fracción de agua gris, por consiguiente los niveles están en el mismo intervalo de concentración como en el agua residual mezclada del hogar. Los contaminantes orgánicos están presentes en muchos de nuestros productos químicos ordinarios del hogar, por ejemplo, shampoos, perfumes, preservativos, tintes y limpiadores.

2.5 Fuentes de agua gris en el hogar

La selección de las fuentes de agua gris a escoger para su reuso depende de un balance entre la disponibilidad de agua y la cantidad de contaminantes que el proceso de tratamiento elegido puede depurar. A pequeña escala, esta consideración excluye las aguas residuales provenientes de la cocina y lavaplatos por la considerable carga orgánica que estas aguas contienen. En la Tabla 1 se describen algunas características del agua provenientes de las diferentes fuentes de agua gris dentro del hogar.

Tabla 1. Características de agua gris de diversas fuentes dentro del hogar⁵.

Fuente	Características
Lavadora de ropa	Bacterias, lejía, espuma, pH alcalino, agua caliente, nitratos, aceite y grasa, DBO alta, fosfatos, jabón, detergente, sólidos suspendidos, turbidez, mal olor.
Regadera y bañera	Bacterias, cabello, agua caliente, mal olor, aceites y grasas, DBO alto, jabón, sólidos suspendidos, turbidez.
Tarjas y lavabos	Bacterias, partículas de comida, agua caliente, mal olor, aceite y grasa, materia orgánica, DBO alta, jabón, sólidos suspendidos, turbidez.

2.6 Manejo de agua gris

La elección de los sistemas de manejo de aguas grises depende de muchos factores tales como el clima, sistemas de drenaje, grado de contaminación, la sensibilidad del recipiente entre otros. Los requerimientos para el tratamiento y otras precauciones son determinados por cómo se contempla el agua gris en el lugar desde un punto de vista de salud ambiental y pública. La mejor solución debe por lo tanto adaptarse a las condiciones locales y considerar lo que se arriesga al emplear las

diversas técnicas. Es recomendable estudiar y comparar las diferentes alternativas cuando se planea o se actualiza un sistema. Se recomienda que las soluciones, nuevas en el área o innovadoras, siempre deban ser probadas y evaluadas a pequeña escala antes de implementarlas a gran escala.

Los usos más comunes que se le puede dar a las aguas grises tratadas son como fuente de agua para sanitarios y mingitorios. Esto permite reducir la demanda doméstica de agua considerablemente. Más allá de esta aplicación, se ha considerado utilizar los efluentes tratados de aguas grises en la irrigación de de jardines y parques, campos de golf, uso para lavado de pisos, autos, entre otros.

2.7 Tensoactivos

Los tensoactivos o agentes con actividad superficial son generalmente compuestos orgánicos anfifílicos; contienen grupos hidrofóbicos (sus colas) y hidrofílicos (sus cabezas). Por lo tanto, son solubles tanto en solventes orgánicos como en agua. Los tensoactivos juegan un papel importante en muchas aplicaciones prácticas y productos, incluyendo: detergentes, emulsificantes, pinturas, tintas, adhesivos, dispersantes, agentes espumantes, jabones, shampoo, etc.

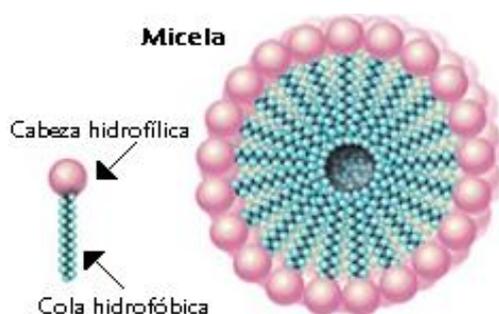


Figura 2.2 Representación de los grupos hidrofóbicos e hidrofílicos en una micela⁶.

2.8 Propiedades de los tensoactivos

Las propiedades y comportamiento de los tensoactivos se deben al carácter dual de sus moléculas (grupo hidrófilo y lipófilo), es así como la diferencia entre estas dos partes de la molécula da al compuesto sus propiedades de agente con actividad superficial.

Muchos tensoactivos pueden agregarse en el bulto de la solución formando agregados (ejemplos: vesículas y micelas). La concentración a la cual los tensoactivos tienden a formar la micela es conocida como concentración micelar crítica o CMC. Cuando las micelas se forman en agua, sus colas forman un centro que puede encapsular una gota de aceite y sus cabezas (polares) forman una cubierta externa que mantiene un contacto favorable con el agua. Las soluciones tensoactivas pueden contener una fase ordenada (micelas) y una fase desordenada (moléculas tensoactivas libres y/o iones en solución). Cuando los tensoactivos se reúnen en compuestos orgánicos, los grupos se invierten (micelas invertidas). En una micela invertida, las cabezas están en el centro y las colas mantienen un contacto favorable con el compuesto orgánico. Los tensoactivos se clasifican en cuatro grupos: aniónicos, catiónicos, no-iónicos y anfóteros.

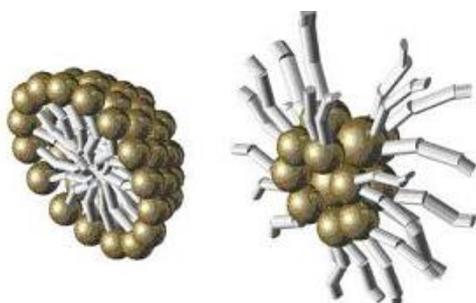
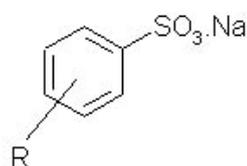


Figura 2.3 Representación de micela y micela invertida⁷.

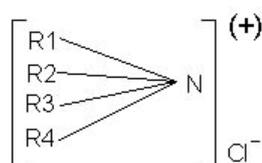
2.9 Clasificación de Tensoactivos

La clasificación se fundamenta en el poder de disociación del tensoactivo en presencia de un solvente y de sus propiedades fisicoquímicas. Pueden ser: iónicos o no-iónicos. Dentro de los iónicos según la carga que posea la parte que presenta la actividad de superficie serán: aniónicos, catiónicos y anfóteros.

- **Tensoactivos Aniónicos.** En solución se ionizan, se caracterizan por tener en su molécula cationes orgánicos o inorgánicos y una porción hidrofílica que contiene los grupos aniónicos unidos a la parte orgánica. Están constituidos por una cadena alquílica lineal o ramificada que va de 10 a 14 átomos de carbono, y en un extremo polar en el que se encuentra el anión. Representantes de este grupo son el dodecil sulfato de sodio o dodecil bencen sulfonato de sodio:

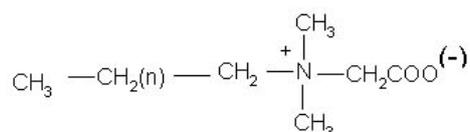


- **Tensoactivos Catiónicos.** Son aquellos que en solución forman iones, se caracterizan por estar constituidos de una parte hidrocarbonada unida a un átomo que le proporciona carga positiva a la molécula; el grupo hidrófobo se carga positivamente. La mayoría de los agentes catiónicos están constituidos por una cadena larga de sales de amonio cuaternarios o sales de alquilaminas. Fórmula:



La cadena larga constituye el grupo hidrofóbico, en tanto que el hidrofílico pequeño y altamente ionizado, lo constituye el nitrógeno tetravalente en forma de sales de amonio cuaternario. Estos tensoactivos son de menor interés que los agentes aniónicos y no-iónicos pero reside su importancia por su eficiencia bactericida, germicida, algicida etc. Como representante de este grupo se encuentra el bromuro de cetil amonio.

- Los Tensoactivos Anfóteros ó anfotéricos. Como su nombre lo indica, actúan dependiendo del medio en que se encuentren, en medio básico son aniónicos y en medio ácido son catiónicos. Fórmula del alquil dimetil betaína:



Los *tensoactivos no-iónicos* se solubilizan mediante un efecto combinado de un cierto número de grupos solubilizantes débiles (hidrófilos) tales como enlace tipo éter ó grupos hidroxilos en su molécula. Tienen la ventaja de que son estables con la mayoría de los productos químicos en las concentraciones usuales de empleo. Al no ionizarse en agua, no forman sales con los iones metálicos y son igualmente efectivos en aguas blandas y duras. Su naturaleza química los hace compatible con otros tensoactivos aniónicos, catiónicos y coloides cargados positiva y negativamente. Como representantes están los alcoholes grasos o alquilfenoles a los que se les agregan una o varias moléculas de óxido de etileno, ejemplo de ellos el nonil fenol etoxilado o el nonanol etoxilado.

Los tensoactivos no-iónicos se emplean como materia prima para la formulación de diversos productos industriales como: agricultura, látex, textiles, petróleo, pulpa y papel, pinturas en emulsión, entre otros.

2.10 Detergencia

La detergencia es la remoción de un material no deseado de un sustrato sumergido en cierto medio, generalmente con el uso de una fuerza mecánica y en presencia de una sustancia química que puede reducir la adherencia del material no deseado al sustrato. Se termina el proceso cuando el material indeseado se mantiene en suspensión sin adherirse de nueva cuenta. Este proceso se ve afectado principalmente por la concentración del tensoactivo y la dureza del agua. Otros factores son la naturaleza del sustrato que se va a someter al proceso de lavado y el material a retirar.

Por otro lado, juegan un papel importante las condiciones físicas del medio de lavado como: la temperatura, tiempo de proceso, naturaleza mecánica del proceso y las condiciones de enjuague. Todo esto se conoce como sistema detergencia. La gran variedad de combinaciones entre tantos factores hacen que los sistemas detergencia sean complejos. Esto hace que un proceso de lavado eficiente se vea precedido por un estudio de las condiciones óptimas del sistema detergencia en cuestión.

2.11 Jabones

Los jabones han sido usados como detergentes por muchos siglos, normalmente consisten en sales de sodio o potasio de cadenas largas de ácidos grasos y son producidos mediante la saponificación de aceites de

gricerilo y de grasas (como sebo) con hidróxido de sodio o de potasio, dando glicerol como subproducto. Los jabones de potasio tienden a ser más blandos y más solubles en agua que los jabones que contienen sodio. Los jabones de los ácidos grasos insaturados son más blandos que de los ácidos grasos saturados.

El jabón es un excelente detergente pero tiene dos inconvenientes: a) no funciona muy bien en soluciones con valores de pH bajos por la formación de ácidos grasos insolubles, y b) forma precipitados insolubles o sales insolubles con los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} en agua dura. Los aditivos tales como carbonato de sodio, fosfatos, etc., ayudan a contrarrestar estos efectos. En las últimas décadas el jabón ha sido sustituido en parte por el uso de detergentes sintéticos, los cuales no sufren hasta cierto punto estas desventajas. Los alquil sulfatos, alquil aril sulfonatos y los derivados no iónicos de oxido de polietileno son quizá los más importantes. Hasta ahora, el alquil aril sulfonato de sodio $(\text{CH}_3)_2\text{CH}[\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)]_3\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3^-\text{Na}^+$ ha sido el más usado aunque por su no-biodegradabilidad, ha sido reemplazado en varias ciudades.

Los jabones actúan como limpiadores debido a que los dos extremos de una de sus moléculas son muy diferentes. El extremo carboxilato aniónico de la molécula de cadena larga es iónico y por consiguiente hidrofílico. Como resultado, trata de disolverse en el agua. Sin embargo, la larga porción hidrocarbonada de la molécula es no polar y es atraída por la grasa. El efecto neto de estas dos tendencias opuestas es que los jabones son atraídos tanto por la grasa como por el agua y, por consiguiente, son limpiadores valiosos.

Cuando los jabones se dispersan en agua, las colas de las largas cadenas hidrocarbonadas se unen y agrupan en el interior de una esfera hidrofóbica, mientras que las cabezas iónicas sobre la superficie de la

esfera se adhieren a la capa de agua. Estos agrupamientos esféricos, llamados micelas se muestran esquemáticamente en la Figura 2.4. Las gotitas de grasa y aceite se solubilizan en agua cuando son rodeadas por las colas que no son polares de las moléculas de jabón en el centro de las micelas.

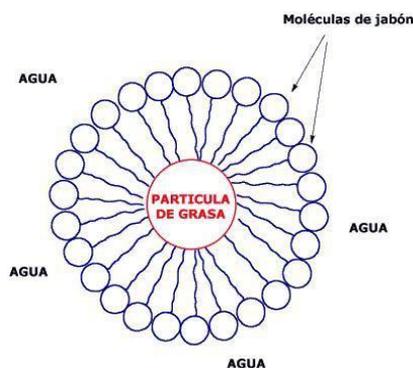


Figura 2.4 Una micela de jabón está solubilizando una partícula de grasa en agua⁸.

2.12 Detergentes

El uso más importante de los agentes tensoactivos es su empleo como detergentes o materiales de limpieza. Es preciso distinguir entre el uso de los detergentes formando parte de un proceso de fabricación y para las demás aplicaciones, incluyendo su empleo en el hogar. El uso principal de los detergentes en el segundo caso es la limpieza de los vestidos, platos, pisos, etc. Los detergentes que se destinen a este uso deben ser, productos apropiados para todos los servicios; tanto la suciedad, como la naturaleza de las superficies sucias.

El sustrato sólido a ser limpiado puede ser una superficie dura (tal como lentes, metal, plásticos, cerámica), o fibras (tal como algodón, lana, fibras sintéticas), o una parte del cuerpo (piel, cabello, dientes). La suciedad puede ser líquida o sólida (usualmente es una combinación de ambas);

tiene muchos posibles orígenes (tales como piel, comida, atmósfera); esta puede ser polar o no polar; de pequeño o grande tamaño de partícula; químicamente reactiva o inerte hacia el sustrato y/o el detergente. En vista de la amplia variedad de posibles sistemas de sustrato-suciedad, la amplitud a la cual una teoría general del mecanismo del detergente pueda ser desarrollada es limitada.

En los procesos de fabricación, se usan los detergentes para separar una sustancia determinada, ordinariamente de naturaleza grasa, de un tipo específico de superficie. Por tanto, para esta aplicación, es posible seleccionar el detergente sobre la base de su aptitud para conseguir el mejor rendimiento. Por esta razón los detergentes no jabonosos, han alcanzado una gran importancia en el uso industrial que en el doméstico.

La acción limpiadora de los detergentes se debe principalmente a que incluyen uno o más ingredientes activos que complementan su función, como silicatos, fosfatos, carbonatos, estabilizadores, colorantes, fragancias, e incluso jugo de limón. Los compuestos fosfatados (polifosfatos) retienen las sales de calcio y de magnesio del agua dura, ablandándola y facilitando la limpieza. Los fosfatos se han venido utilizando en las formulaciones de detergentes desde los años 30. Su papel es complejar los cationes responsables de la dureza del agua (Ca^{+2} y Mg^{+2}) formando con ellos complejos solubles. Esto evita que se formen sales insolubles en el agua y permite que los tensoactivos trabajen eficazmente. El fosfato más utilizado para ello es el tripolifosfato sódico $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$. Uno de los sustituyentes de los fosfatos en los detergentes fue el NTA $\text{N}(\text{CH}_2\text{CO}_2)_3^{-3}$. Sin embargo se ha demostrado que este compuesto es cancerígeno y por eso no se utiliza en la actualidad.

El uso de fosfatos en estos productos ha suscitado polémica, pero tanto los detractores como los defensores de los fosfatos admiten que la

descarga de éstos en el agua produce el efecto de eutrofización, que consiste en que ciertas especies de algas proliferan al punto de captar el oxígeno del agua e impedir otras formas de vida. El fenómeno afecta a ríos, mares y lagos, razón por la cual los fabricantes han desarrollado nuevas fórmulas para obtener detergentes con menos fosfatos.

El descubrimiento de las zeolitas como eficaces intercambiadores iónicos hace de estos compuestos buenos sustitutos de los fosfatos. Sin embargo las zeolitas tienen también inconvenientes tales como: su coste mucho mayor que los fosfatos y son materiales sólidos insolubles. Se utilizan en suspensión y se necesita de otros compuestos que faciliten la dispersión de las zeolitas para controlar el pH y para prevenir la redeposición de la suciedad.

El carbonato y el sulfato de sodio en los detergentes, tienen una acción alcalina, es decir, ayudan a neutralizar la suciedad, que la mayoría de las veces es de tipo ácido (frutas, vinagre, etcétera). El carbonato también contribuye al ablandamiento del agua, aunque resulta menos efectivo que los fosfatos.

La adición de silicatos a los detergentes sintéticos ha demostrado ser muy benéfica. Los silicatos ablandan el agua mediante la formación de precipitados que son fácilmente removidos. Éstos no tienden a depositarse en las superficies dado que tienen grandes propiedades anti-depositantes. Todos los silicatos tienen excelentes propiedades como amortiguadores del pH en contra de sustancias ácidas, esto es muy importante ya que un gran número de sólidos indeseados en los procesos de detergencia son ácidos. Los silicatos pueden inhibir la corrosión del acero y el aluminio.

Actualmente, debido a la creciente preocupación por evitar la contaminación, un aspecto fundamental en la fabricación de detergentes

es que los agentes limpiadores que contengan sean biodegradables; que los microorganismos del ambiente puedan convertirlos en moléculas más pequeñas.

Otros ingredientes de los detergentes:

- Agentes de control de espuma. Los agentes controladores de espuma aseguran la cantidad correcta de la espumación obtenida. Un refuerzo y estabilizador de espuma (por ejemplo mono o dietanolamida de coco) puede ser utilizado para proporcionar mucha espuma en los líquidos lavatrastes, productos para lavar las manos y detergentes usados para enjuague. La espuma es estéticamente importante para el ama de casa, con más espuma conlleva a una mejor calidad. La omisión de espuma es necesaria en detergentes usados en máquinas automáticas para asegurar una limpieza apropiada y prevenir daños al aparato.
- Blanqueadores. Los blanqueadores son utilizados para remover manchas oxidables. Los dos blanqueadores comúnmente usados son percarbonato de sodio y perborato de sodio. El percarbonato contiene más oxígeno disponible (esto es, poder blanqueador) sobre un equivalente en peso base que el perborato pero el último es más estable, menos sucio y más compatible con las enzimas. El percarbonato es menos estable, se descompone más rápidamente en almacenamiento perdiendo su poder blanqueador. Ambos, el percarbonato y perborato proporcionan alcalinidad al detergente. Si hay agua presente ambos blanqueadores se descomponen rápidamente.
- Alcohol. El etanol e isopropanol son usados generalmente en productos líquidos, especialmente en aquellos que contienen altos

niveles de tensoactivo por lo cual actúan como solventes. Los alcoholes también ayudan en la remoción de suciedad de aceite o grasa y disminuyen el punto de congelación del líquido, de este modo proveen una buena estabilidad bajo condiciones de frío. Además actúan como conservantes impidiendo el crecimiento de microorganismos.

- Agentes blanqueadores fluorescentes. Los también conocidos blanqueadores ópticos, aumentan el grado de blancura a la superficie de la tela ya que transforman la luz ultravioleta de longitud de onda corta invisible, en luz de longitud de onda larga (fluorescencia), realzando el brillo y blancura del material. Pueden ser usados en formulaciones de líquido y polvos.
- Agentes anti-redeposición. Estos ayudan evitando la remoción de partículas sucias que se redepositan sobre la superficie limpia. La carboxi metil celulosa y sus derivados son generalmente usados.
- Inhibidores de corrosión. Estos son añadidos para proteger partes de la máquina lavadora de los efectos corrosivos del agua y soluciones de limpieza. Éstos generalmente actúan formando una gruesa película protectora sobre las superficies metálicas. El silicato de sodio es usado generalmente en este contexto.
- Enzimas. La adición de enzimas como proteasas es conveniente ya que rompe las cadenas proteicas de las manchas de sangre, en este caso, el agua debe de calentarse a 40°C para que actúen las enzimas y después reacciona el tensoactivo.
- Estéticos. Los estéticos incluyen color, perfume, etc., y son añadidos para realzar lo llamativo del producto al cliente.

2.13 Shampoos

Los shampoos están compuestos por dos tipos de sustancias: base limpiadora y extracto activo. La primera es una mezcla muy suave de tensoactivos seleccionados; productos sintéticos con poder limpiador que se combinan con agua, acondicionadores, suavizantes, colorantes y perfume. En cuanto a los extractos, son tratados con conservadores para que se mantengan en buen estado, e incluyen, entre otros ingredientes, plantas, flores, esencias naturales y sustancias químicas que han demostrado su efectividad en pro de la salud capilar en exámenes de laboratorio.

El elemento principal de la composición de los shampoos es el tensoactivo. Por ser agentes limpiadores, su concentración debe ser suficientemente elevada para limpiar en profundidad el cabello. Representan del 15 al 25% de la formulación.

2.14 Tensión Superficial (σ)

A nivel microscópico, la tensión superficial se debe a las fuerzas que afectan a cada molécula son diferentes en el interior del líquido y en la superficie. Así, en el seno de un líquido cada molécula está sometida a fuerzas de atracción que en promedio se anulan. Esto permite que la molécula tenga una energía bastante baja. Sin embargo, en la superficie hay una fuerza neta hacia el interior del líquido. Si en el exterior del líquido se tiene un gas, existirá una mínima fuerza atractiva hacia el exterior, aunque en la realidad esta fuerza es despreciable debido a la gran diferencia de densidades entre el líquido y el gas. Es por esto, que se genera una membrana que está sometida a tensión en la capa exterior del líquido. La Figura 2.5 describe esquemáticamente la tensión superficial.

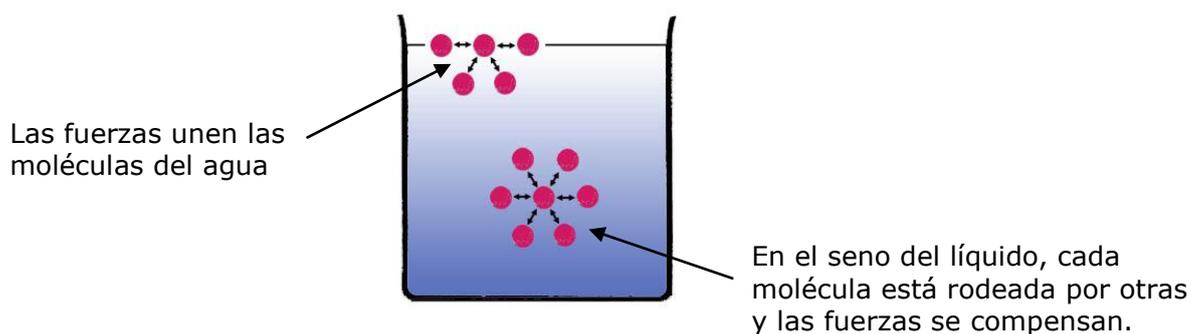


Figura 2.5 Tensión superficial⁹.

Otra manera de verlo, es que las moléculas situadas en la superficie tiene una mayor energía promedio que las situadas en el interior, por lo tanto la tendencia del sistema será a disminuir la energía total, y ello se logra disminuyendo el número de moléculas situadas en la superficie, de ahí la reducción de área hasta el mínimo posible.

Las unidades habituales, para la tensión superficial pueden ser ergios por centímetro cuadrado (ergios/cm^2) o dinas por centímetro (dinas/cm); los cuales son dimensionalmente idénticos. Las unidades correspondientes al Sistema Internacional son Joules por metro cuadrado (J/m^2) o Newtons por metro (N/m), las tensiones superficiales reportadas en dinas/cm y mN/m tienen el mismo valor numérico.

El método óptimo para la medición de la tensión superficial depende de la naturaleza del líquido medido, las condiciones bajo las cuales su tensión debe ser medida, y la estabilidad de su superficie cuando es deformada. Para un líquido dado, el valor de σ disminuye con la temperatura, debido al aumento de la agitación térmica, lo que redundo en una menor intensidad de las fuerzas intermoleculares. El valor de σ tiende a cero conforme la temperatura se aproxima a la temperatura crítica T_c del compuesto. En este punto, el líquido es indistinguible del vapor, formándose una fase continua donde no existe una superficie definida entre ambos.

2.15 Presión superficial

Este parámetro se define como la diferencia entre la tensión superficial del solvente puro y la tensión superficial de una solución a cualquier composición. Para un sistema binario se puede escribir como:

$$\pi = \sigma^{\circ}_1 - \sigma$$

Donde π es la presión de superficie, σ°_1 es la tensión superficial del solvente puro y σ la tensión superficial de la mezcla soluto – solvente a cualquier composición. La presión de superficie es una energía relativa y característica para cada sistema ya que sin efectos de cambios de temperatura mide únicamente el decremento energético de la superficie con respecto al solvente puro. Para el caso particular en el que la fracción del soluto en la solución es prácticamente uno, se tiene la diferencia máxima de tensiones superficiales y, por lo tanto, la presión máxima de superficie (π°) denotada por la siguiente ecuación:

$$\pi^{\circ} = \sigma^{\circ}_1 - \sigma^{\circ}_2$$

2.16 Termodinámica de superficies

El trabajo mecánico necesario para aumentar la superficie se puede expresar como:

$$dW = \sigma \cdot dA$$

Donde W es el trabajo invertido en crear el área de superficie A y σ es la energía por unidad de área o tensión superficial.

2.16.1 Energía libre de Gibbs

Cuando se efectúa trabajo para modificar el área de una superficie, se puede relacionar este trabajo con una de las funciones de estado termodinámicas. En el caso de un cambio reversible en el área de la superficie, que ocurre a temperatura y presión constantes, se tiene que:

$$dW = dG = \sigma \cdot dA$$

La energía libre de Gibbs es definida por la ecuación:

$$G = H - TS$$

Donde H es la entalpía definida como $U+PV$ y S es la entropía, sustituyendo:

$$G = U + PV - TS$$

En el caso de un sistema líquido cuya área superficial está variando, se debe incluir el cambio en la energía de Gibbs debido a la variación del área de la superficie. Diferenciando la ecuación que describe la energía libre de Gibbs y sustituyendo la expresión para dU, se tiene:

$$dG = -SdT + VdP + \sigma dA$$

La termodinámica requiere que todos los cambios de estado espontáneos sean acompañados por una disminución de la energía libre de Gibbs. De esto es fácil entender porque la disminución del área de superficie de una masa de líquido es siempre espontánea ($\Delta G < 0$), con tal que no se asocie con cualquier otro cambio de energía. Se deduce que para aumentar el área de superficie se necesita adicionar una cantidad determinada de energía.

2.16.2 Influencia de la temperatura

La tensión superficial es dependiente de la temperatura. Para un valor dado de tensión superficial de una interfase, la temperatura debe ser indicada explícitamente. La tendencia general es que la tensión superficial disminuye con el aumento de temperatura, alcanzando un valor de cero a la temperatura crítica.

2.16.3 Influencia de la concentración de soluto

Los solutos pueden tener diferentes efectos sobre la tensión superficial dependiendo de su estructura:

- Mínimo o sin efecto, por ejemplo el azúcar.
- Incrementan la tensión superficial: sales inorgánicas y ácidos.
- Disminuyen progresivamente la tensión superficial, los alcoholes.
- Disminuyen la tensión superficial y una vez alcanzado el mínimo no hay más efecto: los tensoactivos.

2.17 Adsorción

El proceso de adsorción fue observado primeramente para gases en el año de 1773 por C. W. Scheele¹⁰ y luego para soluciones por Lowitz¹⁰ en 1785; actualmente se reconoce como un fenómeno importante para la mayor parte de los procesos físicos naturales, biológicos y químicos. La adsorción sobre sólidos, ha llegado a utilizarse ampliamente para la purificación de aguas y aguas residuales.

La adsorción implica la acumulación en la interfase o la concentración de sustancias en una superficie o interfase. El proceso puede ocurrir en una interfase que separa a dos fases, tales como líquido-líquido, gas-líquido, gas-sólido o líquido-sólido. El material que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama *adsorbato* y la fase adsorbente se llama *adsorbente*. La adsorción es un medio para neutralizar o satisfacer las fuerzas de atracción que existen en una superficie o una interfase, y que se deben a la discontinuidad en la naturaleza de la estructura. En consecuencia la adsorción produce una disminución de la energía libre interfacial (o tensión si se trata de una interfase fluido/fluido).

Para la adsorción de tensoactivos a partir de una solución en una interfase sólido/líquido o líquido/líquido existen varios tipos de mecanismos, susceptibles de producir la adsorción:

- Intercambio iónico; el reemplazo de iones adsorbidos en el sustrato por otros iones. Es el caso por ejemplo de adsorción de amonios cuaternarios en sustitución de iones hidrógeno en el proceso de protección contra la corrosión.
- Emparejamiento iónico; la adsorción de iones (tensoactivos) en sitios cargados no ocupados. Es el caso de la adsorción de tensoactivos catiónicos o anfóteros sobre sustratos cargados negativamente, en el proceso de suavización de ropa o en la eliminación de electricidad estática del cabello.
- Puente hidrógeno; el proceso clásico de enlace polar entre el hidrógeno de una molécula y un átomo cargado negativamente (O, S) en la superficie, o viceversa.

- Adsorción por polarización de electrones π , lo cual ocurre cuando se produce una atracción entre un núcleo aromático y un sitio positivo en la superficie del sustrato.
- Adsorción por fuerzas de London-Van der Waals, las cuales se producen entre sustratos y moléculas no polares.
- Adsorción por rechazo hidrofóbico, cuando el empaquetamiento de moléculas de tensoactivo en la interfase asegura un enlace lateral entre la cola lipofílica de una molécula y las moléculas vecinas, y permite a la molécula escapar al ambiente acuoso.

2.17.1 Adsorción de tensoactivos

La adsorción de tensoactivos es un proceso de transferencia de moléculas tensoactivas del bulto de la solución a la superficie/interfase. La adsorción de tensoactivos en la interfase sólido-líquido juega un papel importante en muchas aplicaciones tecnológicas e industriales, tales como detergencia, flotación mineral, inhibición de corrosión, dispersión de sólidos, recuperación de aceite, etc.

Una de las características del tensoactivo es su tendencia a adsorber en la superficie/interfase en una forma orientada. El fenómeno de adsorción de tensoactivos ha sido estudiada para determinar: (1) Una medida de la cobertura de la superficie/interfase por el tensoactivo. Por ejemplo espumación/despumación y emulsificación. (2) La orientación de las moléculas tensoactivas en la superficie/interfase, la cual alternadamente determina como va a ser afectada la misma por la adsorción; si será más hidrofílica o hidrofóbica. Estas propiedades proporcionan información sobre el tipo y el mecanismo de cualquier interacción que implica a las

moléculas tensoactivas en la superficie/interfase y su eficiencia como agente tensoactivo. El comportamiento de los tensoactivos en la interfase está determinado por el número de fuerzas, incluyendo atracción electrostática, enlace covalente, enlace por puente de hidrógeno, enlace hidrofóbico y disolución de varias especies.

Un gran número de estudios han sido conducidos en la adsorción de tensoactivos aniónicos y catiónicos en la interfase sólido-líquido. Las superficies sólidas son positiva o negativamente cargadas en el medio acuoso por ionización/disociación o por la adsorción de iones de la solución sobre una superficie previamente descargada.

2.17.2 Influencia de electrolitos

El efecto de los electrolitos sobre la adsorción de tensoactivos en la interfase sólido-líquido ha sido estudiado y muestra que la presencia de electrolitos resalta la adsorción del tensoactivo aniónico sobre una superficie sólida cargada negativamente.

Un incremento en la fuerza iónica del bulto causa interés de la atracción Coulombica entre el grupo principal y la superficie, llevando a una disminución en la adsorción.

2.17.3 Influencia de la temperatura

Se ha observado que un incremento en la temperatura lleva a una disminución considerable en la cantidad máxima de adsorción de los tensoactivos iónicos. Cuanto más baja es la temperatura, está más arriba el máximo adsorbido. La disminución en el máximo adsorbido en una

temperatura más alta se espera como un incremento en la energía cinética de las especies. Por lo tanto, hay un incremento en la entropía del sistema que da lugar a una disminución de la organización agregada de la superficie del adsorbente.

2.18 Tipos de adsorción

La adsorción que tiene lugar debido a las fuerzas de van der Waals se llama generalmente adsorción *física*, término que se ha aplicado en los casos en que la molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, sino más bien está libre de trasladarse dentro de la interfase. La adsorción de este tipo se llama algunas veces adsorción *ideal*. Si el adsorbato sufre una interacción química con el adsorbente, el fenómeno se llama adsorción *química*, o *quimisorción*. Se considera que las partículas *adsorbidas químicamente* no están libres para el movimiento en la superficie o dentro de la interfase.

La adsorción física, en general predomina a temperatura baja y se caracteriza por una energía de adsorción relativamente baja; el adsorbato no está adherido tan fuertemente al adsorbente como en la adsorción química. Los procesos de adsorción química exhiben elevadas energías de adsorción, debido a que el adsorbato forma enlaces fuertes localizados en los centros activos del adsorbente. La interacción química entre el adsorbente y el adsorbato viene favorecida por una temperatura más elevada, debido a que las reacciones químicas proceden más rápidamente a temperaturas elevadas que más bajas.

2.19 Isotherma de adsorción sólido-líquido

Se llama isoterma de adsorción a la relación entre la concentración de sustancia adsorbida y aquella en el seno de la fase fluida a temperatura constante. Pueden ocurrir varios tipos de relaciones isotérmicas de adsorción. La relación más común entre la concentración de sustancia adsorbida y la concentración del seno de la fase fluida se obtiene para los sistemas en que la adsorción desde la solución da lugar a la deposición de una capa simple aparente de moléculas de soluto sobre la superficie del sólido. Ocasionalmente, pueden formarse capas multimoleculares de soluto. Entonces, para una descripción rigurosa del proceso se debe recurrir a modelos de adsorción más complejo.

Muchos datos de adsorción de tensoactivos sobre sustratos sólidos poseen una isoterma de tipo Langmuir¹⁰. Los tensoactivos son moléculas particulares para las cuales los siguientes efectos deben tenerse en cuenta:

- En un sistema líquido –sólido, al llegar a la concentración micelar crítica, la concentración del tensoactivo en forma de moléculas no agregadas permanece prácticamente constante. En consecuencia se llegará a una saturación aparente a la cmc, si esta no ha ocurrido a concentración inferior. La isoterma toma entonces una forma de S o de escalón.
- La carga superficial puede aumentar o disminuir la adsorción según la carga del tensoactivo iónico. La adsorción de catiónicos sobre superficies negativas procede como un escalón.
- Es posible que en ciertos casos se produzca una adsorción de multicapas.

La Figura 2.6 muestra varios tipos de isothermas, representando la concentración adsorbida en función de la concentración en fase líquida al equilibrio.

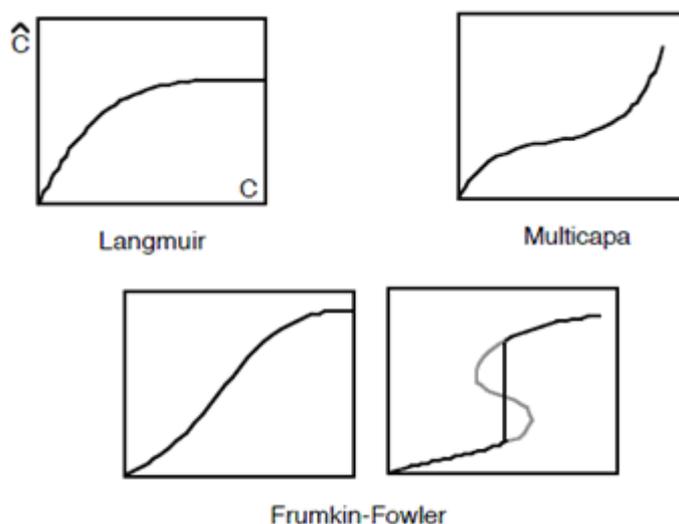


Figura 2.6 Diferentes tipos de isoterma, Concentración adsorbida vs. Concentración de la fase líquida¹¹.

La isoterma de adsorción comúnmente se obtiene determinando el agotamiento del tensoactivo debido a la adsorción. De la saturación de la densidad de adsorción en la interfase sólido-solución ($\Gamma_{\text{máx,sólido}}$) y eso sobre la interfase aire-solución ($\Gamma_{\text{máx, aire}}$), se puede obtener un estimado del número de capas, en el sólido: $n_1 = \Gamma_{\text{máx,sólido}}/\Gamma_{\text{máx, aire}}$.

2.20 Modo de operación. Sistemas discontinuos y de flujo continuo.

Se ha encontrado que la rapidez del proceso de adsorción en soluciones para adsorbentes granulares depende del tamaño de la partícula del adsorbente. En el sistema discontinuo una cantidad del adsorbente se mezcla continuamente con un volumen específico de agua o agua residual

hasta que la concentración del contaminante en la disolución ha alcanzado un nivel deseado. Si utilizamos un adsorbente finamente dividido, suele ser difícil separarlo del agua para efectuar la regeneración. Al contrario, cuando utilizamos partículas de adsorbente de tamaño mayor, las cuales pueden separarse más fácilmente cuando están agotadas, se requieren de periodos de contacto más largos entre la disolución y el adsorbente.

El método de flujo continuo del tipo columna tiene ventajas distintivas sobre los métodos discontinuos puesto que las velocidades de adsorción dependen de la concentración del soluto en la solución que deba tratarse. En el método de columna el adsorbente está continuamente en contacto con una solución fresca. Por tanto la concentración de la solución en contacto con una capa del adsorbente de la columna es relativamente constante. En el tratamiento discontinuo, la concentración del soluto en contacto con una cantidad determinada de adsorbente decrece de continuo a medida que la adsorción progresa.

El sistema de contacto por lecho expandido permite usar partículas de tamaño pequeño prescindiendo de los problemas asociados con pérdidas de carga, bolsas de aire, y ensuciamiento comunes a las columnas de relleno de medio filtrante fino. En el método de lecho expandido, el agua o el agua residual fluye en sentido ascendente a través de una columna de adsorbente fino con una velocidad suficiente como para suspender las partículas sólidas.

En el método de flujo continuo, el adsorbente sólido se añade a la cabeza de la columna y el adsorbente gastado se retira por el fondo. La disolución de alimentación fluye en sentido ascendente desde las regiones parcialmente agotadas a las regiones de material fresco añadido. Con este método de trabajo, se produce una estratificación natural dando lugar a un mayor rendimiento; las partículas individuales porosas de este material

son más densas a medida que aumenta la adsorción y por tanto tienden a concentrarse cerca del fondo de la columna. Esta tendencia también facilita el poder sacar el adsorbente agotado para la regeneración. Las técnicas convencionales de adsorción por lecho fijo se usan mucho en el tratamiento de agua y residual.

2.21 Adsorbentes

El sólido poroso en un proceso dado en la adsorción es una variable crítica. El éxito o falla del proceso depende de cómo se desarrolla el con respecto a su cinética. Un sólido con buena capacidad de adsorción pero de lenta cinética no es una buena opción, pues tarda mucho tiempo para que las moléculas del adsorbato alcancen el interior de la partícula. Esto significa un gran tiempo de residencia del gas en una columna, por lo tanto un rendimiento del proceso bajo. Por otro lado, un sólido con cinética rápida pero baja capacidad de adsorción tampoco es bueno pues se requeriría de una gran cantidad de sólido para un mayor rendimiento. Así, un buen sólido es aquel que provee una buena capacidad adsorbente así como buena cinética. Para cumplir estos dos requisitos, se deben satisfacer los siguientes aspectos:

- a) El sólido debe tener un área razonablemente alta de superficie o volumen de microporo.
- b) El sólido debe tener una red de poro relativamente grande para el transporte de las moléculas al interior.

Para satisfacer el primer requerimiento, el sólido poroso debe tener un tamaño pequeño de poro con una porosidad razonable. Esto sugiere que un buen sólido deba tener una combinación de dos rangos de poro: el microporo y el macroporo. La clasificación del tamaño de poro según lo

recomendado por la IUPAC (The International Union of Pure and Applied Chemistry) es usado frecuentemente para definir el rango o el tamaño de poro.

Microporos $d < 2 \text{ nm}$

Mesoporos $2 < d < 50 \text{ nm}$

Macroporos $d > 50 \text{ nm}$

Esta clasificación es arbitraria y fue desarrollada basada en la adsorción del nitrógeno a su punto de ebullición normal sobre una amplia gama de sólidos porosos. La mayoría de los sólidos usados comúnmente en industrias satisfacen estos dos criterios, con sólidos tales como carbón activado, zeolitas, alúmina y sílica gel. Las industrias utilizando estos sólidos se diversifican, con industrias tales como química, petroquímica, bioquímica, biológica e industrias biomédicas.

2.21.1 Alúmina

La alúmina como adsorbente es normalmente usada en industrias que requieren la remoción de agua de la corriente de gas. Esto es debido a la alta densidad del grupo funcional en la superficie y son esos grupos funcionales los que proporcionan los sitios activos para la adsorción de moléculas polares (tal como agua). Existe una variedad de alúmina disponible, el sólido más utilizado es σ -alúmina. Las características de σ -alúmina están dadas en la tabla siguiente:

Tabla 2. Características típicas de σ -alúmina¹²

Densidad real	2.9 – 3.3 g/cc
Densidad de partícula	0.65 – 1.0 g/cc
Porosidad total	0.7 – 0.77
Porosidad de macroporo	0.15 – 0.35
Porosidad de microporo	0.4 – 0.5

Volumen de macroporo	0.4 – 0.55 cc/g
Volumen de microporo	0.5 – 0.6 cc/g
Área superficial específica	200 – 300 m ² /g

Según lo visto en la tabla anterior, la σ -alúmina tiene una buena área de superficie para el proceso de adsorción y un buen volumen de macroporo y tamaño de poro medio para la rápida transportación de las moléculas del medio al interior.

2.21.2 Sílica gel

La sílica gel se hace a partir de la coagulación de una solución coloidal del ácido silícico. El término gel refleja simplemente las condiciones del material durante el paso de la preparación, más no la naturaleza del producto final. La sílica gel es una sustancia vidriosa dura y es blanca lechosa en color. Este adsorbente es utilizado en muchas industrias para remoción de agua debido a su gran capacidad hidrofílica de la superficie de la sílica gel hacia el agua.

Algunas de las aplicaciones de la sílica gel son:

- Remoción de agua del aire
- Secado de gases reactivos y no reactivos
- Adsorción del sulfuro de hidrógeno
- Adsorción del vapor de aceite
- Adsorción de alcoholes

La siguiente tabla muestra las características típicas de la sílica gel. Dependiendo de las condiciones de preparación, la sílica gel puede tener

un intervalo de área de superficie que se extiende cerca de 200m²/g hasta 900m²/g.

Tabla 3. Características típicas de la sílica gel¹².

Densidad de partícula	0.7 – 1.0 g/cc
Porosidad total	0.5 – 0.65
Volumen de poro	0.45 – 1.0 g/cc
Área superficial específica	250 – 900 m ² /g
Intervalo de radio de poro	1 a 12 nm

2.21.3 Carbón activado

Entre los sólidos prácticos más usados en la industria, el carbón activado es uno de los sólidos más complejos pero él más versátil debido a su extremadamente alta área de superficie y volumen de microporo. La estructura del carbón activado es compleja y esta básicamente compuesta por una estructura amorfa y una estructura microcristalina tipo grafito. De las dos, la estructura de grafito es importante desde el punto de vista de la capacidad, pues proporciona "espacio" en forma de canal por las grietas formadas para acomodar las moléculas. Debido a las grietas formadas el tamaño de microporo para el carbón activado está reportado como el microporo de media anchura, algo como el radio en el caso de la alúmina o sílica gel. El arreglo de los átomos de carbón en la estructura de grafito es parecido a la del grafito puro.

El acoplamiento entre las unidades de grafito es posible con fuertes enlaces cruzados. El inter espacio entre esas unidades de grafito formarán una red de poro y su tamaño esta generalmente en el rango de mesoporo y macroporo. Las características típicas del carbón activado se enlistan a continuación.

Tabla 4. Características típicas del carbón activado¹².

Densidad real	2.2 g/cc
Densidad de partícula	0.73 g/cc
Porosidad total	0.71
Porosidad de macroporo	0.31
Porosidad de microporo	0.40
Volumen de macroporo	0.47 cc/g
Volumen de microporo	0.44 cc/g
Área superficial específica	1200 m ² /g
Radio de macroporo medio	800 nm
Mitad ancha de microporo medio	1 – 2 nm

La naturaleza química de la superficie del carbón activado es más compleja que la de la red del poro. Esta propiedad depende de muchos factores por ejemplo: la fuente del carbón así como la forma en la que se activa el carbón. El carbón activado esta hecho de materias primas que son generalmente ricas en oxígeno y por lo tanto muchos de los grupos funcionales del carbón activado tienen un átomo de oxígeno.

El carbón activado comercial tiene un amplio rango de propiedades dependiendo de la aplicación. Si la aplicación es para la separación de la fase gas, entonces las características antes mencionadas en la Tabla 4 son las típicas.

2.21.4 Zeolitas

Otra clase importante de sólido utilizado tan extensamente como el carbón activado es la zeolita. La zeolita puede encontrarse de manera natural o sintética. Las aplicaciones de la zeolita natural no es tan extensa como las de la zeolita sintética debido a que ésta última tiene más especificaciones. Existen muchos tipos de zeolita sintética por ejemplo las

de tipo A, X, Y, modernita, ZSM, etc. Las características típicas de la zeolita tipo A se enlistan en la tabla siguiente.

Tabla 5. Características típicas de la zeolita 5A¹².

Densidad del cristal*	1.57 g/cc
Densidad de partícula	1.1 g/cc
Porosidad de macroporo	0.31
Volumen de macroporo	0.28 g/cc
Volumen de microporo	0.3 g/cc
Área superficial exterior	1 – 20 m ² /g
Radio medio de macroporo	30 – 1000 nm
Radio medio de microporo	0.5 nm

* masa/volumen del cristal

La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada a la gran superficie interna que esta posee.

Zeolitas. El término zeolita viene del griego *zéo* y *líthos* que quiere decir *pedra que hierve* o *pedra efervescente*. En 1756, con el descubrimiento de la estilbita por el mineralogista sueco Barón Alex Frederick Consted¹³, las zeolitas fueron reconocidas por la primera vez. Las zeolitas son aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalino-terrosos predominantemente de sodio y calcio. Las zeolitas naturales presentan como características relevantes, una estructura microporosa que le confiere propiedades adsorbentes y una gran capacidad de intercambio catiónico debido a un desequilibrio de cargas que es función de la relación Si y Al.

Las zeolitas naturales tienen una estructura muy parecida y todas muestran casi las mismas propiedades físicas y químicas, aunque hay diferencias importantes entre cada tipo de zeolita. Hay unos cincuenta tipos de zeolita natural y más de cien tipos de zeolita sintética, cada uno

tiene un ratio Si:Al:O ligeramente diferente y por lo tanto un tamaño de poro y capacidad de intercambio iónico diferente.

Los cationes intercambiables más comunes son sodio, potasio, calcio y magnesio pero se puede encontrar varios otros elementos en varias concentraciones en función de donde y como ha sido formado la zeolita en cuestión. Esta mezcla de cationes es distinta para cada yacimiento de zeolita natural y es una característica muy importante de cada zeolita. La combinación de su estructura rígida, su porosidad alta y su capacidad de intercambio iónico natural lleva a las zeolitas su amplia gama de usos potenciales. Tiene muchas posibles, algunos dicen que un granulo de zeolita sea "la depuradora más pequeño del mundo"¹⁴.

2.22 Génesis de las zeolitas

Las zeolitas naturales son formadas a partir de la precipitación de fluidos contenidos en los poros, tal como en las ocurrencias hidro-termales, o por la alteración de vidrios volcánicos. Las condiciones de presión, temperatura, actividad de las especies iónicas y presión parcial de agua son factores determinantes en la formación de las diferentes especies de zeolitas.

Existen cerca de 50 especies de zeolitas naturales conocidas, sin embargo tan solo algunas especies son ampliamente utilizadas. Dentro de esas se incluyen: mordenita, clinoptilolita, heulandita, phillipsita, eroinita y chabazita. La mayoría de las ocurrencias de zeolita puede ser encontrada en uno de los seis ambientes geológicos: salino o lagos alcalinos, suelos alcalinos, diagenético, sistema abierto, hidrotermal y sedimentos marinos.

2.22.1 Estructura y clasificación

Las zeolitas son estructuradas en redes cristalinas tridimensionales, compuestas de tetraedros del tipo TO_4 ($T = Si, Al, B, Ge, Fe, P, Co \dots$) unidos en los vértices por un átomo de oxígeno. En la Figura 2.7 se presentan las principales unidades estructurales de las zeolitas usando la siguiente simbología: A) Tetraedro con un átomo de Si (círculo lleno) en el centro y átomos de oxígeno en los vértices, B) Tetraedro con átomo de Al sustituyendo el Si y unido a un catión monovalente para compensar la diferencia de carga entre el Si y el Al, y C) Átomo Palente para balancear las cargas entre el Al y el Si en una cadena múltiple de tetraedros.

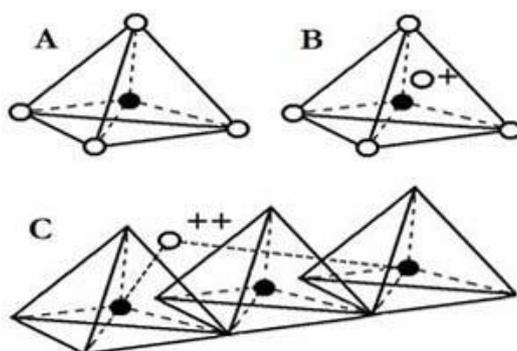
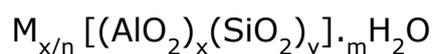


Figura 2.7 Unidades estructurales básicas de las zeolitas¹⁵.

La estructura presenta canales y cavidades de dimensiones moleculares en las cuales se encuentran los cationes de compensación, moléculas de agua u otros adsorbatos y sales. Este tipo de estructura microscópica hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande, entre 500 y 1000 m²/g, con relación a su superficie externa. Sin embargo esta superficie es poco accesible para los contaminantes de tipo macromolecular.

Los tetraedros $[AlO_4]^{5-}$ inducen cargas negativas en la estructura, las cuales se neutralizan por cationes de compensación intercambiables.

Estos cationes junto con las moléculas de agua, se encuentran ocupando el espacio intracrystalino de estos aluminosilicatos. La fórmula química por celda unitaria puede escribirse como:



Donde M es un catión de valencia n [(Na, K, Li) y/o (Ca, Mg, Ba, Sr)], m es el número de moléculas de agua y la suma de x e y, indica el número de tetraedros de aluminio y silicio por celda unitaria.

La microporosidad de estos sólidos es abierta y la estructura permite la transferencia de materia entre el espacio intracrystalino y el medio que lo rodea. Esta transferencia está limitada por el diámetro de los poros de la zeolita, ya que sólo podrán ingresar o salir del espacio intracrystalino aquellas moléculas cuyas dimensiones sean inferiores a un cierto valor, el cual varía de una zeolita a otra. La Tabla 6 muestra los principales tipos de zeolitas naturales y su volumen de poro. En la Tabla 7 se muestran algunas propiedades importantes de las zeolitas.

Tabla 6. Principales tipos de zeolitas naturales y su volumen de poro¹⁴.

Zeolitas	Fórmula Química	Volumen de poro*
Laumontita	Ca Al ₂ Si ₄ O ₁₂ ·4H ₂ O	0.35
Clinoptilolita	(Na,K,Ca) ₂₋₃ Al ₃ (Al,Si) ₂ Si ₁₃ O ₃₆ ·12 H ₂ O	0.34
Estilbita	Na Ca ₂ Al ₅ Si ₁₃ O ₃₆ ·14H ₂ O	0.38
Filipsita	(K,Na,Ca) ₁₋₂ (Si,Al) ₈ ·O ₁₆ ·6H ₂ O	0.30
Erionita	(K ₂ ,Ca,Na ₂) ₂ Al ₄ Si ₁₄ O ₃₆ ·15H ₂ O	0.36
Faujzita	(Na ₂ Ca)Al ₂ Si ₄ O ₁₂ ·8H ₂ O	0.53
Chabazita	Ca Al ₂ Si ₄ O ₁₂ ·6H ₂ O	0.48
Natrolita	Na ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ ·2H ₂ O	0.21
Thomsonita	Na Ca ₂ Al ₅ Si ₅ O ₂₀ ·6H ₂ O	0.32

Mordenita	$(Ca,Na_2,K_2)Al_2Si_{10}O_{24} \cdot 7H_2O$	0.26
Epistilbita	$CaAl_2Si_6O_{16} \cdot 5H_2O$	0.34
Analcima	$Na,AlSi_2O_6 \cdot H_2O$	0.18
Heulandita	$(Na,Ca)_{2-3}Al_3(Al,Si)_2Si_{13}O_{36} \cdot 12H_2O$	0.35

*cm³ de agua/cm³ de cristal

Tabla 7. Características generales de las zeolitas¹⁶.

Propiedad	Valor
Diámetro de poro	2 a 12 Å
Diámetro de cavidades	6 A 12 Å
Superficie interna	500-1000 m ² /g
Capacidad de intercambio catiónico	0 a 650 meq/100g
Capacidad de adsorción	<0.35 cm ³ /g
Estabilidad térmica	Desde 200°C hasta más de 1000°C

2.22.2 Zeolitas en México

La historia de las zeolitas en México inicia en el año de 1973 cuando F. F. Mumpton, publica en la revista American Mineralogist, el artículo "First Reported Occurrence of Zeolites in Sedimentary Rocks of Mexico". En este artículo, se reporta el primer yacimiento de zeolitas, al noroeste de la ciudad de Oaxaca, en el poblado de Etlá; lo forman principalmente las zeolitas Modernita y Clinoptilolita.

Aunque el estudio de estos minerales inicia hace muchos años, sólo tiene unos cuantos que se estudian en la República Mexicana y hasta ahora se plantea la necesidad de encontrar nuevos yacimientos, sintetizarlas, entender sus propiedades o ampliar su utilización. Gracias al enorme interés que representa la aplicación de las zeolitas naturales en países con alto desarrollo tecnológico industrial, se inician esfuerzos que se enfocan a

su estudio, principalmente en el estado de Sonora. La Tabla 8 muestra la diversidad de zeolitas en estados mexicanos.

Tabla 8. Diversidad de Zeolitas en Estados Mexicanos¹⁷.

Zeolita	Estados donde se encuentran
Analcima	Baja California Norte, Hidalgo, Jalisco.
Clinoptilolita	Chihuahua, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Sonora, Tlaxcala, Veracruz.
Chabasita	Baja California Norte, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Oaxaca.
Escolcita	Baja California Norte, Jalisco, San Luis Potosí.
Estilbita	Baja California Norte, Chihuahua, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Estado de México, San Luis Potosí, Sonora, Zacatecas.
Erionita	Sonora.
Heulandita	Baja California Sur, Guerrero, Jalisco, Oaxaca.
Modernita	Chihuahua, Guanajuato, Michoacán, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Sonora.

2.23 Propiedades de las zeolitas

2.23.1 Porosidad

Las zeolitas son formadas por canales y cavidades regulares y uniformes de dimensiones moleculares (3 a 13 nm) que son medidas similares a los diámetros cinéticos de una gran cantidad de moléculas. Este tipo de estructura microporosa hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande en relación a su superficie externa.

Cuando la distancia entre dos superficies es suficientemente corta, los potenciales de adsorción se suman, de forma que una molécula situada en

el interior del poro se ve atraída por toda la superficie del poro aumentando la fuerza con la que se ve atraída. Es decir, a medida que disminuye el tamaño del poro más profundo se hace el pozo de potencial. En el caso de que el poro sea suficientemente ancho las moléculas se irán adsorbiendo formando una monocapa a una distancia determinada de la superficie (distancia de adsorción), y a medida que aumenta la cantidad adsorbida el adsorbato se ordena en capas sucesivas.

2.23.2 Intercambio iónico (I.I)

La propiedad de intercambio iónico (I.I.) se ha observado en minerales silicatos cristalinos como arcillas, feldspatos y zeolitas. Se considera una propiedad intrínseca de estos minerales pues es el producto de la sustitución isomórfica de los átomos de silicio de su estructura cristalina por otros átomos. En el caso de las zeolitas esta sustitución ocurre por átomos tetravalentes de aluminio lo que produce una carga neta negativa en la estructura que se compensa por cationes fuera de ella. Estos cationes son intercambiables, de ahí la propiedad intrínseca de intercambio iónico que también es una manifestación de su naturaleza de estructura cristalina microporosa, pues las dimensiones de sus cavidades y de los cationes que se intercambian determinan el curso del proceso.

El comportamiento de I.I. en las zeolitas depende de varios factores que determinan una mayor selectividad en las zeolitas a determinados cationes:

- Naturaleza de los cationes en solución
- Temperatura
- Concentración de los cationes en solución
- Aniones asociados con los cationes en solución

- Solvente – agua, solvente orgánico
- Estructura de la zeolita – topología de la red y densidad de la carga de red

La capacidad de intercambio iónico de una zeolita es una magnitud que da una medida del monto de equivalentes de un catión que es capaz de retener por intercambio iónico una masa de zeolita. Esta capacidad está directamente relacionada con el Al presente en la red zeolítica y depende directamente de su composición química. Una alta capacidad de intercambio iónico corresponde a zeolitas con baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. La capacidad de intercambio iónico teórica máxima, número de equivalentes intercambiables por masa de la celda unitaria, no siempre puede ser alcanzada debido a la existencia de sitios de intercambio inaccesibles.

El equilibrio de intercambio binario se describe mediante isothermas de intercambio, las cuales se construyen al graficar la concentración en el equilibrio del ion que se intercambia y que se encuentra en solución como una función de la concentración en el equilibrio de este mismo ion en la zeolita, para una temperatura constante y a una determinada concentración del ion en solución. Para elaborar una isoterma comúnmente se grafica la fracción equivalente del ion de intercambio en solución como una función de la fracción equivalente del mismo en la zeolita. Las fracciones equivalentes de cationes que se intercambian en la solución y en el sólido, A_s y A_z se definen de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$A_s = \frac{xAm_sA}{xAm_sA + xBm_sB}$$

$$A_z = \frac{\text{equiv } A}{\text{equiv } \text{totales}}$$

En donde: m es la molalidad de los iones A y B de la solución en el equilibrio, $equiv$ se refiere al número de equivalentes intercambiados del ion A en la zeolita con respecto a los equivalentes totales que posee dicha zeolita. El parámetro α_{AB} indica la preferencia que tiene la zeolita por el catión que originalmente está en ella (por ejemplo el sodio para el caso de una zeolita sódica) y se expresa como:

$$\alpha_{AB} = ([A_z][B_s]/[B_z][A_s])$$

Este factor puede variar con la temperatura y la concentración. Tratándose de un intercambio iónico ideal la gráfica de A_z vs. A_s es una línea recta diagonal, sin embargo a menudo se presentan comportamientos como los de la Figura 2.8, en donde cada uno de ellos implica lo siguiente:

- a) Si el factor de separación $\alpha_{AB} > 1$, la zeolita tiene preferencia por el catión que está originalmente en solución.
- b) La selectividad varía con el grado de intercambio resultando una isoterma de tipo sigmoideal.
- c) Si el factor de separación $\alpha_{AB} < 1$, la zeolita no tiene preferencia por el catión que está originalmente en solución.
- d) La zeolita no ha alcanzado un intercambio completo por efecto de tamizado de los iones.
- e) Este comportamiento es poco común, debido a que durante el proceso de intercambio iónico se forman dos fases de zeolita produciéndose un efecto de histéresis.
- f) La línea punteada representa el comportamiento de un intercambio ideal.

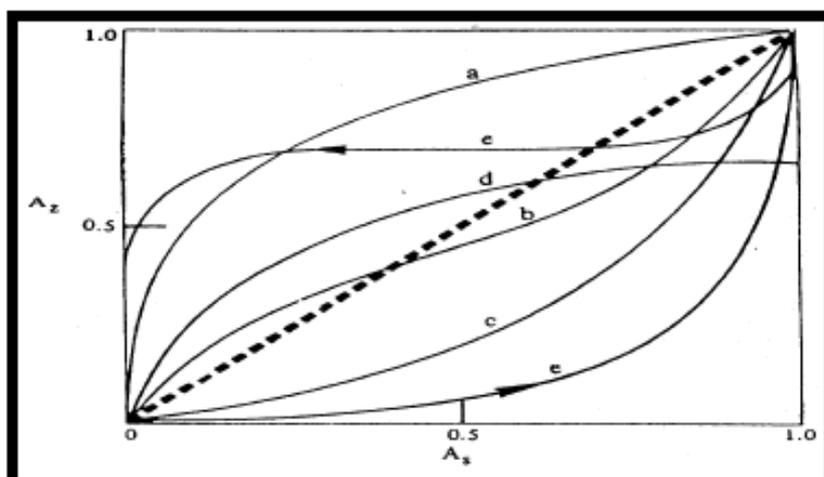


Figura 2.8 Isotermas de intercambio iónico¹⁶.

2.24 Referencias

- ¹ Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.
- ² Brady, Francis J., Tratamiento de aguas residuales por ultrafiltración en operación de lote modificado. Agua Latinoamérica, 38-41. Febrero, 2003.
- ³ Ridderstolpe, Peter. Introduction to Greywater Managment. EcoSanRes. Estocolmo, Suecia. Junio 2004. Pp. 4-10.
- ⁴ Gross, A., Kaplan, D., Baker, K. Removal of chemical and microbiological contaminants from domestic greywater using a recycled vertical flow bioreactor (RVFB). Ecol. Eng. 31 (2007), 107-114.
- ⁵ Noah, M. Graywater use still a gray area. Jour. Env. Hea. Junio editorial, 2002.
- ⁶ Micela. Recuperado el mes de enero del 2010, de <http://www.britannica.com/EBchecked/topic-art/379781/92238/When-a-soap-is-dissolved-in-water-fatty-acids-in>

- ⁷ Micela y micela invertida. Recuperado el mes de enero del 2010, de <http://atom.physics.calpoly.edu/~jfernsler/Research/Biophysics/BiophysResearch.html>
- ⁸ Cómo funcionan los detergentes. Recuperado el mes de enero del 2010, de <http://labquimica.wordpress.com/2007/08/04/%C2%BFcomo-funciona-un-detergente/>
- ⁹ Representación de tensión superficial. Recuperado el mes de enero del 2010, de <http://www.monografias.com/trabajos4/ladensidad/ladensidad.shtm>
- ¹⁰ Weber, W. Jr. Control de la calidad del agua, Procesos fisicoquímicos. Ed. Reverté. España, 1979, reimpreso 2003. Pp. 210, 255, 256.
- ¹¹ Salager, J. L. Adsorción y Mojabilidad. Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Universidad de los Andes, Venezuela, 1998.
- ¹² Duong, D. Adsorption analysis: Equilibria and kinetics. Series on Chemical Engineering. Vol. 2. Queensland, Australia, 1998.
- ¹³ Bosch, P. Y Schifter, I. La zeolita una piedra que hierve. La ciencia para todos. Vol. 55. 3era ed. Fondo de cultura económica. México, 2003.
- ¹⁴ Zeolitas. Recuperado el mes de Julio del 2009, de <http://www.zeocat.es/>
- ¹⁵ Curi, A., Granda, W., Lima, H. y Sousa, W. Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. Información Tecnológica-Vol. 17 N°6, 111-118. Medio ambiente. Ouro Preto, Brasil, 2006.
- ¹⁶ Olgún, M. Teresa. Zeolitas. Características y Propiedades. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Depto. de Química. México.
- ¹⁷ Ostroumov, M., Ortiz, L., Corona, P. Zeolitas de México: Diversidad mineralógica y aplicaciones. Universidad Autónoma del Estado de

- Hidalgo. Recuperado el mes de Agosto del 2009, de <http://www.iim.umich.mx/smexmineralogia/zeolitas.htm>
- ¹⁸ Bailey, A. Aceites y grasas industriales. Ed. Reverté. España, 1984. Pp. 315-317.
 - ¹⁹ Duncan J. Shaw Introduction to colloid and surface chemistry. Ed Butterworth-Heinemann. Gran Bretaña, 1992. Pp. 123-131, 163-165.
 - ²⁰ McMurry, J. Química Orgánica. Ed. Thomson. 6ta ed. Pp. 1030-1032.
 - ²¹ Martini, M., Chivot, M., Peyrefitte, G. Cosmetología. Ed. Masson. España, 1997.
 - ²² Kotz, Treichel, Weaver. Química y reactividad química. Ed. Thomson. Pp. 588-590
 - ²³ Moore, Walter J. Physical Chemistry, 3era ed. Ed. Prentice Hall. 1962.
 - ²⁴ Ball, David W. Fisicoquímica. Ed. Thomson. México 2004. Pp. 768.
 - ²⁵ Winblad U & Simpson-Hébert M. Ecological sanitation –revised and enlarged edition. Stockholm Enviroment Institute. Estocolmo, Suecia, 2004. Pp. 85-98.
 - ²⁶ Water Conservation Using Grey Water. Washington State Department of Health. Wastewater Management Program. Estados Unidos. Mayo, 2005.
 - ²⁷ Calidad de detergentes lavatrastes. Revista del consumidor No. 279, Mayo 2000.
 - ²⁸ Bush, John W. MIT Lecture Notes on Surface Tension, Lectura 1. Instituto de Tecnología de Massachusetts. Abril, 2004.
 - ²⁹ Tóth, J. Adsorption Theory, Modeling and Analysis. Surfactant Science Series. Vol. 107. Ed. Marcel Dekker. USA 2002. Pp. 711.
 - ³⁰ P. Somasundaran, P., Rui Zhang, G. Advances in adsorption of surfactants and their mixtures at solid/solution interfaces. Advances

- in Colloid and Interface Science 123–126, 213–229. Columbia University, New York, USA, 2006.
- ³¹ Paria, S., Khilar, K. A review on experimental studies of surfactant adsorption at the hydrophilic solid–water interface. *Advances in Colloid and Interface Science* 110, 75– 95. Indian Institute of Technology Bombay, Powai, India, 2004.
- ³² Mumpton, F. La roca mágica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry. Vol. 96, Pp. 3463–3470. New York, USA. Marzo 1999.
- ³³ Unda C., T. Tensoactivos. Fenómenos de superficie y Equilibrio de interfases. Facultad de Química. UNAM. Recuperado el mes de Octubre del 2009, de <http://depa.fquim.unam.mx/~tunda/Clasificatensoa.html>
- ³⁴ Tensoactivos. Recuperado el mes de Octubre del 2009, de <http://www.semarnat.gob.mx/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitioscontaminados/GTZ/E-Clasificacion%20de%20Tensoactivos.pdf>
- ³⁵ Shampoos. Recuperado el mes de Octubre del 2009, de <http://www.saludymedicinas.com.mx/nota.asp?id=1475>
- ³⁶ Martínez, A., Ortega, R. Tensión superficial. Noviembre, 2006. Recuperado el mes de Noviembre del 2009, de <http://zeth.ciencias.uchile.cl/~amartinez/2006/seminario/2.pdf>
- ³⁷ Surface tension. Physical Properties Sources Index (PPSI). Chemistry Biology Pharmacy Information Center. Recuperado el mes de Noviembre del 2009, de http://www.ppsi.ethz.ch/fmi/xsl/eqi/eqi_property_details_en.xsl?node_id=75
- ³⁸ Detergencia. Recuperado el mes de Octubre del 2009, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/garcia_h_da/capitulo3.pdf

3.1 Muestras de agua gris

El agua residual utilizada en la experimentación se obtuvo a partir de diferentes muestras de lavadora de hogar y de lavandera recolectadas en botes de polietileno con un volumen aproximado de 3.5 litros. El agua gris manejada como influente de cada proceso se utilizó por lotes, los cuales no se dejaban almacenados por más de una semana.

3.2 Etapas experimentales

La propuesta de las etapas experimentales así como el diseño de los procesos para el tratamiento de las aguas grises se llevaron a cabo con base en el conocimiento previo de los principales contaminantes que están presentes en las aguas grises según su fuente.

Se consideraron varias alternativas que promueven la reutilización de las aguas grises tratadas mediante procesos factibles y económicos. Los procedimientos propuestos para el tratamiento se describen en la Figura 3.1. Cada etapa experimental se describe en este capítulo, siendo la adición de hidróxido de calcio (cal) la primera etapa en cada uno de estos.

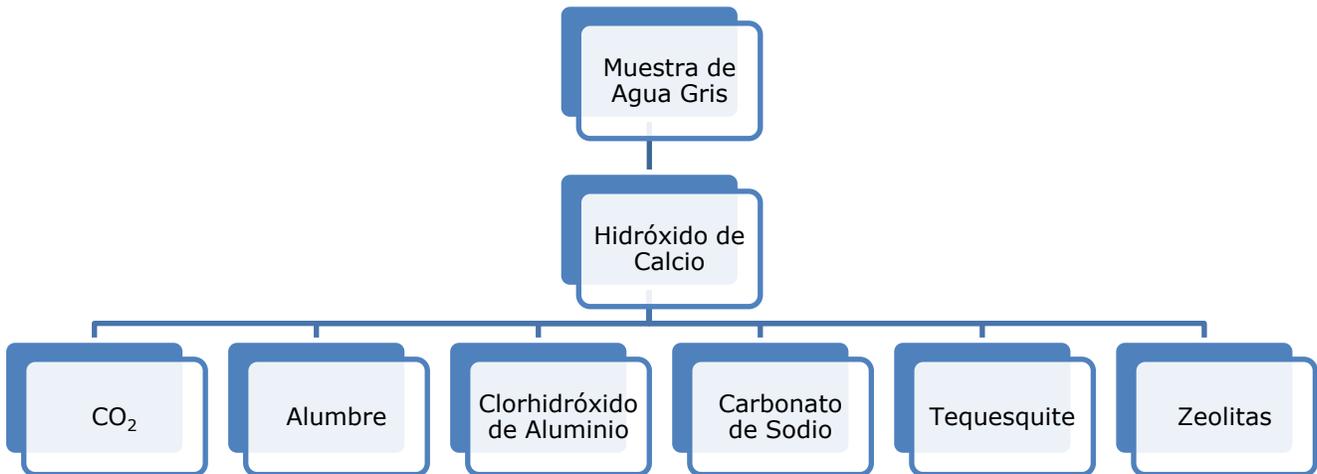


Figura 3.1 Diagrama de flujo de los tratamientos de aguas grises.

3.3 Reacción – adsorción con hidróxido de calcio

Los materiales más abundantes en el agua gris son jabones y detergentes, adicionar hidróxido de calcio en exceso permite la eliminación de estos materiales mediante la precipitación de sus sales. A su vez, estas sales insolubles adsorben en sus moléculas otros contaminantes, lo que aumenta la eficiencia de remoción. Esta etapa experimental consistió en agregar hidróxido de calcio para la remoción de contaminantes presentes en el agua gris. Este procedimiento se consideró como primera etapa de tratamiento.

3.3.1 Experimental

Se tomaron muestras de 100 mL de agua gris a las que se adicionó diferentes concentraciones de hidróxido de calcio para posteriormente definir la cantidad mínima necesaria para la precipitación de contaminantes presentes en la muestra. Las pruebas efectuadas fueron con 0.1, 0.3, 0.5 y

0.7 gramos de hidróxido de calcio para cada muestra, la mezcla se dejó en agitación durante 10 minutos, se dejó reposar y posteriormente se filtró.

La muestra de agua gris con la que se efectuó cada experimento fue caracterizada inicialmente y después de tratar con respecto a parámetros biológicos y fisicoquímicos. La valoración de los parámetros biológicos se desarrolló con base en las normas mexicanas para la determinación de la demanda química de oxígeno y huevos de helminto. Los parámetros fisicoquímicos determinados fueron: tensión superficial, dureza, conductividad, turbidez y pH. Para la determinación de tensión superficial mediante el método del anillo, se empleó un anillo de platino de $D = 5.992\text{cm}$ y $R/r = 53.6$, una balanza digital marca Ohaus de 0.001 de sensibilidad y un elevador mecánico. La dureza total se evaluó por el método de titulación con EDTA. Para la determinación de conductividad, turbidez y pH se utilizó un conductímetro marca Metrohm de sensibilidad 0.0001 mS/cm, un turbidímetro digital marca Orbeco-Hellige de 0.01 NTU de sensibilidad y un pHmetro marca Oakton de 0.01 unidades de sensibilidad. En el apéndice B se encuentra mayor información acerca de los parámetros de caracterización utilizados para esta investigación.

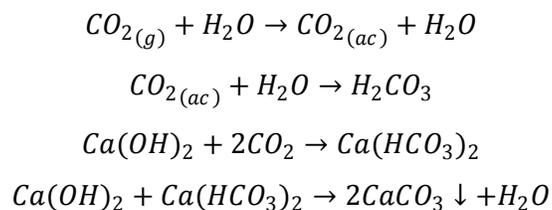
3.4 Alternativas de tratamiento para la segunda etapa

Para mejorar la calidad del agua tratada en la primera etapa, es necesario eliminar el exceso de hidróxido de calcio ya que influye en el pH y en la dureza. La calidad del agua con alta alcalinidad y alta dureza hace que su reuso sea poco favorable. En los procesos de lavado, por ejemplo, los jabones de calcio insolubles que se forman se depositan en las fibras, tinas, baños, regaderas, etc. Es por esto que se propusieron diferentes procesos

factibles y económicos como alternativas de segunda etapa para el tratamiento de las aguas grises, los cuales contribuyen en mejorar la calidad del agua para su reuso, estos son: precipitación con dióxido de carbono, empleo de coagulantes y ablandamiento de agua con minerales y zeolitas.

3.5 Precipitación con dióxido de carbono.

La absorción de dióxido de carbono en agua produce acidez en la solución como consecuencia de la formación de ácido carbónico. La reacción entre el hidróxido de calcio y el dióxido de carbono da como producto el precipitado de carbonato de calcio, lo cual elimina la dureza del agua y estabiliza el pH. Las reacciones que ocurren son:



3.5.1 Experimental

Como segunda etapa del sistema de tratamiento con hidróxido de calcio el efluente se trató con CO₂ a través de una columna empacada. El empaque utilizado en la columna fue piedra pómez con piedras de aproximadamente 8 cm de diámetro, las cuales sirvieron para aumentar el área de contacto entre el efluente y el CO₂. Se efectuaron dos pruebas, en una se hizo variar el flujo de CO₂ manteniendo el flujo de efluente constante y viceversa.

La primera prueba consistió en pasar el efluente a un flujo constante de 250 cm^3/min con una bomba peristáltica a través de la columna. Al efluente se le adicionó CO_2 a diferentes flujos, 100, 200, 400, 600, 800 y 1000 cm^3/min . La segunda prueba consistió en fijar el flujo de CO_2 a 400 cm^3/min y variar el flujo del efluente a 235, 261, 300, 324 y 364 cm^3/min . Posteriormente el agua se filtró y se efectuó la valoración final con respecto a los parámetros de caracterización. La Figura 3.2 describe el proceso de tratamiento con CO_2 .

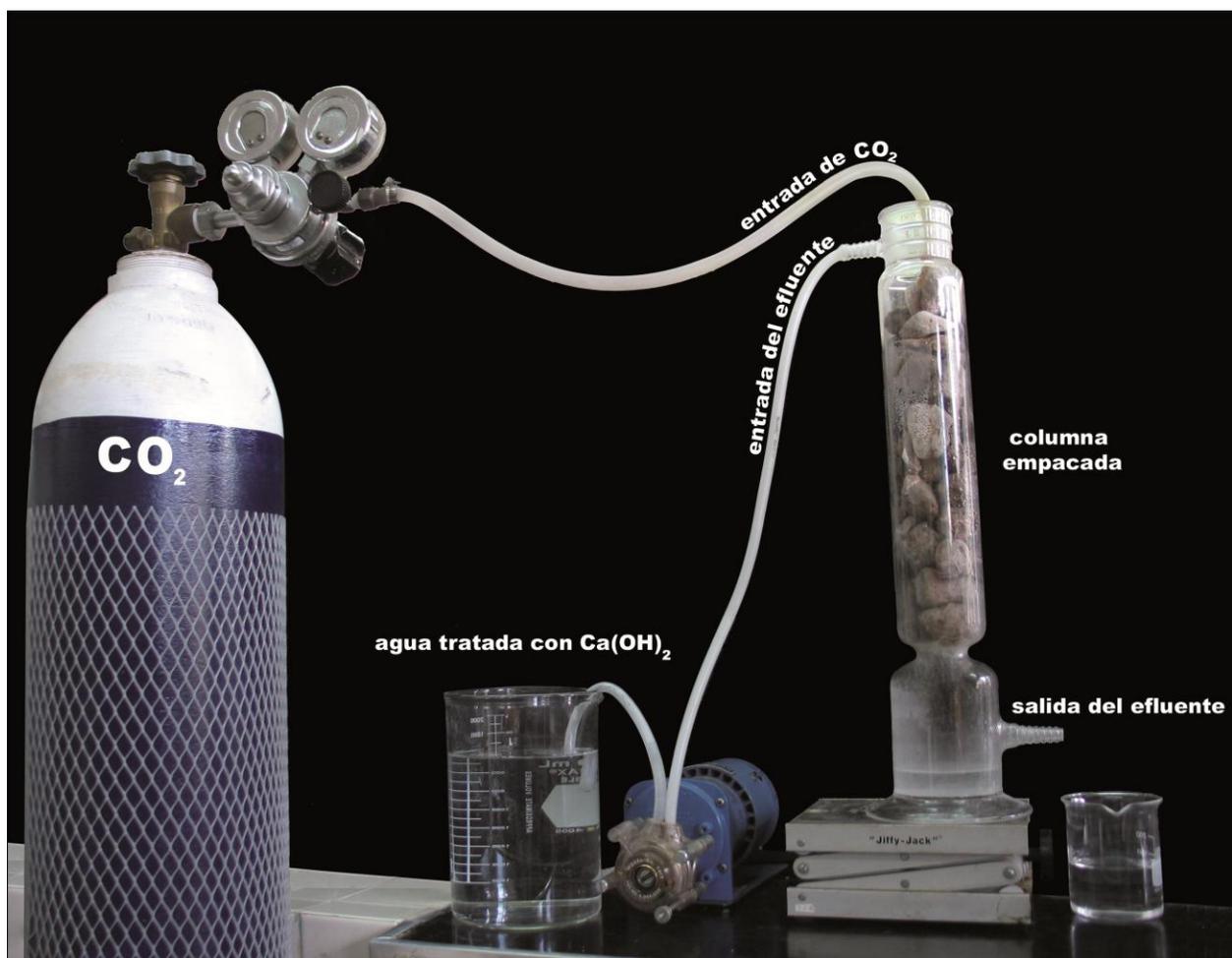
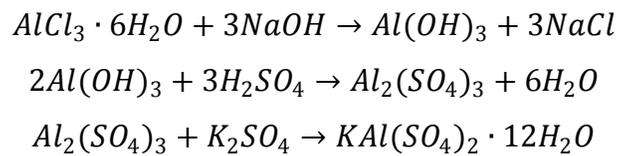


Figura 3.2 Tratamiento del efluente con CO_2 mediante una columna empacada con piedra pómez.

3.6 Tratamiento con alumbre

Como segunda etapa del sistema de tratamiento con hidróxido de calcio se empleó alumbre. El alumbre es una sal doble de aluminio y potasio ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) que se obtiene del sulfato de aluminio a partir de cloruro de aluminio, como se indica en las siguientes ecuaciones:



El alumbre es un producto económico que se adquiere fácilmente y que tiene una amplia variedad de usos, entre ellos, como coagulante y floculante para el tratamiento de aguas. Los procesos de coagulación y floculación se pueden resumir como una etapa en la cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamadas flocs tal que su peso específico supere a la del agua y puedan precipitar.

Para producir la coagulación, el agua requiere de alcalinidad natural, si esta alcalinidad no se posee se debe agregar algún tipo de sustancia que la asegure como es el CaO , $Ca(OH)_2$, $NaOH$ o Na_2CO_3 . Los coagulantes metálicos ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ y sales de hierro) han sido los más empleados en la clarificación del agua, éstos productos actúan como coagulantes y floculantes a la vez. Los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH, ya que si no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre y pueden solubilizarse el hierro o el aluminio.

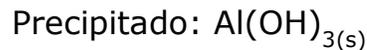
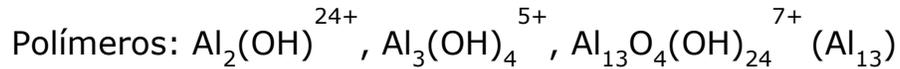
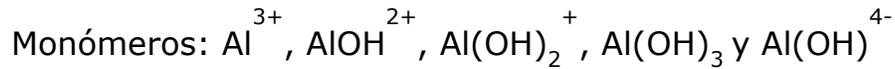
3.6.1 Experimental

Se tomaron muestras de 100mL cada una del efluente previamente tratado con hidróxido de calcio, a las cuales se les adicionó alumbre a diferente concentración hasta conseguir un pH neutro (pH=7) del agua. Las pruebas de caracterización efectuadas fueron para las concentraciones cercanas al pH neutro, 0.5%, 0.6%, 0.7% y 1%. La mezcla se dejó en agitación durante 10 minutos, se dejó reposar y posteriormente se filtró. Las pruebas se efectuaron por triplicado. Se efectuó la caracterización fisicoquímica y biológica correspondiente del agua tratada.

3.7 Tratamiento con clorhidróxido de aluminio

Como segunda etapa del sistema de tratamiento con hidróxido de calcio se empleó clorhidróxido de aluminio ($Al_2(OH)_5Cl$). Es un coagulante sintético el cual reacciona para formar polihidróxidos de aluminio los cuales precipitan como un floc grande y consistente. Los flocs absorben los contaminantes en el agua los cuales son precipitados y pueden ser removidos fácilmente. En general, la introducción de una sal metálica en agua provoca la formación de una serie de especies, más o menos compleja y con características propias.

En la literatura se proponen diferentes modelos para describir la distribución de las especies generadas en las reacciones de sales de Al en soluciones acuosas. Los métodos potenciométricos parecen indicar la presencia de especies solubles monoméricas y poliméricas, así como precipitados:



En el tratamiento de aguas potables y para dosis de aluminio equivalentes, el clorhidróxido de aluminio permite alcanzar una menor turbidez residual que el sulfato de aluminio. Se reduce de manera análoga la materia orgánica y el color. En aguas residuales el clorhidróxido de aluminio permite una mejor separación de partículas. Los valores de pH en los que el proceso de coagulación con clorhidróxido de aluminio es efectivo son entre 4 y 8 frente al margen óptimo para el sulfato de aluminio de 5.5-7.5, tanto en aguas potables como residuales¹.

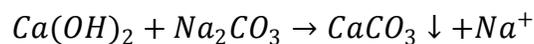
3.7.1 Experimental

Se tomaron varias muestras de 100mL cada una del efluente previamente tratado con hidróxido de calcio, a las cuales se les adicionó clorhidróxido de aluminio variando la concentración hasta conseguir un pH neutro (pH=7) del agua. Las pruebas de caracterización efectuadas fueron para las concentraciones cercanas al pH neutro, 0.8%, 1%, 1.3% y 1.5%. La mezcla se dejó en agitación durante 10 minutos, se dejó reposar y posteriormente se filtró. Las pruebas se efectuaron por triplicado. Se efectuó la caracterización fisicoquímica y biológica correspondiente del agua tratada.

3.8 Ablandamiento de agua con carbonato de sodio

Como segunda etapa del sistema de tratamiento con hidróxido de calcio, se consideró el uso de carbonato de sodio para lograr el ablandamiento del agua. El ablandamiento del agua es un proceso que quita la dureza, causada por la presencia de iones metálicos divalentes, Ca^{2+} y Mg^{2+} .

La adición de carbonato de sodio al agua previamente tratada con hidróxido de calcio conduce al ablandamiento del agua por la precipitación del carbonato de calcio. La reacción libera iones Na^+ los cuales forman sales solubles:



3.8.1 Experimental

Se adicionó carbonato de sodio a diferentes concentraciones en muestras de 100mL del efluente previamente tratado con hidróxido de calcio, para posteriormente definir las concentraciones cercanas a una baja dureza. Las pruebas de caracterización efectuadas para el tratamiento con carbonato de sodio fueron para las concentraciones de 0.1%, 0.2%, 0.3% y 0.5%. La mezcla se dejó en agitación durante 5 minutos, se dejó reposar y posteriormente se filtró. Se efectuó la caracterización fisicoquímica y biológica correspondiente del agua tratada.

3.9 Ablandamiento de agua con tequesquite

Como segunda etapa del sistema de tratamiento con hidróxido de calcio, se consideró el uso de tequesquite para lograr el ablandamiento del agua. El tequesquite está constituido por otras sales además del carbonato y bicarbonato de sodio (NaHCO_3 y Na_2CO_3 , NaCl , NaSO_4 y SiO). Al adicionar tequesquite al agua tratada con hidróxido de calcio, ocurre la precipitación del carbonato de calcio y por tanto la eliminación de la dureza del agua.

De todos los yacimientos de álcalis mexicanos el mejor conocido es el del Lago de Texcoco, donde se encuentra una gran variedad de salmueras y de ahí el tequesquite así como otras sales. En el Lago, la concentración de las salmueras cambia en las distintas regiones, las más concentradas que se han obtenido tienen la composición señalada en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición de las salmueras más concentradas del Lago de Texcoco²

NaCl	6.28%	Na_2SO_4	0.09%
Na_2CO_3	5.94%	SiO_2	0.04%
NaHCO_3	2.2%	Na_3PO_4	0.05%
KCl	0.5%	MgCl_2	0.02%
NaBO_2	0.12%	R_2O_3	0.01%
NaNO_3	0.05%	As_2O_3	0.001%
NH_3	0.0014%		

3.9.1 Experimental

Se adicionó tequesquite a diferentes concentraciones en muestras de 100mL del efluente previamente tratado con hidróxido de calcio, para posteriormente definir las concentraciones cercanas a una baja dureza. Las

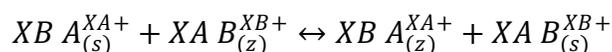
pruebas de caracterización efectuadas para el tratamiento con tequesquite fueron para las concentraciones de 0.2%, 0.3%, 0.5% y 1.0%. La mezcla se dejó en agitación durante 5 minutos, se dejó reposar y posteriormente se filtró. Se efectuó la caracterización fisicoquímica y biológica correspondiente del agua tratada.

3.10 Intercambio iónico con zeolitas

El intercambio iónico es una de las propiedades más importantes de las zeolitas debido a que por un lado se pueden llevar a cabo modificaciones de las mismas, para cambiar sus propiedades superficiales (afinidad por compuestos orgánicos); esta propiedad de intercambio iónico es útil en más de un proceso industrial, en la agricultura, en la acuicultura y en usos ambientales. El comportamiento del intercambio iónico en una zeolita depende de:

- a) La topología de la red
- b) El tamaño del ion y su carga
- c) La densidad de carga de la zeolita
- d) La concentración del electrolito en solución

Para un intercambio iónico binario en el que se involucran los iones A^{XA+} y B^{XB+} , la reacción química se puede expresar de la siguiente forma:



Donde XA y XB son las cargas de los cationes de intercambio A y B, z y s corresponden a los cationes en el material sólido (zeolita) y en solución, respectivamente. Los aniones también están presentes en la solución acuosa y mantienen la electro neutralidad en dicha fase.

3.10.1 Experimental

Como otra alternativa para la segunda etapa del sistema de tratamiento del agua gris, se consideró emplear una columna con los intercambiadores iónicos (zeolitas) por la cual se hizo pasar a través de ella agua previamente tratada con cal. Se utilizaron 200 gramos de zeolita "clinoptilolita" en la columna por la que se hicieron pasar 2000mL de agua previamente tratada con hidróxido de calcio, el flujo del efluente fue constante de 8 cm³/min. Se midió la conductividad y la dureza a muestras de 30mL obtenidas a la salida de la columna hasta agotar la capacidad de intercambio catiónico de la zeolita con la solución. Se efectuó la caracterización fisicoquímica y biológica correspondiente del agua tratada. La Figura 3.3 muestra la columna de zeolitas empleada en la experimentación.

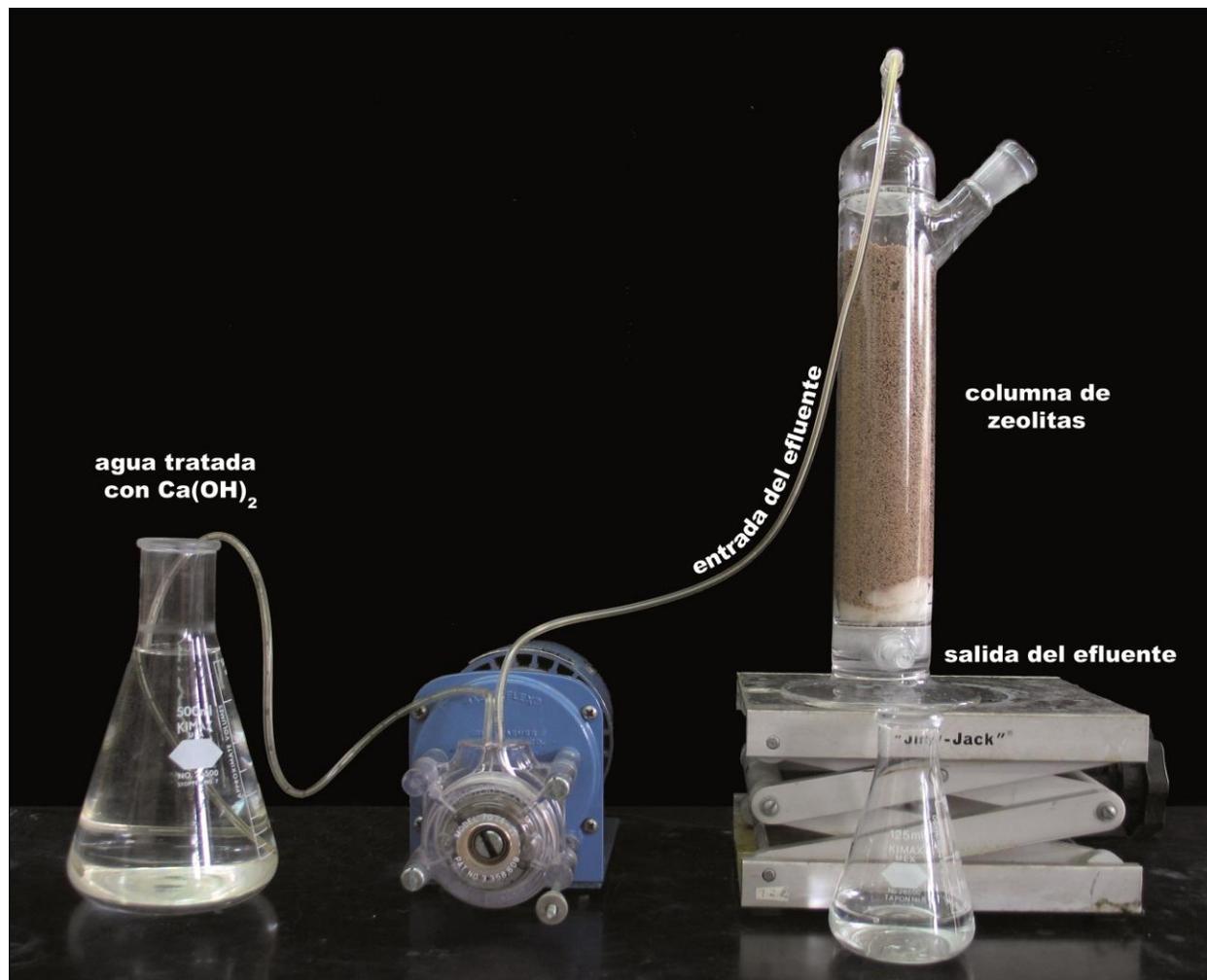


Figura 3.3 Ablandamiento del agua mediante una columna de zeolitas.

3.11 Referencias

- ¹ Torra, A., Bisbal, J. L. y Tous, J. F. Policloruro de aluminio en el proceso de potabilización de aguas superficiales. Junio 1998, España.
- ² Orozco D., Fernando y Madinaveitia, Antonio. Boletín del Instituto de Química, año 1, num. 1. U.N.A.M., México, 1945.
- ³ Coagulación y floculación de contaminantes del agua. Recuperado el mes de Diciembre de 2009 de: cabierta.uchile.cl/revista/15/articulos/pdf/edu4.pdf
- ⁴ Chávez Cárdenas, J. A., Rodríguez Castro, J. A., Ruiz Chávez, R., García Acevedo R., Serrano Medrano. M. La importancia de la dureza del agua. Determinación de la dureza. Facultad de Ingeniería Civil, 2º foro académico nacional de ingenierías y arquitectura. Morelia, Michoacán, México. Diciembre 2006.
- ⁵ Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba, Diario Oficial de la Federación. 13-08-2001.
- ⁶ 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.
- ⁷ Olguín G., María T. Zeolitas Características y Propiedades. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Depto. de Química. México, D.F.

4.1 Caracterización fisicoquímica del agua gris

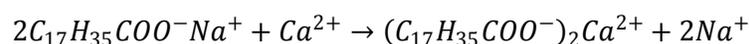
La caracterización del agua gris se efectuó mediante diversos métodos fisicoquímicos como son tensión superficial, turbidez, pH y conductividad de las muestras a tratar de agua gris (Apéndice B). La Tabla 4.1 muestra los valores promedio de los parámetros medidos en 10 lotes de agua gris; parámetros que posteriormente se emplearon como referencia para evaluar los parámetros finales del agua tratada. Además, como protocolo general, se evaluó la dureza total por el método de titulación con EDTA (Apéndice B.2.5).

Tabla 4.1 Caracterización fisicoquímica del agua gris.

Parámetro	Valor promedio	Desviación estándar
Tensión superficial, σ (dinas/cm)	36.8	1.41
Turbidez (NTU)	115	8.31
pH	8.10	0.76
Conductividad eléctrica, Λ (mS/cm)	1.39	0.41
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	170	7.07

4.2 Reacción-adsorción con hidróxido de calcio

Como primera etapa de tratamiento del agua gris, la adición de hidróxido de calcio (cal) reacciona con los jabones iónicos, forman jabones metálicos insolubles y precipitan:



La adición en exceso de hidróxido de calcio permite además, la eliminación de las bacterias presentes en el agua debido al pH.

La remoción de los tensoactivos iónicos del agua gris conduce a un aumento en la tensión superficial. Sin embargo, este aumento no alcanza el valor de la tensión superficial del agua (72.8 mN/m), lo cual señala la presencia de compuestos con actividad superficial. Estos materiales son los tensoactivos no iónicos de tipo etoxilado, que no reaccionan con el hidróxido de calcio.

El agua gris tratada con hidróxido de calcio y posteriormente filtrada presentó una apariencia traslúcida (Figura 4.1). Los datos de turbidez antes (115 ± 8.31 UTN) y después (1.83 ± 1.01 UTN) del tratamiento con hidróxido de calcio, indican que los sólidos suspendidos fueron prácticamente removidos.

Los valores de conductividad eléctrica varían según la adición de cal, a mayor cantidad aumenta la conductividad a pesar de que la solución esté saturada, esto se debe a la presencia de otros compuestos en la cal. Los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos medidos al agua gris y la que se trató con hidróxido de calcio se describen en la Tabla 4.2.



Figura 4.1 Agua gris tratada con hidróxido de calcio. Los matraces de izquierda a derecha, muestran las tres etapas del tratamiento: agua gris, precipitado y agua resultante.

Parámetro	Agua gris		Agua tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$	
	Valor promedio	Desviación estándar	Valor promedio	Desviación estándar
Tensión superficial, σ (dinas/cm)	36.8	1.41	51.9	1.65
Conductividad eléctrica, Λ (mS/cm)	1.39	0.41	7.18	1.42
Turbidez (NTU)	115	8.31	1.83	1.01
pH	8.10	0.76	12.1	0.46
Dureza total (mg/L CaCO_3)	170	7.07	1719	17.7

Tabla 4.2 Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos medidos al agua gris y la tratada con cal.

Para mejorar la calidad del agua tratada es conveniente eliminar el exceso de hidróxido de calcio en solución, ya que influye en el pH y en la dureza. Es por esto que se desarrollaron diferentes procesos factibles y económicos como alternativas de segunda etapa para el tratamiento de las aguas grises, los cuales son: precipitación con dióxido de carbono, empleo de coagulantes y ablandamiento de agua con minerales básicos y zeolitas.

4.3 Precipitación con dióxido de carbono

Para esta segunda etapa de tratamiento se efectuaron dos pruebas. En la primera se hizo pasar el agua tratada con cal a flujo constante (250 cm³/min) a través de la columna y se hizo variar el flujo de CO₂, se determinó la variación de la concentración de los iones OH⁻ con respecto al flujo de CO₂.

La concentración de [OH⁻] presente en el efluente tratado con CO₂ se calculó utilizando las siguientes ecuaciones:

$$[OH^-] = 10^{-pOH} + Ke$$

$$Ke = \frac{Ka}{Kps}$$

Donde Ka es la constante de acidez del ácido carbónico (4.69x10⁻¹¹M)¹ y Kps es el producto de solubilidad del hidróxido de calcio (5.5x10⁻⁶)¹. El valor de Kps indica la solubilidad de un compuesto iónico, por lo que, cuanto menor sea su valor menos soluble será el compuesto. En la Tabla 4.3 se muestran los resultados de pH y concentración de los iones OH⁻ con respecto a la

¹ Dean, John A., Lange Manual de Química. 13ª ed. Ed. McGrawHill. 1990.

variación del flujo de CO₂. Conforme se aumenta el flujo de CO₂ en el agua tratada con hidróxido de calcio, disminuye el pH y por tanto la concentración de los iones OH⁻ (Figura 4.2).

Tabla 4.3 Resultado de la concentración de [OH⁻] a partir de la variación del flujo de CO₂.
Flujo del efluente constante, 250 cm³/min.

Flujo de CO ₂ (cm ³ /min)	pH	pOH	[OH ⁻]
0	12.62	1.38	4.17E-02
100	12.23	1.77	1.70E-02
200	11.2	2.8	1.59E-03
400	7.46	6.54	8.82E-06
600	7.36	6.64	8.76E-07
800	7.24	6.76	8.70E-07
1000	6.79	7.21	8.59E-08

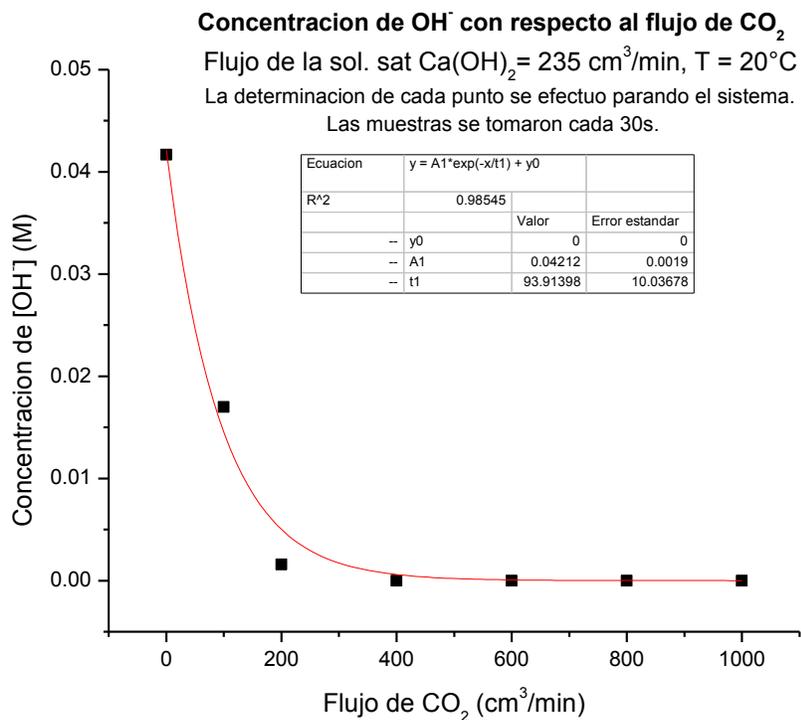


Figura 4.2 Variación de la concentración de los iones [OH⁻] con respecto al flujo de CO₂.

La segunda prueba consistió en variar el flujo del efluente y mantener el flujo de CO₂ constante (400cm³/min). El flujo de CO₂ se fijó con base en los resultados obtenidos en la primera prueba donde, a un flujo de 400cm³/min se tiene una baja concentración de iones OH⁻ (8.82 X 10⁻⁶ M). La Figura 4.3 muestra la variación de la concentración de los iones OH⁻ con respecto al flujo del efluente. Puede observarse que a menor gasto la concentración de los iones OH⁻ es menor, esto es por el tiempo de residencia dentro de la columna, a mayor tiempo menor concentración (Figura 4.4). El tiempo de residencia θ , se expresa como $\theta = V/Q$, donde V es el volumen de la columna y Q el flujo a tratar de la solución saturada de hidróxido de calcio.

Tabla 4.4 Concentración de [OH⁻] a partir de la variación del flujo de la solución saturada de hidróxido de calcio. Flujo de CO₂ constante, 400cm³/min. Vol. de la columna = 0.23L.

Flujo de la sol. sat. de Ca(OH)₂ (cm³/min)	pH	pOH	[OH⁻]	Tiempo de residencia, θ (s)
364	11.28	2.72	1.91E-03	37.91
324	10.15	3.85	1.50E-04	42.59
300	9.98	4.02	1.04E-04	46.00
261	9.62	4.38	5.02E-05	52.87
235	7.18	6.82	8.68E-06	58.72

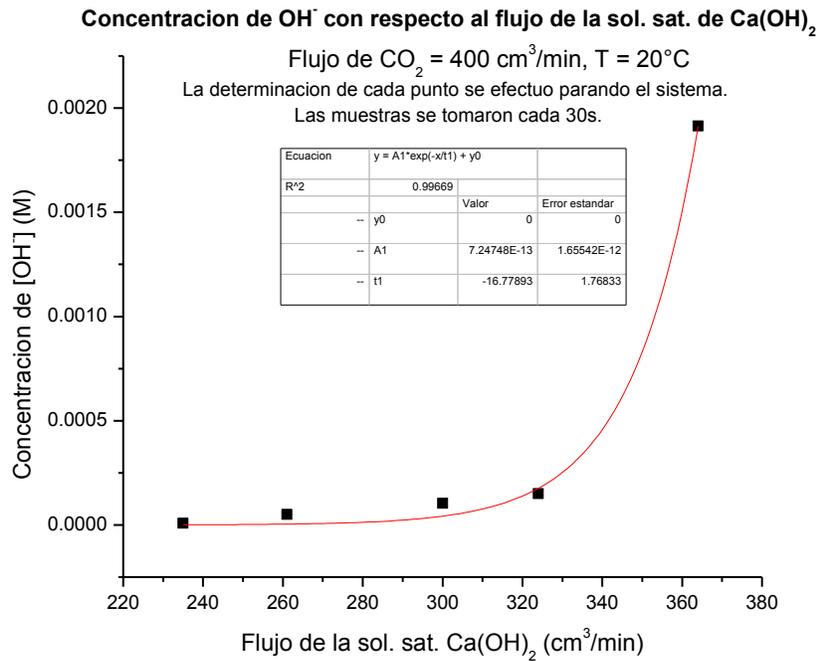


Figura 4.3 Variación de la concentración de los iones [OH⁻] con respecto al flujo de la solución saturada de hidróxido de calcio.

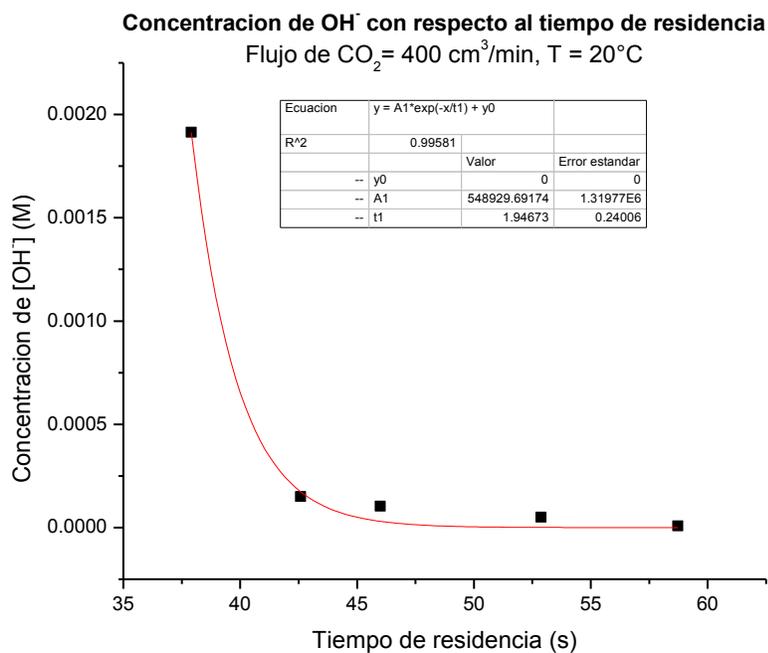


Figura 4.4 Variación de la concentración de los iones [OH⁻] con respecto al tiempo de residencia.

4.4 Tratamiento con alumbre

En el sistema de tratamiento con hidróxido de calcio, la adición de alumbre se empleó para la neutralización del agua así como para la eliminación del hidróxido de calcio en la solución. El alumbre se ioniza en el agua y produce iones Al^{3+} y SO_4^{2-} , algunos de los iones $Al(OH)_3$ neutralizan la carga negativa de los coloides pero la mayor parte de los iones Al^{3+} se combinan con los iones OH^- del agua para formar $Al(OH)_3$ coloidal, el cual adsorbe iones positivos de la solución y el exceso es neutralizado por el SO_4^{2-} para producir un precipitado de $Al(OH)_3$ y sulfatos adsorbidos. El exceso de iones H^+ que se forma en la reacción tiende a bajar el pH, el cual es neutralizado por la alcalinidad presente en la solución.

El efecto químico global es una disminución del pH del agua y una conversión de parte de la dureza de calcio ($Ca(OH)_2$) en dureza de sulfato ($CaSO_4$). En las Tablas 4.5 y 4.6 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del agua tratada una vez efectuadas las pruebas a diferentes concentraciones de alumbre.

Tabla 4.5 pH del agua tratada con hidróxido de calcio y alumbre a diferentes concentraciones.

Alumbre	
Concentración (%)	pH
1.0	5.69 ± 0.01
0.7	6.38 ± 0.01
0.6	7.17 ± 0.02
0.5	8.37 ± 0.01

Tabla 4.6 Caracterización fisicoquímica del agua tratada con hidróxido de calcio y alumbre al 0.6%.

Parámetro	Agua tratada con Ca(OH)_2	Agua tratada con Ca(OH)_2 y alumbre
	Valor promedio	Valor promedio
Tensión superficial, σ (dinas/cm)	51.9 ± 1.65	52.6 ± 0.01
Conductividad eléctrica, Λ (mS/cm)	7.18 ± 1.42	3.53 ± 0.16
Turbidez (NTU)	1.83 ± 1.01	1.02 ± 0.40
pH	12.1 ± 0.46	7.17 ± 0.02

Al agregar el alumbre en agua se originaron productos insolubles, los cuales fueron removidos mediante la filtración. Es notable que no se requiere de altas concentraciones de coagulante para obtener un pH neutro así como para mejorar las propiedades fisicoquímicas del agua, la cantidad necesaria para lograrlo fue del 0.6%.

4.5 Tratamiento con clorhidróxido de aluminio

En el sistema de tratamiento con hidróxido de calcio, la adición de clorhidróxido de aluminio a la solución produce iones Al(OH)_3 , la mayor parte de los iones Al^{3+} se combinan con los iones OH^- del agua para formar Al(OH)_3 coloidal, el cual adsorbe iones positivos de la solución y el exceso es para producir un precipitado de Al(OH)_3 . El efecto químico global está en la disminución del pH del agua y en la dureza. En las Tablas 4.7 y 4.8 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del agua tratada una vez efectuadas las pruebas a diferentes concentraciones del coagulante.

Tabla 4.7 pH del agua tratada con hidróxido de calcio y clorhidróxido de aluminio a diferentes concentraciones.

Clorhidróxido de aluminio	
Concentración (%)	pH
1.5	6.40 ± 0.13
1.3	6.60 ± 0.10
1.0	7.27 ± 0.15
0.8	7.57 ± 0.20

Tabla 4.8 Caracterización fisicoquímica del agua tratada con hidróxido de calcio y clorhidróxido de aluminio al 1.0%.

Parámetro	Agua tratada con Ca(OH)₂	Agua tratada con Ca(OH)₂ y clorhidróxido de aluminio
	Valor promedio	Valor promedio
Tensión superficial, σ (dinas/cm)	51.9 ± 1.65	54.2 ± 0.01
Conductividad eléctrica, Λ (mS/cm)	7.18 ± 1.42	3.54 ± 0.40
Turbidez (NTU)	1.83 ± 1.01	0.20 ± 0.10
pH	12.1 ± 0.46	7.18 ± 0.01

Al agregar el coagulante en agua se originaron productos insolubles, polihidróxidos de aluminio que precipitan como un floc grande y consistente, los cuales fueron removidos mediante la filtración. No se requiere de altas concentraciones de clorhidróxido de aluminio para obtener un pH neutro así como para mejorar las propiedades fisicoquímicas del agua, en este caso fue del 1%.

4.6 Ablandamiento de agua con carbonato de sodio

En el sistema de tratamiento con hidróxido de calcio, se consideró el empleo de carbonato de sodio como segunda etapa para el ablandamiento del agua. Los métodos de ablandamiento se basan en producir compuestos insolubles de calcio y magnesio, o mantenerlos en solución pero con pérdida de su carácter iónico. Las tablas 4.9 y 4.10 muestran los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del agua tratada con la adición de carbonato de sodio.

Tabla 4.9 Dureza expresada en mg/L CaCO₃, del agua tratada con carbonato de sodio a diferentes concentraciones.

Carbonato de sodio	
Concentración (%)	Dureza (mg/L CaCO₃)
0.1	398 ± 1.06
0.2	15 ± 0.10
0.3	13 ± 0.10
0.5	12 ± 0.15

Tabla 4.10 Caracterización fisicoquímica del agua tratada con hidróxido de calcio y carbonato de sodio al 0.2%.

Parámetro	Agua tratada con Ca(OH)₂	Agua tratada con Ca(OH)₂ y Na₂CO₃
	Valor promedio	Valor promedio
Tensión superficial, σ (dinas/cm)	51.9 ± 1.65	46.1 ± 1.65
Conductividad eléctrica, Λ (mS/cm)	7.18 ± 1.42	6.48 ± 1.42
Turbidez (NTU)	1.83 ± 1.01	1.19 ± 0.62
pH	12.1 ± 0.46	12.0 ± 0.19
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	1719 ± 17.7	15 ± 0.10

Al agregar carbonato de sodio a la solución saturada con hidróxido de calcio se forma el precipitado de carbonato de calcio, al filtrarse se obtiene agua blanda (o suave). Los datos de dureza antes (1719 ± 17.7 mg/L CaCO_3) y después (15 ± 0.10 mg/L CaCO_3) del tratamiento, indican que la dureza del agua fue prácticamente eliminada. La cantidad de carbonato de sodio que se requiere para el ablandamiento del agua es del 0.2%. El agua tiene un pH alcalino debido al hidróxido de sodio que se forma.

4.7 Ablandamiento de agua con tequesquite

En el sistema de tratamiento con hidróxido de calcio, se consideró el empleo de tequesquite como segunda etapa para el ablandamiento del agua. Las Tablas 4.11 y 4.12 muestran los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del agua tratada con la adición de tequesquite.

Tabla 4.11 Dureza expresada en mg/L CaCO_3 , del agua tratada con tequesquite a diferentes concentraciones.

Tequesquite	
Concentración (%)	Dureza (mg/L CaCO_3)
0.2	385 ± 0.07
0.3	120 ± 0.15
0.5	38 ± 0.07
1.0	28 ± 0.07

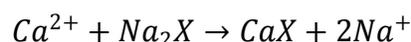
Tabla 4.12 Caracterización fisicoquímica del agua tratada con hidróxido de calcio y tequesquite al 0.5%.

Parámetro	Agua tratada con Ca(OH) ₂	Agua tratada con Ca(OH) ₂ y tequesquite
	Valor promedio	Valor promedio
Tensión superficial, σ (dinas/cm)	51.9 ± 1.65	45.1 ± 0.20
Conductividad eléctrica, Λ (mS/cm)	7.18 ± 1.42	6.99 ± 0.30
Turbidez (NTU)	1.83 ± 1.01	0.87 ± 0.45
pH	12.1 ± 0.46	12.0 ± 0.06
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	1719 ± 17.7	38 ± 0.07

Al agregar tequesquite a la solución saturada con hidróxido de calcio se forma el precipitado de carbonato de calcio, al filtrarse se obtiene agua blanda (o suave). Los datos de dureza antes (1719 ± 17.7mg/L CaCO₃) y después (38 ± 0.07mg/L CaCO₃) del tratamiento, indican que la dureza del agua fue prácticamente eliminada. La cantidad que se requiere para el ablandamiento del agua es del 0.5%, una concentración más alta a diferencia del carbonato de sodio debido a otros compuestos presentes en el tequesquite.

4.8 Intercambio iónico con zeolitas

En el sistema de tratamiento con hidróxido de calcio, el empleo de zeolitas como intercambiadores iónicos se consideró para el ablandamiento del agua. La reacción para el ablandamiento del agua tratada previamente con hidróxido de calcio mediante zeolitas es la siguiente:



Se empleó la conductividad como parámetro fisicoquímico que indica la concentración de los iones en solución. La conductividad de la solución tratada a través de la columna de zeolitas aumenta conforme al tiempo (Figura 4.5), lo cual implica que las zeolitas van agotando su capacidad de intercambio iónico. Durante la primera hora se tiene una remoción del 90 hasta 99% de calcio de la solución, con respecto a la dureza se obtiene agua suave o blanda en los primeros 200mL que pasan a través de la columna (Tabla 4.13). Durante el proceso, la dureza del agua puede variar así como la velocidad del flujo a través del sistema. El lecho del intercambiador puede regenerarse con una salmuera de cloruro de sodio. La Figura 4.6 muestra el comportamiento del intercambio iónico entre el calcio en la solución y el calcio depositado en la zeolita.

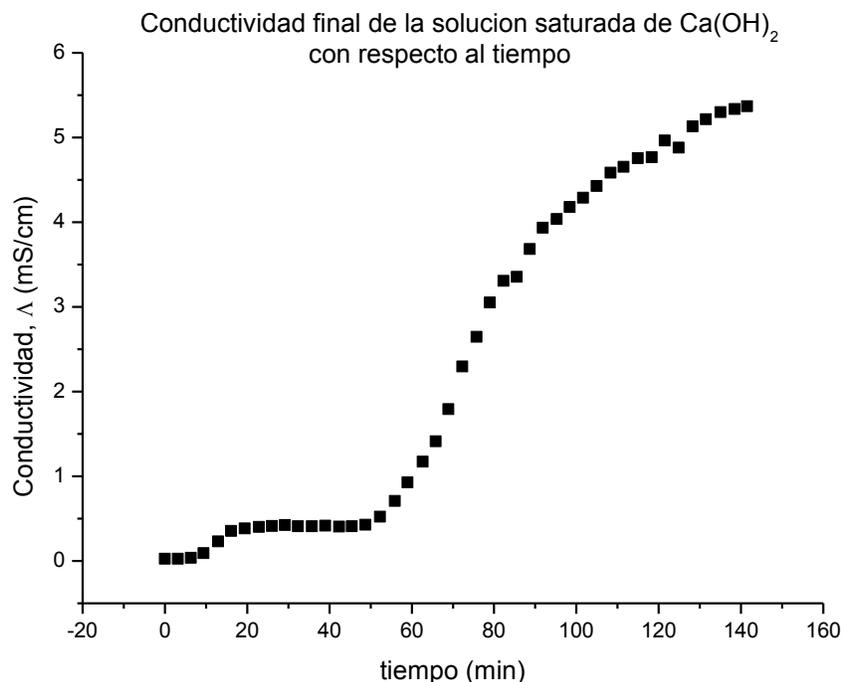


Figura 4.5 Variación de la conductividad de la solución saturada con Ca(OH)_2 con respecto al tiempo después de ingresar a la columna de zeolitas

Tabla 4.13. Resultados de la solución saturada de Ca²⁺ en las pruebas efectuadas en la columna de zeolitas

Tiempo (min)	Volumen (mL)	Conductividad, Λ (mS/cm)	Conductividad/g de zeolita	%Remoción	Dureza total (mg/L CaCO₃)
0	25.3	0.024	0.035802	99.7	10
3.16	50.6	0.025	0.035796	99.6	10
6.33	75.4	0.037	0.035738	99.5	20
9.43	103.6	0.091	0.035469	98.7	25
12.95	128.6	0.231	0.034769	96.8	95
16.08	155.1	0.353	0.034159	95.1	130
19.38	182.9	0.383	0.034013	94.7	160
22.86	208.2	0.400	0.033923	94.4	150
26.03	233.3	0.411	0.033868	94.3	150
29.16	258.6	0.423	0.033812	94.1	170
32.33	286.1	0.410	0.033873	94.3	160
35.76	311.8	0.410	0.033875	94.3	175
38.98	338.6	0.416	0.033845	94.2	215
42.33	363.6	0.406	0.033894	94.3	215
45.45	389.7	0.407	0.033889	94.3	210
48.71	418.0	0.428	0.033786	94.0	215
52.25	447.4	0.523	0.033317	92.7	200
55.93	471.7	0.709	0.032379	90.1	255

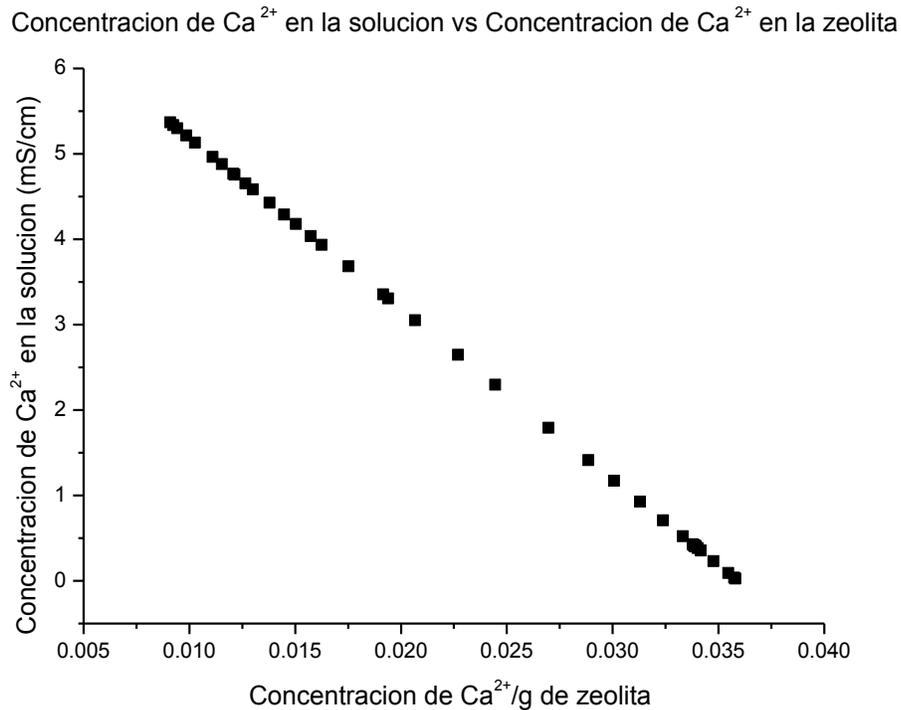


Figura 4.6 Comportamiento del intercambio iónico entre el calcio en la solución y el calcio depositado en la zeolita.

La composición química de las zeolitas empleadas en la experimentación se determinó para los diferentes elementos (Si, Ti, Al, Fe etc.) mediante el análisis por fluorescencia de rayos X realizados por la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química de la UNAM.

Tabla 4.14. Resultados de análisis por fluorescencia de rayos X de la zeolita usada en la experimentación. Análisis realizados por la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la F. Q. UNAM (Diciembre 2009).

Muestra	%SiO ₂	%TiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%MnO	%MgO	%CaO	%Na ₂ O	%K ₂ O ₂	%P ₂ O ₅	Suma
Zeolitas	73.78	0.256	15.55	1.565	0.155	1.318	4.321	0.561	2.399	0.030	99.94

De acuerdo con los resultados que se muestran en la Tabla 4.14, la relación Al/Si es de 0.21, y el contenido de calcio es mayor que la de sodio, por lo que se tiene una zeolita con baja sílica. Existen otros tipos de zeolitas con capacidad de intercambio iónico mayores que la Clinoptilolita. Las zeolitas son excelentes medios filtrantes ya que tienen además de un efecto físico en las partículas en suspensión, un efecto químico en los componentes en solución. La Tabla 4.15 muestra la caracterización fisicoquímica del agua tratada mediante la columna de zeolitas.

Tabla 4.15 Caracterización fisicoquímica del agua tratada con hidróxido de calcio y zeolitas.

Parámetro	Agua tratada con Ca(OH)_2	Agua tratada con Ca(OH)_2 y zeolitas
	Valor promedio	Valor promedio
Tensión superficial, σ (dinas/cm)	51.9 \pm 1.65	48.1 \pm 0.20
Conductividad eléctrica, Λ (mS/cm)	7.18 \pm 1.42	4.11 \pm 0.30
Turbidez (NTU)	1.83 \pm 1.01	0.20 \pm 0.13
pH	12.1 \pm 0.46	11.4 \pm 0.46
Dureza total (mg/L CaCO_3)	1719 \pm 17.7	150 \pm 0.50

4.9 Caracterización fisicoquímica del agua tratada

La caracterización del agua tratada se efectuó mediante los métodos fisicoquímicos de: tensión superficial, turbidez, pH, conductividad y dureza (Apéndice B). La Tabla 4.16 muestra los valores promedio de los parámetros medidos para cada uno de los tratamientos propuestos en la experimentación.

Tabla 4.16 Caracterización fisicoquímica del agua gris y del agua tratada.

Parámetro	Agua Gris	Ca(OH)₂	Ca(OH)₂ y CO₂	Ca(OH)₂ y Alumbre	Ca(OH)₂ y Clorhidróxido de aluminio	Ca(OH)₂ y Carbonato de calcio	Ca(OH)₂ y Tequesquite	Ca(OH)₂ y Zeolitas
Tensión superficial, σ (dinas/cm)	36.8 ± 1.41	51.9 ± 1.65	49.4 ± 0.35	52.6 ± 0.01	54.2 ± 0.01	46.1 ± 1.65	45.1 ± 0.20	48.1 ± 0.20
Conductividad eléctrica, Λ (mS/cm)	1.39 ± 0.41	7.18 ± 1.42	1.11 ± 1.05	3.53 ± 0.16	3.54 ± 0.40	6.48 ± 1.42	6.99 ± 0.30	4.11 ± 0.30
Turbidez (NTU)	115 ± 8.31	1.83 ± 1.01	0.90 ± 0.55	1.02 ± 0.40	0.20 ± 0.10	1.19 ± 0.62	0.87 ± 0.45	0.20 ± 0.13
pH	8.10 ± 0.76	12.1 ± 0.46	7.02 ± 0.22	7.17 ± 0.02	7.18 ± 0.01	12.0 ± 0.19	12.0 ± 0.06	11.4 ± 0.46
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	170 ± 7.07	1719 ± 17.7	15 ± 0.10	15 ± 0.10	15 ± 0.10	15 ± 0.10	38 ± 0.07	150 ± 0.50

4.10 Caracterización biológica de las aguas grises y tratadas

La caracterización biológica de las aguas grises y tratadas se efectuó con la determinación de la Demanda Química de Oxígeno y Determinación de Huevos de Helminto (Apéndice B). Es importante señalar que no se efectuaron todas las pruebas indicadas en la norma mexicana que define los límites máximos permisibles de contaminantes en el agua tratada para su reuso (NOM-003-SEMARNAT-1997), sobre Coliformes Fecales, Grasas y Aceites, SST y DBO₅, debido a que no fue necesario por el tipo de fuente de donde se recibe el agua gris (primer descarga de lavadora) y por tanto se considera que la carga orgánica contenida es de baja concentración.

Las pruebas efectuadas para la determinación de DQO miden la cantidad de materia orgánica e inorgánica oxidable químicamente (Apéndice B.3.1). Los resultados de la Tabla 4.17 muestran que para el agua gris se tiene una DQO alta (considerando que una DQO baja según la norma es menor a 75 mg/L) de 311.7 ± 8.69 mg/L, mientras que para la que se efectuó el tratamiento con zeolitas es muy bajo (40.41 ± 3.34). Los resultados de DQO para el agua tratada con hidróxido de calcio y minerales resultó ser más alta que la que se reporta para el agua gris, esto se debe a los compuestos químicos involucrados para el tratamiento. Las pruebas se efectuaron por triplicado.

En la determinación de huevos de helminto, no se detectó ningún tipo de especie de huevo de acuerdo a lo señalado en la norma (NMX-AA-113-SCFI-1999). La Tabla 4.18 muestra los resultados de las muestras analizadas. Esta prueba no exenta que todas las muestras de agua gris no contengan huevos de helminto.

Tabla 4.17 Resultados de DQO.

Muestra	DQO (mg/L)
Agua gris	311.7 ± 8.69
Agua tratada con Ca(OH) ₂	156.3 ± 4.42
Agua tratada con Ca(OH) ₂ + CO ₂	120.5 ± 2.89
Agua tratada con Ca(OH) ₂ + Na ₂ CO ₃	384.1 ± 18.9
Agua tratada con Ca(OH) ₂ + Tequesquite	340.7 ± 26.5
Agua tratada con Ca(OH) ₂ + Al ₂ (SO ₄) ₃	183.8 ± 15.1
Agua tratada con Ca(OH) ₂ + Al ₂ (OH) ₅ Cl	210.8 ± 21.9
Agua tratada con Ca(OH) ₂ y zeolitas.	40.41 ± 3.34

Tabla 4.18 Resultados de la determinación de huevos de helminto.

Muestra	Análisis en el microscopio
Agua gris	No se encontró ningún tipo de especie de huevos de helminto
Agua tratada con Ca(OH) ₂	No se encontró ningún tipo de especie de huevos de helminto
Lodos del precipitado resultante de la reacción entre los jabones y el Ca(OH) ₂	No se encontró ningún tipo de especie de huevos de helminto

4.11 Propuesta

Como una alternativa de proceso para el tratamiento del agua gris en el hogar es el empleo de cal y alumbre. La cantidad que se requiere de cada uno de los materiales depende de la concentración de las aguas grises a tratar. La calidad del agua recuperada satisface los requerimientos para su reuso en servicios sanitarios y de lavado. Se propone un diagrama de proceso (Figura 4.7) para el sistema de tratamiento. Los materiales empleados así como los costos aproximados se indican en la Tabla 4.18.

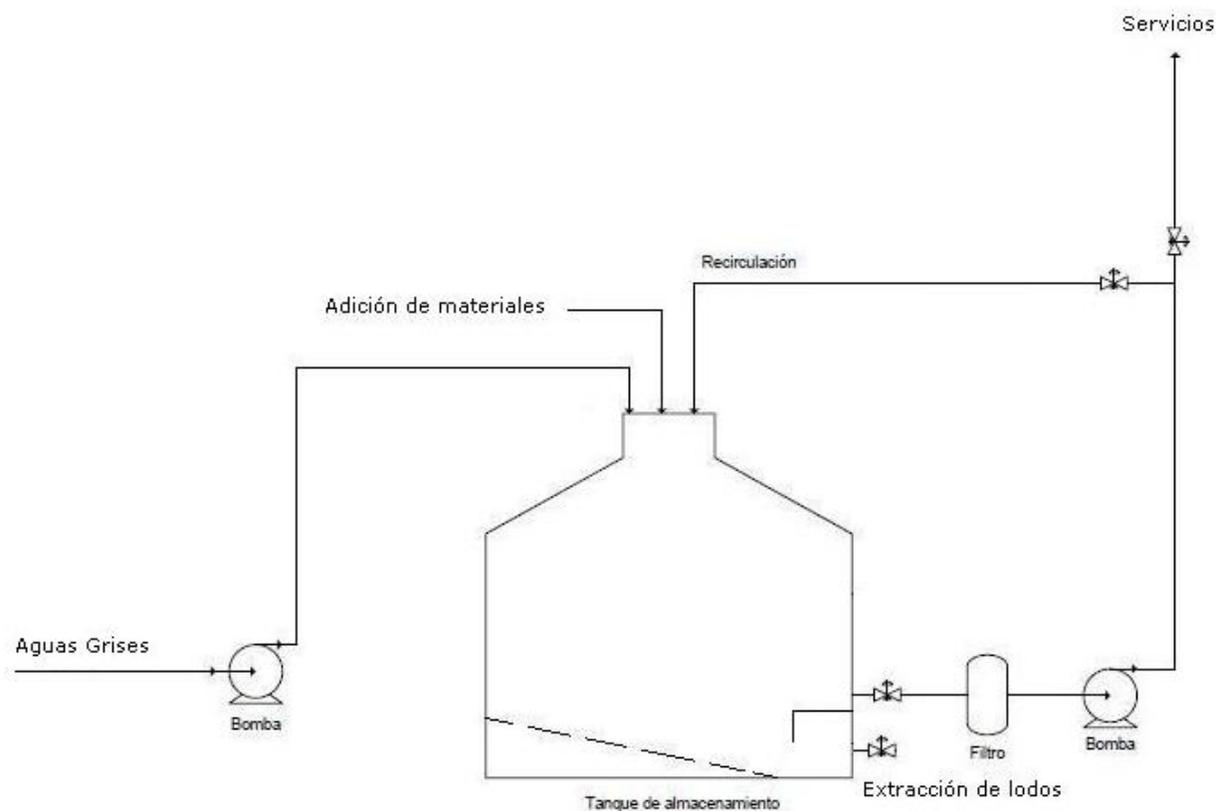


Figura 4.7 Diagrama de proceso para el tratamiento de aguas grises en el hogar.

Tabla 4.18 Lista de materiales para el proceso de tratamiento de agua gris en el hogar.

Material	Costos (pesos)
Tanque de almacenamiento (1100 L)	1,367 ²
Bomba (1/2 HP)	867 ³
Filtro	168 ⁴
Tubería PVC	26.5 ⁵
Hidróxido de calcio (cal)	5 ⁶
Alumbre	14 ⁷

² Precio por unidad. Marca Rotoplas.

³ Precio por unidad. Marca Siemens.

⁴ Precio por unidad. Marca Rotoplas.

⁵ Precio por metro, tubería de 4".

⁶ Precio por Kg.

⁷ Precio por Kg.

4.12 Residuos

Los residuos sólidos son producidos por la precipitación de contaminantes del agua mediante el proceso de tratamiento. Para el manejo de los lodos producidos en el sistema de tratamiento de las aguas grises, es necesario deshidratarlos. Estos lodos se dejan secar en lechos al sol, dichos lechos deben contener membranas impermeables para proteger el suelo y evitar que se percole algo a los mantos freáticos. Cuando los lodos se secan, se remueven como finas capas que se llevan a un tratamiento posterior. Para lograr su adecuada disposición es necesario seguir los lineamientos establecidos en la normatividad (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Se proponen en esta investigación métodos fisicoquímicos que involucran procesos económicos y de fácil manejo que permiten eliminar contaminantes presentes en el agua a niveles aceptables de calidad para la reutilización de las aguas grises tratadas provenientes del hogar o la industria.

El empleo de hidróxido de calcio (cal) como primera etapa de tratamiento permite la eliminación de los tensoactivos iónicos y la adsorción de gran parte de los tensoactivos no iónicos, además de ayudar a eliminar las bacterias presentes en el agua gris debido al pH alcalino que alcanza la solución.

Para eliminar el exceso de hidróxido de calcio en solución que influye en el pH y en la dureza del agua, se desarrollaron procesos alternativos como segunda etapa del tratamiento de las aguas grises. Para la disminución en la dureza el uso de carbonato de sodio, tequesquite y zeolitas. Para la estabilización del pH así como en la disminución en la dureza se empleó dióxido de carbono, alumbre y clorhidróxido de aluminio.

La alternativa de utilizar cal y alumbre para el tratamiento de las aguas grises en el hogar es de las mejores debido a la calidad del agua resultante para los usos, además por la facilidad de adquisición de los materiales. Sin embargo, a nivel industrial la mejor alternativa es el uso de CO₂ que se genera en ciertos procesos, ya que podría aprovecharse como segunda etapa para el tratamiento de agua y así contribuir con la disminución de la contaminación atmosférica.

La sencillez operacional y bajo consumo de los reactivos hacen que el tratamiento del agua gris sea accesible. Estas ventajas hacen que el implemento de este tipo de tecnología no requiera de capacitación especializada. Los procesos pueden adaptarse a distintas escalas tanto en el hogar como en la industria ya que satisfacen los requerimientos de la calidad del agua para su reuso recomendado en los servicios sanitarios, riego y lavado.

Figuras complementarias al texto

Figura 1.1 Disponibilidad promedio de agua en diversos países¹.

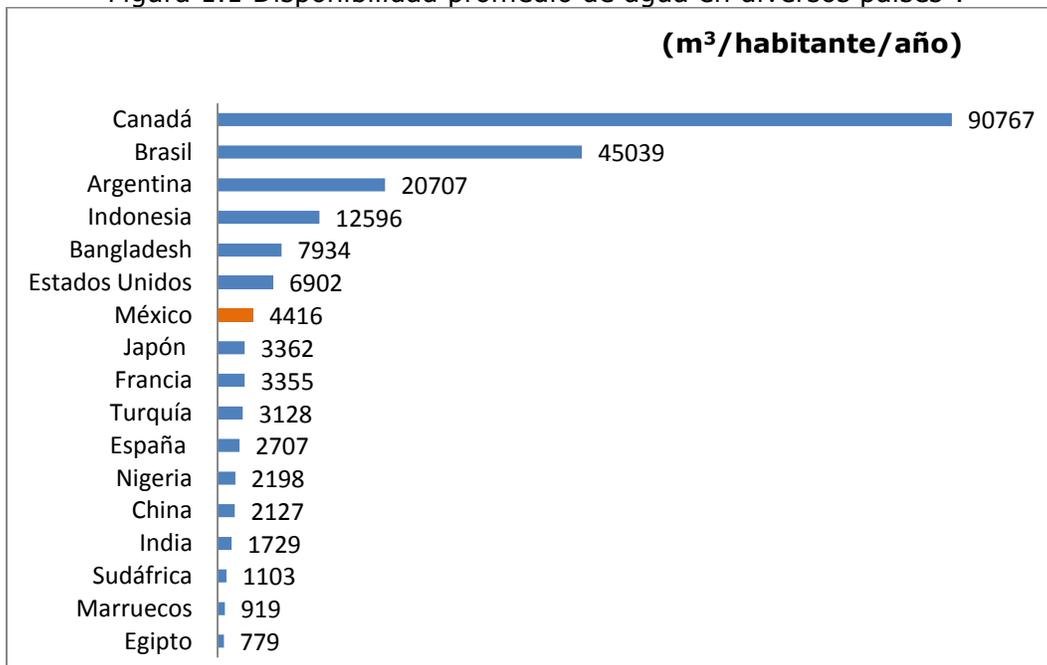


Figura 1.2 Tarifas domésticas de agua potable, saneamiento e impuestos asociados al servicio, en algunas ciudades del mundo, pesos/m³. (Consumo de 15m³/mes).²

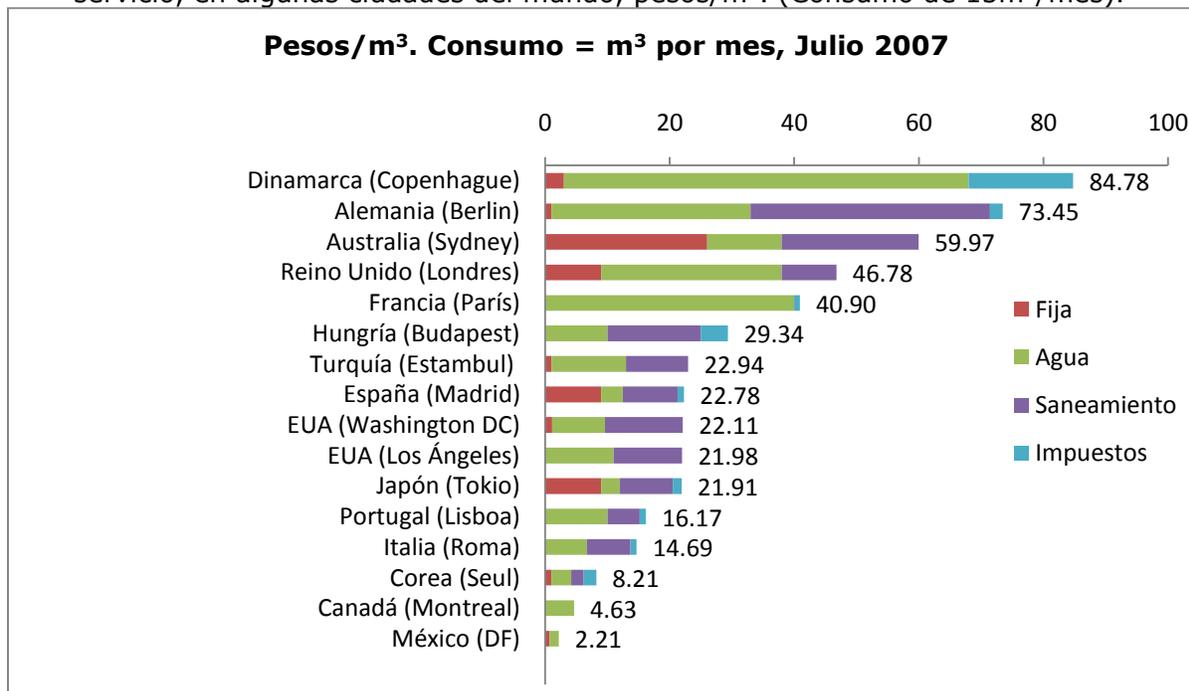
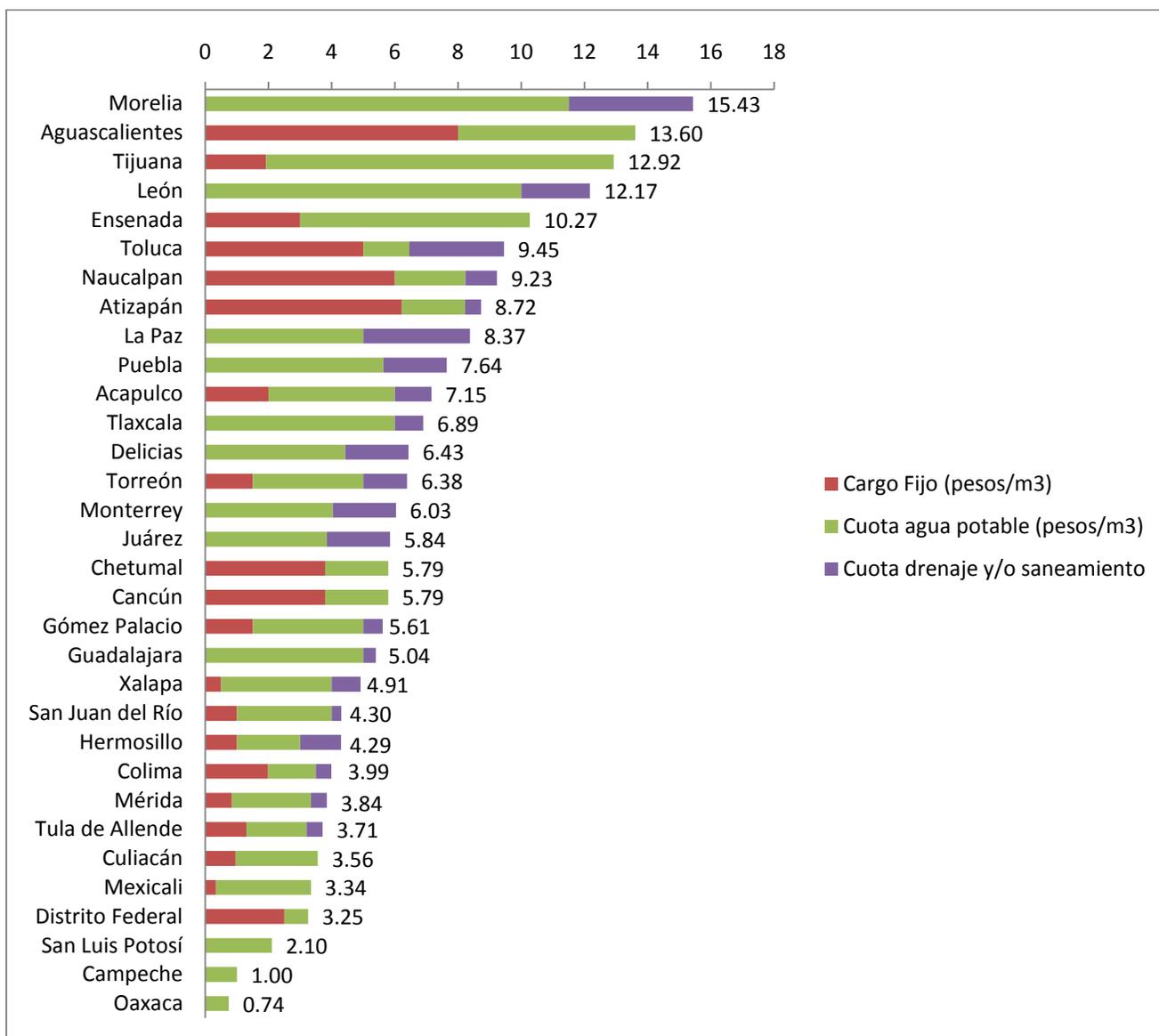


Figura 1.4 Tarifas domésticas de agua potable, alcantarillado y/o saneamiento en algunas ciudades, 2007. (pesos/m³)².



A.1 Referencias

- ¹ Programa nacional hídrico 2007-2012. Junio 2008. CONAGUA.
- ² Estadísticas del agua en México. Edición 2008. CONAGUA.

Parámetros de caracterización

B.1 Introducción

Los métodos fisicoquímicos se llevan a cabo mediante una toma de muestras, con determinación de sus características físicas y con análisis de sus componentes químicos. Estos métodos dan una información valiosa, pero se refieren únicamente al instante en que se obtuvo la muestra; pueden dar resultados muy alarmantes o, por el contrario, pasar desapercibidos ciertos factores que pueden ser decisivos para un uso determinado del agua. No indican el estado anterior al de la toma de muestras ni la capacidad de recuperación natural después de un aporte contaminante, tanto en el tiempo como en el espacio.

La caracterización biológica del agua parte de la determinación del grado de alteración de la condición biológica de la misma cuando se introducen sustancias tóxicas o materia orgánica que pueda descomponerse. La importancia de la evaluación biológica de la calidad de un agua reside tanto en la caracterización de la carga contaminante como en su capacidad de autodepuración biológica, que no puede determinarse exactamente con ningún método químico. La carga contaminante se puede valorar con determinaciones individuales, pero la integración de los cambios producidos por dicha carga y sus efectos a largo plazo sólo pueden indicarlos los análisis biológicos.

B.2 Parámetros fisicoquímicos

B.2.1 Tensión superficial

Con base en la técnica del método del anillo¹ se llevaron a cabo las determinaciones de tensión superficial para las muestras. Este método se basa en medir la fuerza necesaria para separar un anillo de la superficie, bien suspendido el anillo del brazo de una balanza, o utilizando un sistema de hilo de torsión. La fuerza para despegarlo está relacionada con la tensión superficial o interfacial por la expresión:

$$\gamma = \frac{\beta * f}{4 * \pi * r}$$

Donde f es el empuje aplicado al anillo en dinas, r es el radio medio del anillo y β es un factor de corrección. Para tener un ángulo de contacto cero, se utilizan anillos de platino perfectamente limpios. Es esencial que el anillo repose plano sobre la superficie líquida. La tensión superficial actúa sobre toda la circunferencia de este anillo, y la nueva superficie que se forma posee dos lados (la superficie externa y la superficie interna).

El equipo empleado para las mediciones consiste en una balanza digital marca Ohaus de 0.001 de sensibilidad, un elevador mecánico, cajas petri y un anillo de platino de $D = 5.992\text{cm}$ y $R/r = 53.6$. El anillo es colocado en un gancho con el que cuenta la balanza digital en la parte inferior, con el elevador mecánico se pone en contacto la solución a medir de la caja petri con el anillo, posteriormente se hace descender el elevador hasta que el anillo se desprenda de la solución, registrando en la balanza el peso máximo que ejerce la solución en el anillo de platino por efecto de su tensión superficial. Este peso se transforma a tensión superficial mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{m * g}{4 * \pi * R} * f$$

Donde γ es la tensión superficial del líquido en dinas/cm, m es el valor máximo del peso del líquido levantado por el anillo en gramos, g es la aceleración de la gravedad = 977.94 cm/s², $\pi = 3.1416$, R es el radio del anillo medido desde el centro del anillo hasta el centro del alambre y f es el factor de corrección.

B.2.2 Conductividad

La conductividad eléctrica de una solución se define como el inverso de la resistencia eléctrica que se observa en la solución, al circular corriente en condiciones reguladas. La unidad habitual de conductividad de soluciones resulta ser mS/cm. La conductividad que varía en función de la temperatura, está estrechamente ligada a la concentración de sustancias disueltas y a su naturaleza. A pesar de ser un parámetro muy general (pues la conductividad de una solución depende de todas las especies iónicas en solución) resulta útil porque refleja la salinidad total de una solución de proceso. Una aplicación clásica es en el control de pureza de aguas; por ejemplo, si se desea monitorear o controlar la pureza del agua obtenida en un sistema de intercambio iónico.

La medición de la conductividad para las muestras experimentales se efectuó utilizando un conductímetro digital marca Metrohm de sensibilidad 0.0001 mS/cm, previamente calibrado. La celda del conductímetro es introducida en la muestra hasta que el valor mostrado en la pantalla del equipo se mantiene constante. Se registra la temperatura a la cual fue tomado el dato de conductividad ya que la temperatura es función de la conductividad.

B.2.3 Turbidez

La turbidez del agua es debida a la presencia de materias en suspensión finamente divididas: arcillas, limos, granos de sílice, materia orgánica, etc. La apreciación de la abundancia de estas materias mide el grado de turbidez. La turbidez es tanto mayor cuanto mayor es la contaminación del agua, por lo que es un indicador de interés en el control de la eficacia de los procesos de depuración. La turbidez se mide en unidades nefelométricas de turbidez, o *Nefelometric Turbidity Unit* (NTU), el instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.

El instrumento utilizado para las determinaciones en esta experimentación es un turbidímetro digital marca Orbeco-Hellige de 0.01 NTU de sensibilidad. Antes de iniciar el análisis de las muestras, se coloca la celda que contiene una sustancia de 40 NTU para calibrar el aparato y así obtener datos confiables en las próximas determinaciones de cada celda.

B.2.4 pH

Mide la concentración de iones hidrógeno en el agua. Un pH elevado indica una baja concentración de iones H^+ , y por lo tanto una alcalinización del medio. Por el contrario un pH bajo indica una acidificación del medio. Estas variaciones tienen una repercusión muy importante sobre las biocenosis existentes. Las determinaciones del pH del agua se realizan por métodos colorimétricos o electrométricos, estos últimos se utilizan para medidas más precisas. Un pHmetro es un instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia (generalmente de

plata/cloruro de plata) y un electrodo de vidrio que es sensible al ion hidrógeno.

El pH típicamente va de 0 a 14 en disoluciones acuosas, siendo ácidas las disoluciones con pH menores a 7, y básicas las que tienen pH mayores a 7. El pH = 7 indica la neutralidad de la disolución (siendo el disolvente agua). El valor del pH se midió mediante un pHmetro digital marca Oakton de 0.01 unidades de sensibilidad, previamente calibrado.

B.2.5 Dureza

Las aguas que contienen cantidades altas de calcio y de magnesio, se les da el nombre de "aguas duras". Concentraciones bajas de carbonato de calcio, previenen la corrosión de las tuberías metálicas, produciendo una capa delgada protectora. Cantidades elevadas de sales de calcio, se descomponen al ser calentadas, produciendo incrustaciones dañinas en calderas, calentadores, tuberías y utensilios de cocina, también interfieren con los procesos de lavado doméstico e industrial, ya que reaccionan con los jabones, produciendo jabones de calcio insolubles, que precipitan y se depositan en las fibras, tinas, regaderas, etc.

Existen dos tipos de dureza: *Dureza Temporal*: Esta determinada por el contenido de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. Puede ser eliminada por ebullición del agua y posterior eliminación de precipitados formados por filtración, también se le conoce como "Dureza de Carbonatos". *Dureza Permanente*: está determinada por todas las sales de calcio y magnesio excepto carbonatos y bicarbonatos. También se le conoce como "Dureza de No carbonatos". No puede ser eliminada por ebullición del agua, su remoción únicamente es por medio de ablandamiento con cal, cal-soda e

intercambiadores iónicos como zeolitas y ciertas resinas. En la Tabla B.1 está indicada la interpretación de la dureza.

Tabla B.1. Interpretación de la Dureza:

Dureza como CaCO₃ (mg/L)	Interpretación
0 - 75	Agua suave
75 - 150	Agua poco dura
150 - 300	Agua dura
> 300	Agua muy dura

Las normas internacionales, establecen como límite máximo permisible 300 mg/L de dureza. En México, la norma (NOM 127 SSA1 1994) establece como límite máximo permisible 500 mg/L. La mayoría de los suministros de agua potable tienen un promedio de 250 mg/L de dureza. Para el agua utilizada en calderas, el límite es de 0 mg/L de dureza. Esta norma, establece además, el procedimiento de potabilización para la remoción de dureza por medio de ablandamiento químico o intercambio iónico (ambos basados en los principios de la coagulación y precipitación).

Determinación de dureza

La determinación de la dureza, tanto la de calcio como la total, se realiza por el método de titulación con ácido Etilen - Diamino - Tetra - Acético (EDTA). El método se basa en la formación de complejos por la sal disódica del ácido con los iones calcio y magnesio. El método consiste en una valoración empleando un indicador visual de punto final, el negro de eriocromo T, que es de color rojo en la presencia de calcio y magnesio y vira a azul cuando estos se encuentran acomplejados o ausentes. El complejo del EDTA con el calcio y el magnesio es más fuerte que el que estos iones forman con el negro de eriocromo T, de manera que la competencia por los iones se

desplaza hacia la formación de los complejos con EDTA desapareciendo el color rojo de la disolución y tornándose azul.

Reactivos

- Solución Buffer PH 10: se disolvieron 6.56g de NH_4Cl y 57 ml de NH_4OH en agua destilada y se aforó a 100 mL.
- Solución de Eriocromo Negro T: se disolvieron 0.5 g de Eriocromo negro T y 4.5 gr. de clorhidrato de hidroxilamina en 100 mL de etanol.
- Solución de EDTA (sal disódica): se disolvieron 2 gr de EDTA (sal disódica) más 0.05 gr de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en agua destilada y se aforó a 1000 ml.
- Solución de CaCl_2 0.01 N: se disolvieron 0.5 gr de CaCO_3 secado a 110°C durante 2 horas en 10 ml de HCl 3N y se aforó a 1000 mL con agua destilada.

Procedimiento

La estandarización del EDTA (sal disódica) se efectuó colocando 5 mL de solución de CaCl_2 en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, añadiendo 5 gotas de solución buffer de pH 10 y 3 gotas de indicador de Eriocromo negro T. Apareció un color púrpura en presencia de iones de calcio y magnesio, se procedió a titular con la solución de EDTA cuya normalidad se desea conocer, se terminó hasta la aparición de un color azul.

Para la dureza total, se tomó con una probeta una muestra de 5 mL para transferirlos a un matraz Erlenmeyer de 125 mL, se añadieron 5 gotas de la solución buffer pH 10 y se mezcló, se agregaron tres gotas de la solución de Eriocromo negro T y se procedió a titular con la solución de EDTA 0.01N hasta notar el vire de color púrpura a azul. Para la dureza de calcio, se tomó con una probeta una muestra de 5 mL para transferirlos a un matraz Erlenmeyer de 125 mL, al tener un pH 12 en la muestra, se agregó

directamente 0.2g de indicador murexida y se valoró con la solución de EDTA 0.01N hasta que el color cambió de rosa a púrpura.

Cálculos

La dureza total se calculó de la siguiente manera:

$$\frac{meq}{L} Ca^{2+} y Mg^{2+} = \frac{V \times N \times 1000}{mL \text{ de muestra}}$$

Dureza total en mg/L CaCO₃:

$$\frac{mg}{L} CaCO_3 = \left(\frac{meq}{L} Ca^{2+} y Mg^{2+} \right) \times 50$$

Donde V son los mL gastados de EDTA y N la normalidad del EDTA, el valor constante de 50 es determinado por los mg de CaCO₃ equivalentes a 1mL de EDTA mediante su estandarización. Para la estandarización del EDTA se siguió la siguiente fórmula, donde N₂ es la normalidad del EDTA, V₁ mL de la solución de CaCl₂ y V₂ son los mL gastados de EDTA:

$$N_2 = \frac{V_1 \times N_1}{V_2}$$

B.3 Parámetros biológicos

B.3.1 Demanda química de oxígeno (DQO)

Introducción

Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte. De acuerdo a la norma³ NMX-AA-030-SCFI-2001 se describen dos métodos para la determinación de DQO con dicromato. El método a reflujo abierto es conveniente para aguas residuales en donde se requiera utilizar grandes cantidades de muestra. El método a reflujo cerrado

es más económico en cuanto al uso de reactivos, pero requiere una mayor homogeneización de las muestras que contienen sólidos suspendidos para obtener resultados reproducibles.

Una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos son oxidados con una mezcla de ácido crómico y sulfúrico a ebullición. La muestra se coloca a reflujo en una disolución de ácido fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). Después de la digestión, el dicromato no reducido se mide por titulación o espectrofotométricamente para determinar la cantidad de dicromato consumido y calcular la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente.

Reactivos

- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$)
- Sulfato mercúrico ($HgSO_4$)
- Sulfato de plata (Ag_2SO_4)
- Disolución de sulfato de plata en ácido sulfúrico. Pesar aproximadamente y con precisión 15 g de sulfato de plata y disolver en 1 L de ácido sulfúrico concentrado. El sulfato de plata requiere un tiempo aproximado de dos días para su completa disolución. La disolución formada debe mantenerse en la obscuridad para evitar su descomposición.
- Disolución de digestión A. Pesar aproximadamente y con precisión 10.216 g de dicromato de potasio, previamente secado a $103^\circ C$ por 2 h, y añadirlos a 500 mL de agua, adicionar 167 mL de ácido sulfúrico concentrado y aproximadamente 33.3g de sulfato mercúrico. Disolver y enfriar a temperatura ambiente. Aforar a 1 L con agua.

Procedimiento (Método espectrofotométrico)

Se tomaron 10 mL de la muestra a cuantificar, se filtró a vacío utilizando papel filtro de microfibra de vidrio GF/B de 55 mm de diámetro. Se vertieron 2.5 mL del filtrado en un tubo de reacción. La prueba se efectuó por triplicado.

Se agregaron 2.5 mL de la solución digestora A ($K_2Cr_2O_7$, H_2SO_4 , $HgSO_4$) en cada una de las muestras, observando que estas se tornan a un color amarillo debido al dicromato de potasio. Se agregaron cuidadosamente (debido a que es una reacción exotérmica) 3.5 mL de la disolución de sulfato de plata en ácido sulfúrico. Se agitaron. Se mantuvieron en la estufa a $165^\circ C$ durante una hora para llevar a digestión, posteriormente se dejaron enfriar a temperatura ambiente, se metieron a la centrífuga a 4000 rpm durante 15 min para lograr sedimentar lo más posible y así obtener mejores lecturas en el espectrofotómetro. Se tomaron los datos de absorbancia.

B.3.2 Huevos de helminto

Introducción

Helmintos, es el término designado a un amplio grupo de organismos que incluye a todos los gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales) y de vida libre, con forma y tamaños variados. Poseen órganos diferenciados, y sus ciclos de vida comprenden la producción de huevos o larvas, infecciosas o no y la alternancia compleja de generaciones que incluye hasta tres huéspedes diferentes.

Los helmintos representan un elevado riesgo a la salud humana debido a que sus diversos estadios infecciosos (huevos embrionados o larvas) son altamente persistentes en el agua contaminada. Así, el agua constituye un

vehículo directo o indirecto de diseminación de helmintos, aun cuando se encuentren en bajas concentraciones, dando lugar a enfermedades gastrointestinales, sobre todo cuando esta se emplea para el riego de cultivos. La norma mexicana⁴ NMX-AA-113-SCFI-1999 establece el método para la detección y enumeración de huevos de helminto en aguas residuales y lodos, con el fin de evaluar la calidad del agua y la eficiencia de los sistemas de tratamiento de la misma. Este método de análisis se basa en la diferencia de densidades entre los huevos de helminto, las demás sustancias presentes en las aguas residuales, y las que se agregan para permitir la separación. El método comprende los procesos de coagulación, sedimentación, flotación, decantación y la técnica bifásica para recuperar los huevos de helminto y efectuar el conteo.

Reactivos (grado analítico)

- Ácido sulfúrico (H_2SO_4)
- Alcohol etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
- Agua destilada
- Cloruro de sodio (NaCl)
- Éter etílico
- Sulfato de zinc heptahidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).
- Solución de sulfato de zinc (ZnSO_4) con gravedad específica de 1.3. Disolver 800 g de sulfato de zinc heptahidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en 1000 mL de agua destilada; mezclar en la parrilla magnética hasta homogeneizar totalmente. Medir la densidad con el densímetro. Ajustar la densidad a 1.3 agregando sulfato de zinc o agua destilada, según sea el caso.
- Solución de alcohol-ácido. Homogeneizar 650 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.1 N, con 350 mL de alcohol etílico. Almacenar la solución en un recipiente hermético.

Procedimiento

Para las muestras de agua: Se tomó una muestra de agua de 5L en un recipiente de plástico inerte de paredes lisas.

Para la muestra de sólidos: Se trataron 5L de agua gris con cal, del precipitado se tomó una alícuota de 5mL y se dejó en la estufa durante 2 horas a 106°C en un recipiente de aluminio de peso constante, previamente pesado. Se pesó nuevamente el recipiente de aluminio y se determinó el peso de los sólidos para calcular la relación de sólidos del precipitado a tratar. Se tomó la alícuota necesaria, se vertió en un recipiente de plástico inerte de paredes lisas y se le agregaron 5L de agua corriente.

La muestra a tratar se dejó toda la noche para que sedimentaran los sólidos. Se removió el líquido con ayuda de vacío, cuidadosamente para no mover el sedimento. El sedimento se vertió en tubos para centrifugar durante 6 min a 3000 rpm, a los tubos se les retiró el exceso de líquido con ayuda de vacío, cuidando que la pastilla que se forma no se deshiciera. Se agregaron 45mL de $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ en cada tubo y se dejaron en la centrífuga durante 4 min a 3000 rpm, debido a la diferencia de densidades en caso de que existir huevos de helminto, habrán quedado sobre la parte líquida. Se recuperó el sobrenadante en un recipiente de plástico de 2L de capacidad y de paredes lisas. Se diluyó el sobrenadante en 1.5L de agua destilada. Se desechó la pastilla. Se dejó sedimentar toda la noche.

Se removió el líquido con ayuda de vacío, cuidadosamente para no mover el sedimento. El sedimento se vertió en tubos para centrifugar durante 3 min a 3000 rpm, a los tubos se les retiró el exceso de líquido con ayuda de vacío, cuidando que la pastilla que se forma no se deshiciera. Se agregaron en cada tubo 15 mL de la solución de alcohol-ácido 0.1N y 10mL de éter etílico, se agitaron y se destaparon para dejar escapar el gas. Se dejaron en la

centrífuga durante 5min a 3000rpm. Se retiró el exceso de éter etílico con ayuda de vacío. Se agregaron 45mL de H₂SO₄ 0.1N en cada tubo, se agitaron y posteriormente se dejaron en la centrifuga. Se retiró el exceso de H₂SO₄ 0.1N con ayuda de vacío, dejando una mínima parte del fondo. Se observó al microscopio.

B.4 Referencias

- ¹ Harkins, W. y Jordan, H. Method for the determination of surface and interfacial tension from the maximum pull on a ring. *Journal of the american chemical society*, 52 (1930) 1751 – 1772.
- ² Seoáñez, M. Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo. *Ingeniería del medio ambiente*. Ed. Mundiprensa. España, 2004. Pp. 103-105.
- ³ NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.
- ⁴ NMX-AA-113-SCFI-1999. Análisis de agua – Determinación de huevos de helminto – Método de prueba.

Información de los materiales

C.1 Materiales

Tabla C.1 Lista de materiales empleados en la experimentación

Nombre	Fórmula química	Marca
Hidróxido de calcio	Ca(OH)_2	Grupo Calidra
Dióxido de carbono	CO_2	S/N
Carbonato de sodio	Na_2CO_3	S/N
Tequesquite	NaHCO_3 y Na_2CO_3 , NaCl , NaSO_4 y SiO	S/N
Alumbre	$\text{KAl(SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	S/N
Clorhidróxido de aluminio	$\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$	S/N
Zeolita Clinoptilolita	$(\text{Na},\text{K},\text{Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al},\text{Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	La paradoja

C.2 Costos

Tabla C.2 Lista de costos de los materiales empleados en la experimentación²

Producto	Costo/Kg (pesos)	Marca
Hidróxido de calcio	2.5	Grupo Calidra
Carbonato de sodio	6.52	Química Treza
Tequesquite	15.0	S/N
Alumbre	14.0	S/N
Clorhidróxido de aluminio	11.5	Polaquimia
Zeolita	3.20	La paradoja

C.3 Información técnica de los materiales

Hidróxido de calcio

Sinónimos: hidrato de calcio, cal apagada

N ° CAS: 1305-62-0

Peso molecular: 74.09 g/mol

Fórmula química: Ca(OH)_2

Identificación de los riesgos:

Salud: 2 - Moderado

Inflamabilidad: 0 - Ninguno

Reactividad: 2 - Moderado

Contacto: 3 - Severo

Equipo de Laboratorio: Anteojos protectores, bata de laboratorio, campana de extracción, guantes adecuados.

Código de Color: Verde (Almacenaje General)

Propiedades físicas y químicas:

Aspecto: Cristales blancos o polvo.

Olor: Inodoro.

Solubilidad: 0.185 g/100 cc de agua @ 0°C.

Peso específico: 2.24

pH: 12,4 (solución saturada)

Punto de ebullición: Se descompone.

Punto de fusión: 580°C

Estabilidad y reactividad:

Estabilidad: Estable bajo condiciones normales de uso y almacenamiento.

Fácilmente absorbe el dióxido de carbono del aire para formar carbonato de calcio.

Productos de descomposición peligrosos: Vapores cáusticos de forma óxido de calcio cuando se calienta hasta la descomposición (580°C). Incompatibilidades: Las reacciones violentas con anhídrido maléico, nitroetano, nitrometano, nitroparafinas, nitropropano, fósforo. Como un material fuertemente alcalino, es incompatible con ácidos. Condiciones a evitar: El aire, el polvo, e incompatibles.

Dióxido de carbono

N ° CAS: 124-38-9

Peso molecular: 44 g/mol

Fórmula química: CO₂

Identificación de los riesgos:

Los niveles de oxígeno por debajo de 19.5% pueden causar asfixia. Exposición a dióxido de carbono puede causar náuseas y problemas respiratorios. Las altas concentraciones pueden provocar una vasodilatación que conduce a un colapso circulatorio.

Propiedades físicas y químicas:

Estado físico (gas, líquido, sólido): Gas

Presión de vapor a 21 °C : 856 psia

Densidad de vapor a 21 °C, 1 atm (Aire = 1) : 1.53

Punto de ebullición (CO₂ sublima): -78,5 °C

Punto de congelación: -56,6 °C

Solubilidad (H₂O): Muy soluble

Olor y apariencia: Un gas incoloro e inodoro

Estabilidad y reactividad:

Estabilidad: Estable

Materiales incompatibles: Ciertos metales reactivos, hidruros, monóxido de cesio húmedo, o de acetileno diamino carburo de litio pueden incendiarse. Pasando de dióxido de carbono sobre una mezcla de peróxido de sodio y aluminio o magnesio, pueden explotar.

Productos de descomposición peligrosos: El monóxido de carbono y oxígeno cuando se calienta por encima de 1700 °C. Se forma ácido carbónico en presencia de la humedad.

Carbonato de sodio

N ° CAS: 497-19-8

Peso molecular: 105.99 g/mol

Fórmula química: Na₂CO₃

Identificación de los riesgos:

Ingestión: Causa irritación.

Inhalación: Dañina, deben evitarse especialmente exposiciones prolongadas.

Piel: Irritaciones y posiblemente quemaduras.

Ojos: Irritación grave, posiblemente con heridas graves.

Propiedades físicas y químicas:

Estado físico y aspecto: Sólido (polvo sólido)

Olor: Inodoro.

Sabor: Alcalinas.

Color: Blanco.

pH (sol. 1% / agua): 11.5 (básico)

Punto de ebullición: No disponible.

Punto de fusión: 851 °C

Gravedad específica: Densidad: 2.532 (Agua = 1)

Estabilidad y reactividad:

Estabilidad: El producto es estable.

Condiciones de inestabilidad: materiales incompatibles, la humedad.

Incompatibilidad con diferentes sustancias: Reactivo con ácidos.

Corrosividad: No corrosivo en presencia de vidrio.

Observaciones especiales sobre reactividad: Higroscópico. Combina con el agua con desprendimiento de calor.

Incompatible con nitrato de plata, pentóxido de fósforo, litio, flúor, fluoruros, amoníaco +, 2,4,6-trinitrotolueno, amoníaco, ácidos, sulfuro de sodio + agua, peróxido de hidrógeno, Red Metal Aluminio caliente, sulfuro de sodio, zinc, calcio hidróxido. Carbonato de sodio se descompone por ácidos con efervescencia.

Alumbre

Sinónimos: alumbre de potasio, alumbre napolitano

Peso molecular: 474 g/mol

Fórmula química: $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$

Identificación de los riesgos:

Este material se hidroliza en agua para formar ácido sulfúrico, que es responsable de los efectos irritantes a continuación.

Inhalación: Causa irritación a las vías respiratorias. Los síntomas pueden incluir tos, dificultad para respirar.

Ingestión: Causa irritación en el tracto gastrointestinal. Los síntomas pueden incluir náuseas, vómitos y diarrea. Ha habido dos casos fatales de envenenamiento de personas por la ingestión de 30 gramos de alumbre.

Contacto con la piel: Causa irritación a la piel. Los síntomas incluyen enrojecimiento, picazón y dolor.

Contacto con los ojos: Causa irritación, enrojecimiento y dolor.

Propiedades físicas y químicas:

Aspecto: Cristales transparentes.

Olor: Inodoro.

Solubilidad: Soluble en agua, insoluble en alcohol.

pH: 3.3 (0.2 M, solución en agua)

Punto de ebullición: 200°C

Punto de fusión: 92°C

Estabilidad y reactividad:

Estabilidad: Estable bajo condiciones normales de uso y almacenamiento.

Productos de descomposición peligrosos: Hidroliza para formar ácido sulfúrico diluido. Tóxicos y corrosivos de óxidos de azufre se puede formar cuando se calienta hasta la descomposición.

Incompatibilidades: Corrosiva para los metales en presencia de agua.

Condiciones a evitar: Humedad e incompatibles.

Clorhidróxido de aluminio

Fórmula química: $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$

Peso molecular: 174.41 g/mol

Identificación de los riesgos:

Daños agudos a la salud: Irritación de mucosa, dolores abdominales, irritación en la piel y ojos.

Daños crónicos a la salud: Irritación de mucosa, piel y ojos, vómito o diarrea espontánea.

Propiedades físicas y químicas:

Aspecto: Incoloro, olor característico.

Densidad relativa (agua=1) 20 °C: 1.32

Solubilidad: Soluble en agua.

Descomposición térmica: >100

pH: 3.5 – 4.5

Punto de ebullición: No se encontró información.

Estabilidad y reactividad:

Estabilidad: Estable bajo condiciones normales de uso y almacenamiento.

Productos de descomposición peligrosos: Hidroliza para formar ácido sulfúrico diluido. Tóxicos y corrosivos de óxidos de azufre se puede formar cuando se calienta hasta la descomposición.

Incompatibilidades: Corrosiva para los metales en presencia de agua.

Condiciones a evitar: Humedad e incompatibles.

Zeolitas

Propiedades físicas y químicas:

La clinoptilolita que es un aluminosilicato de sodio, potasio y calcio hidratado que tiene la fórmula molecular: $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}_{0.5}, \text{Sr}_{0.5}, \text{Ba}_{0.5}, \text{Mg}_{0.5})_6[\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}]\sim 20\text{H}_2\text{O}$. Es una zeolita que pertenece a la familia de la heulandita, junto con la laumontita y la mordenita, entre otras. La composición química de las series heulandita-clinoptilolita (heu-clino) se caracterizan por cambios marcados en la relación Si/Al, así como en la composición de cationes intercambiables. Los miembros de estas series se distinguen de acuerdo a su contenido de sílica (alta sílica vs. baja sílica). Las zeolitas de baja sílica son ricas en calcio y a menudo contienen Ba y Sr, mientras que las zeolitas con alta sílica son ricas en potasio, sodio y magnesio. De los cationes de metales alcalinos, el potasio es el más común de la clinoptilolita, aunque hay clinoptilolitas que existen en la naturaleza con alto contenido de sodio.

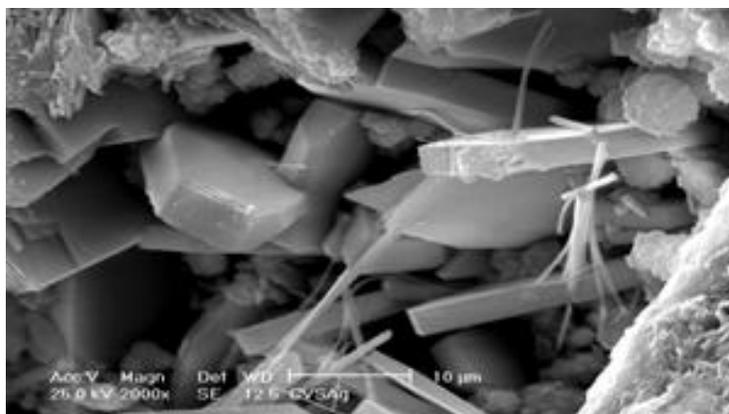


Figura C.1 Cristales de una clinoptilolita.

C.4 Referencias

- ¹ MSDS, Material Safety Data Sheet. Recuperado en Enero del 2010 de: <http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/C0407.htm>
- ² Costos: <http://www.cosmos.com.mx/f/dfgl.htm>