

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



DETERMINACIÓN DE VALORES ÓPTIMOS DE POTENCIAL DE
HIDRÓGENO Y ALCALINIDAD PARA LA REMOCIÓN DE COLOR Y
TURBIEDAD EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES
UTILIZADAS PARA CONSUMO HUMANO Y EVALUACIÓN DE
BENEFICIOS ADICIONALES

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 1997

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

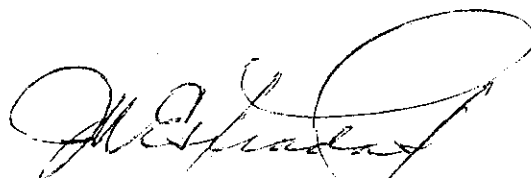
Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

DETERMINACIÓN DE VALORES ÓPTIMOS DE POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y ALCALINIDAD PARA LA REMOCIÓN DE COLOR Y TURBIEDAD EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES UTILIZADAS PARA CONSUMO HUMANO Y EVALUACIÓN DE BENEFICIOS ADICIONALES.

tema que me fuera asignado por la dirección de la escuela de

INGENIERÍA QUÍMICA

con fecha 24 de octubre de 1996



JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. HERBERT RENÉ MIRANDA BARRIOS
VOCAL 1o.	ING. MIGUEL ANGEL SÁNCHEZ GUERRA
VOCAL 2o.	ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLÓRZANO
VOCAL 3o.	ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRÍA MÉNDEZ
VOCAL 4o.	BR. VÍCTOR RAFAEL LOBOS ALDANA
VOCAL 5o.	BR. WAGNER GUSTAVO LÓPEZ CACERES
SECRETARIO	ING. GILDA MARINA CASTELLANOS DE ILLESCAS

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO	ING. JULIO ISMAEL GONZÁLEZ PODSZUECK
EXAMINADOR	ING. THELMA MARICELA CANO MORALES
EXAMINADOR	ING. WILLIAMS GUILLERMO ÁLVAREZ MEJIA
EXAMINADOR	ING. JULIO ALBERTO RIVERA PALACIOS
SECRETARIO	ING. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ LÓPEZ

Guatemala, 11 de febrero de 1997

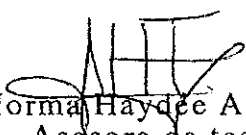
Ing. Julio Enrique Chávez Montúfar
Director, Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería, USAC

Ing. Chávez:

Por éste medio me permito informarle que una vez revisado el informe final de tesis del Sr. Jorge Mario Estrada Asturias, titulado **“Determinación de valores óptimos de potencial de hidrógeno y alcalinidad para la remoción de color y turbiedad en el tratamiento de aguas superficiales utilizadas para consumo humano y evaluación de beneficios adicionales”**, se ha encontrado satisfactorio para su aprobación. Por tanto le solicito que sea autorizado el trabajo mencionado y se proceda con los trámites posteriores a dicha aprobación.

Sin otro particular, me suscribo

Atentamente,


Ing. Norma Haydee Avendaño F.
Asesora de tesis.



Guatemala 19 de febrero de 1997

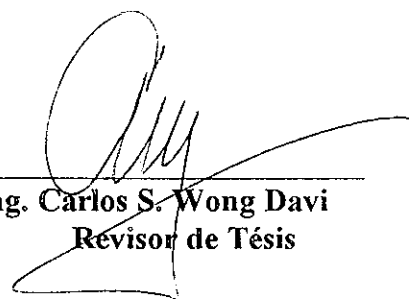
Ingeniero
Julio Enrique Chávez Montúfar
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Ciudad Universitaria

Señor Director:

por medio de la presente quiero informarle de he efectuado la revisión del informe final de tesis titulado **DETERMINACION DE LOS VALORES OPTIMOS DE POTENCIAL DE HIDROGENO Y ALCALINIDAD PARA LA REMOCION DE COLOR Y TURBIEDAD EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES UTILIZADAS PARA CONSUMO HUMANO Y EVALUACION DE BENEFICIOS ADICIONALES**, del estudiante Jorge Mario Estrada Asturias.

Considero que la misma cumple los requisitos establecidos por la Escuela de Ingeniería Química, siendo un ejemplo de aplicación de la Ingeniería Química en beneficio de la población e investigación científica.

Me suscribo de usted atentamente,



Ing. Carlos S. Wong Davi
Revisor de Tesis

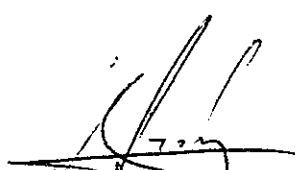


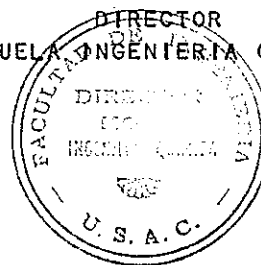
FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química; Ing. Julio Chávez Montúfar, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante; Jorge Mario Estrada Asturias titulado: **DETERMINACION DE VALORES OPTIMOS DE POTENCIAL DE HIDROGENO Y ALCALINIDAD PARA LA REMOCION DE COLOR Y TURBIEDAD EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES UTILIZADAS PARA CONSUMO HUMANO Y EVALUACION DE BENEFICIOS ADICIONALES**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Julio Chávez Montúfar
DIRECTOR
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 10 de marzo de 1,997.



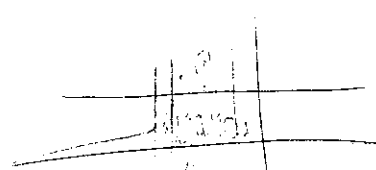
FACULTAD DE INGENIERIA

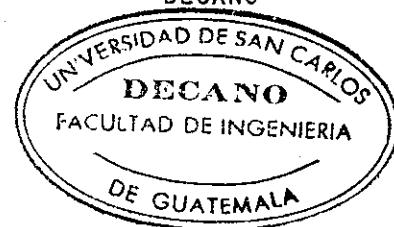
Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decanode la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **DETERMINACION DE VALORES OPTIMOS DE POTENCIAL DE HIDROGENO Y ALCALINIDAD PARA LA REMOCION DE COLOR Y TURBIEDAD EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES UTILIZADAS PARA CONSUMO HUMANO Y EVALUACION DE BENEFICIOS ADICIONALES** del estudiante **Jorge Mario Estrada Asturias** procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE


Ing. Herbert René Miranda Barrios
DECANO



Guatemala, 10 de marzo de 1,997

DEDICATORIA

A: *Carlos Eduardo Estrada Asturias⁺*

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
3. Objetivos	3
4. Hipótesis	4
5. Revisión de literatura	
5.1 El estado coloidal	5
5.1.1 Adsorción	
5.1.2 Propiedades electrocinéticas	
5.1.3 Estabilidad de los coloides	
5.2 Coagulantes y coagulación de ls coloides	7
5.3 El concepto de la carga superficial	8
5.4 Hidrólisis de Al(III) y Fe(III)	9
5.5 Historia de la coagulación	11
5.6 Necesidad del uso de coagulantes	12
5.7 Naturaleza de la turbiedad	13
5.8 Naturaleza del color	15
5.9 Naturaleza del hierro y del manganeso	18
5.9.1 eliminación del manganeso	
5.9.2 eliminación del hierro	
5.10 Naturaleza de la alcalinidad	21
5.11 Naturaleza de la dureza	24
5.11.1 dureza de calcio y magnesio	
5.11.2 dureza carbontada y no carbonatada	
5.11.3 dureza aparente	
Discusión de los resultados	27
Conclusiones	30
Recomendaciones	31
Referencias	32
Bibliografía	34
Anexo	
Resultados	37
Apéndice	
Métodos de análisis	64

1. INTRODUCCIÓN

El agua para consumo humano e industrial debe cumplir con normas de calidad que fijan límites para el contenido y concentración de las sustancias que en ella se encuentran⁽⁴⁾. Ello obliga a someter a un tratamiento a las aguas que no cumplan con las normas establecidas, como suele suceder con las aguas superficiales. Entre los parámetros que comunmente aumentan en las aguas superficiales se encuentran la turbiedad, el color, la concentración de hierro total y el manganeso, debido a la descomposición de la materia orgánica, así como a la solubilidad de los metales presentes en la tierra y en las rocas de los depósitos naturales de agua.

El proceso de coagulación en el tratamiento del agua, supone la adición de sustancias químicas que desestabilicen las suspensiones coloidales presentes, para formar flóculos que puedan ser removidos por sedimentación y filtración.

Debido a que la aplicación de coagulantes implica altos costos de operación, se hace necesaria la búsqueda de condiciones óptimas para la reducción de la cantidad de químicos que se utilicen. El presente trabajo evalúa el potencial de hidrógeno (pH) para la reducción del consumo de sulfato de aluminio, así como los beneficios adicionales del tratamiento de coagulación, tales como, la remoción de hierro y manganeso. Esta evaluación se llevó a cabo realizando el ensayo experimental denominado "Prueba de Jarras Normalizada"⁽⁵⁾ para determinar la dosis óptima de coagulante, en dos fases: una con las características naturales del agua cruda y otra, después del ajuste del valor de pH. Una tercera etapa consistió en el análisis de la concentración de hierro, manganeso, dureza total, calcio, magnesio y alcalinidad remanentes después de la coagulación y sedimentación para evaluar la eficiencia remocional, por los métodos descritos en el manual de la American Water Works Association, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater".⁽¹⁾

Para propiciar la amplitud de la aplicabilidad de la prueba de jarras, se seleccionó seis diferentes ríos de Guatemala que abastecen a plantas de tratamiento de agua potable. Los ríos seleccionados para el programa de muestreo fueron:

- 1) río **Los Plátanos**, que abastece la planta de tratamiento "La Carbonera" en Sanarate, El Progreso;
- 2) ríos **Xayá-Pixcayá**, que abastecen a la planta de tratamiento "Lo de Coy" en Mixco, Guatemala;
- 3) río **Los Esclavos**, que abastece a la población de Casillas, Santa Rosa;
- 4) río **Cucabaj**, que abastece a la planta de tratamiento municipal de Santa Cruz del Quiché, El Quiché;
- 5) río **Mayuelas**, que abastece a la planta municipal de Gualán, Zacapa, y
- 6) río **Tacó**, que abastece a la planta municipal de Chiquimula, Chiquimula.

2. ANTECEDENTES

Existe al menos una zona de valores de potencial de hidrógeno donde se produce una buena floculación. La coagulación debe efectuarse dentro de esa zona óptima, siempre que sea necesaria. Cuando se deja de operar dentro de la zona óptima puede ocurrir el aumento de costos de operación por el uso en exceso de productos químicos, o bien, la no remoción de color, turbiedad y otros parámetros del agua natural. En las aplicaciones prácticas, la dosis de coagulate y la zona óptima para la formación de flóculos debe decidirse por medio de ensayos de laboratorio, en vez de generalizaciones o de cálculos basados en supuestas ecuaciones.(2)

De acuerdo con la revisión de la bibliografía realizada en la Universidad de San Carlos de Guatemala, pudo comprobarse la existencia de trabajos que evalúan la eficiencia de diversos coagulantes. De León Acuña (5), determinó la normalización de la prueba de jarras para optimizar los parámetros de operación con sulfato de aluminio; Rivera Pomes (9), evaluó la utilización de la harina de papa (polielectrolito natural) como alternativa de ayuda en el proceso de coagulación con sulfato de aluminio y Martínez Morán (8), lo hizo con la fécula del maíz. Richter (3) menciona la importancia del potencial de hidrógeno y de la alcalinidad en el proceso de coagulación y hace referencia a rangos óptimos de operación.

Hasta la fecha no se han realizado estudios que cuantifiquen la reducción del coagulante que se utiliza en plantas de tratamiento de agua potable. Tampoco se han estudiado los beneficios adicionales que produce el ajuste previo del potencial de hidrógeno.

3. OBJETIVOS

3.1 objetivo general

Optimización de condiciones y parámetros de operación del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas superficiales utilizadas para consumo humano.

3.2 objetivos específicos

- 3.2.1 Determinar los valores óptimos de potencial de hidrógeno (pH), para obtener una coagulación eficiente por medio del uso de coagulantes metálicos, tales como el sulfato de aluminio.
- 3.2.2 Suministrar una referencia bibliográfica sobre los valores recomendables de potencial de hidrógeno (pH) del agua previo al proceso de coagulación-floculación.
- 3.2.3 Interesar, tanto a operadores de plantas de tratamiento de agua, como a otros profesionales especializados en el tratamiento de aguas superficiales, en la obtención del potencial de hidrógeno adecuado del agua cruda, para optimizar la aplicación de coagulantes metálicos.
- 3.2.4 Evaluar los efectos secundarios a la modificación de los valores de potencial de hidrógeno (pH) del agua cruda antes de la coagulación, tales como remoción de hierro y manganeso.

4. HIPÓTESIS

Es factible la reducción del consumo de coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales por medio del ajuste previo del potencial de hidrógeno (pH) del agua cruda.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 El estado coloidal

La característica distintiva de los materiales de tamaño coloidal, responsable de muchas de las propiedades características de las sustancias coloidales, es su gran superficie específica. Por ejemplo, un centímetro cúbico de un coloide compuesto de partículas cúbicas de 10^{-6} cm (10 micrómetros) por lado, tiene un área superficial de 605 m^2 . Si el mismo volumen se convierte en un solo alambre de 10 micrómetros de diámetro, la superficie es de aproximadamente dos terceras partes de ese valor, y una película delgada de 10 micrómetros de espesor tiene un tercio de esta área. Por consiguiente, solo se necesita que su dimensión sea pequeña para producir un área superficial grande. El comportamiento distintivo observado para los coloides en comparación con las suspensiones gruesas, se debe al predominio de las propiedades superficiales a un grado tal, que los términos "*química coloidal*" y "*química de las superficies*" se hacen casi sinónimos. Dos propiedades de las superficies que tienen importancia especial en los coloides son: 1) su tendencia a concentrar las sustancias en la superficie del medio que los rodea, el fenómeno de la **adsorción**, y 2) la tendencia a desarrollar carga en relación al medio circundante, dando lugar a las propiedades **electrocinéticas** de los coloides.

5.1.1 adsorción. En la forma típica de la adsorción, las sustancias de la fase gaseosa o de la solución se concentran en la superficie de un sólido finamente dividido o poroso; otra forma consiste en la concentración de los agentes superficialmente activos en la interfase agua-aire.

5.1.2 propiedades electrocinéticas. Las partículas coloidales se encuentran normalmente cargadas respecto al medio circundante. El signo y la magnitud de la carga son características del material coloidal y de la composición del medio. Si se colocan los electrodos de una fuente de corriente directa en una dispersión coloidal, las partículas emigran hacia el polo de carga opuesta a una velocidad proporcional al gradiente de potencial establecido en

la solución. Esto recibe el nombre de **electroforesis** (del griego *electrón*, ámbar, a causa de sus propiedades electrostáticas, y *phoresis*, nacer, transportar.). Por el contrario, si el material coloidal se mantiene fijo, la aplicación de un potencial de corriente directa ocasiona que el líquido fluya en una dirección opuesta al sentido en que se moverían normalmente las partículas. Este fenómeno se utiliza para deshidratar lodos y arcillas, y es conocido como *electroosmosis* (del griego *electrón*, ámbar, y *osmos*, impulso.). La medición de las propiedades electrocinéticas muestra que la sílice coloidal, los minerales de silicatos como las arcillas y la mayor parte de las proteínas se encuentran generalmente cargadas en forma negativa en aguas con valores de potencial de hidrógeno próximos a siete, mientras que los óxidos hidratados de hierro y aluminio están generalmente cargados en forma positiva.

5.1.3. estabilidad de los coloides. Al entrar en contacto, las partículas más grandes se floculan y precipitan, a menos que se estabilicen en alguna forma. Para coloides hidrofóbicos como los de los metales y la mayor parte de sus sales, la presencia de la carga, que origina que las partículas se repelan unas a otras, es el mayor factor estabilizante. Los coloides hidrofílicos, como los almidones y las proteínas, se estabilizan principalmente por capas de agua ligadas que obstruyen el contacto entre las partículas, aún cuando la carga tiene también cierta influencia. Los óxidos hidratados férrico, de aluminio y, en cierto grado, los minerales arcillosos, presentan propiedades asociadas a ambas de estas clases. La carga y la hidratación son importantes, hacen que el comportamiento de estos materiales como coloides sea más complejo que el comportamiento de los coloides comunes de cualquier clase. En muchos casos, se encuentra que la estabilidad de los coloides depende de la magnitud del **potencial zeta, Z**, definido por la ecuación:

$$Z = 4 \pi p q D$$

en donde **q** es la carga sobre la partícula (o diferencia de carga entre la partícula y el seno de la solución), **p** el espesor de la capa a través de la que es efectiva la diferencia de carga, y **D** es la constante dieléctrica del medio. En esta forma, el potencial **Z** es una medida tanto de la carga sobre una partícula coloidal como de la profundidad dentro de la que se extiende el efecto de la carga. Los coloides hidrofóbicos y, hasta cierto grado, los óxidos hidratados férrico y de aluminio son estables mientras el potencial

zeta excede a un valor crítico. Si éste disminuye de tal valor, tiende a ocurrir la coagulación, lentamente, en la cercanía inmediata al potencial zeta crítico, y más rápidamente mientras más cerca se encuentra de cero.(2)

5.2. Coagulantes y coagulación de los coloides.

Los coloides son generalmente una molestia en el manejo de la calidad de las aguas. El color y la turbiedad orgánicos no se aceptan en los abastecimientos de agua. Por lo tanto, se deben evitar las condiciones que tienden a la formación de coloides, en el tratamiento de aguas con sales de aluminio o férricas por ejemplo, y los coloides se deben coagular para lograr un manejo efectivo de las aguas residuales o de sus lodos. La reducción del potencial zeta con la consecuente mayor facilidad para la coagulación de los coloides, puede ser afectada, ya sea por una disminución de la carga neta q o bien, por disminución de d , la distancia aparente de separación de la carga. Esto ocurre con el aumento en la concentración de iones, y se origina la relativa facilidad con que se obtiene la coagulación de los óxidos hidratados de hierro y aluminio en un agua salina, en comparación con el agua destilada. Los iones particulares que producen éste efecto son de signo opuesto al de la carga eléctrica que actúa sobre el coloide; los iones con cargas dobles o triples son mucho más efectivos que los iones de carga simple. Por lo tanto, la presencia de los iones sulfato ($SO_4^{=}$) proporciona ayuda en la coagulación de los coloides cargados positivamente de óxidos de aluminio o hierro. Los coloides cargados opuestamente tienden a actuar como iones muy fuertemente cargados, el uno respecto al otro. Cuando se les mezcla, ocurre una coagulación mutua con neutralización de las cargas. La remoción efectiva de los coloides cargados negativamente del color y la turbiedad ocasionada por las arcillas mediante el alumbre, se debe en parte a la interacción con las partículas coloidales cargadas positivamente del óxido de aluminio. Sin embargo, también son importantes los factores químicos, tales como la habilidad para formar complejos de los iones férrico y de aluminio, en la coagulación con alumbre o con sales férricas. Cuando los iones responsables de la carga sobre un coloide son iones de hidrógeno o de hidroxilo, con frecuencia se puede obtener la neutralización de la carga mediante cambios en

el potencial de hidrógeno (pH). Este efecto es responsable de las variaciones en la facilidad para la formación del flóculo con alumbre o cloruro férrico a diferentes valores de pH.

En la práctica del tratamiento del agua, el término coagulante indica una sustancia agregada al agua para facilitar la aglomeración y sedimentación de partículas finamente divididas, del orden de los 1000 milimicrones ($1 \mu\text{m}$), que se encuentran en suspensión. La coagulación, como proceso de tratamiento, denota la serie de operaciones químicas y mecánicas por las cuales se aplican los coagulantes a fin de transformar las pequeñas partículas en grandes aglomerados. Las impurezas presentes en el agua en forma de partículas en estado coloidal tienen carga negativa, pero la dispersión coloidal -agua + coloides- no tiene una carga eléctrica única. Las cargas originales de las partículas son equilibradas con las cargas de la fase acuosa, resultando una doble capa eléctrica en cada interfase entre el sólido y el agua. Las fuerzas de difusión y atracción electrostática dispersan la carga en el agua alrededor de cada partícula en una capa difusa. Las fuerzas eléctricas de repulsión y las fuerzas de atracción de Van der Waals interaccionan con las partículas en la solución, y producen una barrera potencial que previene la aglomeración. Al proceso de vencer la barrera de repulsión para permitir que ocurra la aglomeración se le denomina **desestabilización**, que es el objetivo primordial de la coagulación (3).

5.3 El concepto de la carga superficial

En principio, se puede formar una capa eléctrica doble en la interfaz situada entre un medio acuoso y otro no acuoso, en dos formas, 1) mediante la suposición de una carga electrostática neta, ya sea positiva o negativa, por un lado de la interfaz, y 2) a través de la creación de una capa difusa en la fase acuosa mediante un número equivalente de iones contrarios, de carga opuesta.

Se observan capas dobles de ésta clase en las superficies de precipitados, suspensiones y emulsiones. Éstas capas tienen gran influencia sobre la estabilidad de los coloides. La carga superficial se acumula en tres formas principales que varían con la química de las sustancias involucradas:

1) Se puede establecer una pequeña carga superficial por adsorción preferencial de un solo tipo de ion, por ejemplo, el ion OH^- , sobre materiales químicamente inertes, como la parafina o

las burbujas de gas dispersas en el agua.

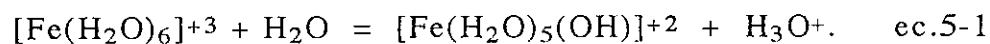
2) En el límite de las fases de las superficies sólidas, la carga puede ser resultado de sustituciones isomórficas dentro de la red estructural o de imperfecciones de ésta. Las arcillas muestran ejemplos representativos. La adquisición de una carga negativa se ilustra por un conjunto ordenado de tetraedros de SiO_2 sólido, en los que el reemplazo de un átomo de Si por un átomo de Al crea una estructura cargada negativamente; y la sustitución de un átomo de Al por un átomo de Mg en las redes de los octaedros de aluminio, dando también por resultado una red estructural negativamente cargada.

La carga de los iones depende mucho del potencial de hidrógeno. Ésta es positiva a valores bajos del pH y negativa a valores altos de pH.

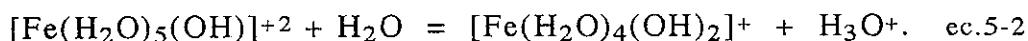
3) La carga primaria de las partículas coloidales puede provenir de la ionización de los grupos *ionogénicos* complejos situados sobre la superficie de las partículas dispersas. Muchas impurezas coloidales naturales pueden contener grupos funcionales ionizables (entre ellos están los grupos hidroxilo, carbonato, fosfato y sulfato). Su carga depende del grado de ionización, y consecuentemente, del pH del medio

5.4 Hidrólisis de Al(III) y Fe(III)

Los iones metálicos hidratados son ácidos en el sentido dado por Brönsted⁽⁶⁾. El equilibrio ácido-base para el hierro férrico es:



Al transferir un protón a una molécula solvente de agua, 1 H_2O coordinada se convierte a hidróxido. La base conjugada puede entonces transferir nuevamente un protón, es decir:

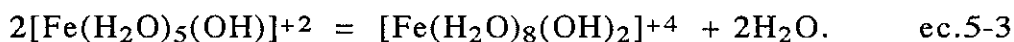


Pueden continuar transferencias similares. El orden de magnitud de la primera constante de acidez del ion férrico-acuoso es similar a la del ácido fosfórico.

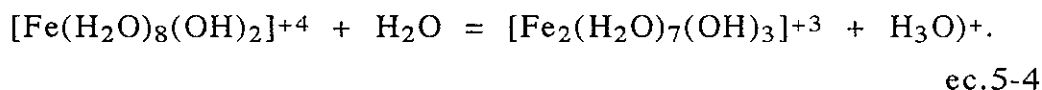
De acuerdo con lo anterior, una solución 10^{-3} M de FeCl_3 tiene un

pH próximo a 3.2, y al añadir sales férricas al agua se produce la disminución en el pH y la reducción de la alcalinidad.

Los complejos hidroxoférricos tienen una enorme tendencia a polimerizarse, y producir la reacción más simple a las especies dimeras:



Los dos iones se encuentran ligados probablemente mediante dos puentes hidroxilo. Este dímero puede sufrir reacciones hidrolíticas adicionales y formar complejos mayores de hidróxidos, los cuales formarían entonces más puentes hidroxilo, por ejemplo:



Una secuencia de reacciones hidrolíticas, que puede ser acompañada probablemente de reacciones de deshidratación, conduce a una coordinación progresiva del hierro férrico con iones hidróxido. Conforme disminuye la carga de las especies del Fe(III) a través de la coordinación con los grupos hidroxilo, existe una menor repulsión entre los iones y una mayor tendencia hacia la polimerización. Finalmente se forman de éste modo, polímeros hidroxilo coloidales y precipitados insolubles de óxido férrico hidratado.

El aluminio (III) posee un comportamiento en forma muy parecida a la del Fe (III), pero su hidrólisis es aparentemente más complicada. Las sales de aluminio se hidrolizan con facilidad y la acidez del ion aluminico acuoso es inferior a la del ion férrico.

El pH de las soluciones de sales de aluminio es similar al de las soluciones equimolares de ácido acético.

La hidrólisis aumenta progresivamente con la edad de las soluciones de Al(III) y Fe(III). Los efectos coagulantes de las soluciones añejas y de las recientemente preparadas muestran diferencias considerables.

De lo que se ha dicho respecto al Al(III) y Fe(III), se observa con claridad que el efecto de éstos iones metálicos multivalentes sobre la coagulación no se produce generalmente por los iones mismos, sino por sus productos de hidrólisis. Para una determinada concentración de metal, la velocidad y eficiencia de la coagulación dependen del pH del medio.

5.5 Historia de la coagulación

Aunque varios métodos imperfectos de purificación de agua, caracterizados generalmente como "coagulación" han sido conocidos y empleados desde los tiempos antiguos, el conocimiento de los factores fundamentales implicados en el proceso ha sido adquirido hace relativamente poco tiempo. La primera patente de coagulación fue otorgada en 1884 a Isaiah Smith Hyatt, quien, siguiendo una sugerencia del coronel L.H. Gardner, superintendente de la compañía de agua de Nueva Orleans, combinó con éxito el uso de percloruro de hierro como coagulante con su sistema de filtración rápida en el tratamiento de aguas turbias. En su patente, Hyatt pretendía el derecho exclusivo al uso no sólo del percloruro de hierro, sino de "cualquier otro agente que sea capaz de coagular las impurezas del líquido y evitar su paso a través del lecho del filtro". Cuando, un año más tarde, la compañía de agua Somerville & Raritan, de Nueva Jersey adoptó el sistema simultáneo de coagulación-filtración de Hyatt, el uso de la coagulación como preparación para la filtración rápida tuvo su principio como método completo de tratamiento en gran escala. En realidad, la filtración rápida fue adoptada en Somerville, Estados Unidos ya en 1881, pero no hay datos sobre el empleo de un coagulante en combinación con la primera antes de ésta instalación en 1885, y aún entonces la base científica para su empleo era todavía oscura.

En el mismo año en que Somerville empezó su tratamiento combinado de coagulación-floculación-filtración, los profesores Austin y Wilbert, de la universidad de Rutgers, publicaron los resultados de los primeros estudios científicos sobre el alumbre como coagulante. Más tarde, en 1893, unos estudios cuidadosos fueron emprendidos por Edmud B. Weston en Providence, R.I. sobre el proceso de coagulación en conjunción con la filtración rápida por arena.

No obstante el empleo del percloruro de hierro por Hyatt en su primer tratamiento de coagulación, fue el sulfato de aluminio el que dominó al principio el campo de los coagulantes y, aunque desde entonces el conocimiento de la coagulación ha adelantado mucho, pocos coagulantes nuevos han sido introducidos en la práctica. La primera innovación en éste campo se hizo en 1898, cuando William Bull introdujo en Quincy, Illinois el uso de una combinación de sulfato ferroso y cal, preparando sulfato ferroso por combustión de azufre y reacción del ácido sulfuroso con

hierro de desperdicio en un procedimiento inventado por William Jewel.

También en Quincy se registró en 1902 el primer empleo del sulfato ferroso comercial. En 1937, Olin y Peterson informaron sobre unos experimentos fructuosos con arcilla bentonítica, y en el mismo año, Baylis describió el uso de la sílice activada como auxiliar de coagulación. Nuevas aplicaciones de la sílice como auxiliar de coagulación se publicaron en el mismo año por Graf y Schorn en St. Louis, y en 1944 por Hay. Finalmente, en 1937 Upton y Buswell presentaron datos de laboratorio sobre el uso de las sales de titanio como coagulantes. (2)

5.6 Necesidad del uso de coagulantes

Las materias coloidales y otras materias finamente divididas en las aguas no tratadas pueden ser arcilla, lino, materia orgánica (que imparte color), algas y bacterias. Cuando la concentración de estas impurezas no excede valores relativamente bajos, se puede lograr una eliminación satisfactoria con filtración lenta por arena sin emplear coagulantes, pero la necesidad de éstos es sentida con creciente frecuencia. Es interesante hacer constar que la elección de las sales de aluminio y hierro como coagulantes por los primeros investigadores se debía, al menos en parte, al deseo de reproducir químicamente la cubierta gelatinosa de impurezas (*schmutzdecke*) que cubría la superficie de los filtros de arena lentos y que actuaba como un "ultrafiltro" para la eliminación de impurezas coloidales. Es una curiosa coincidencia que las sales de éstos dos metales siguen siendo, en nuestros días, las de uso más frecuente entre todos los coagulantes, aunque se emplean ahora por razones muy diferentes.

Los coagulantes se emplean en el tratamiento de aguas con cualidades químicas y físicas muy variables. Cuando se trata de aguas superficiales que no han sido ablandadas, en las cuales la eliminación de la turbiedad, del color por materia orgánica y de las bacterias es el objeto primordial del tratamiento, la coagulación es de suma importancia, y el manejo eficiente de la planta y la calidad del agua tratada dependerán en gran medida de su control adecuado. En muchas otras plantas se necesitarán otros tratamientos como la precloración, la adición de carbón activado para la eliminación de olores y sabores, la estabilización antes o después de filtrar y la poscloración; pero la coagulación es una

ayuda importante en los procesos mencionados, a la vez que cumple su función específica.

Pueden o no necesitarse coagulantes en el tratamiento de aguas duras ablandadas con cal, o bien, con cal y carbonato sódico. En muchas aguas de este tipo hay suficiente magnesio para formar un precipitado gelatinoso que contiene hidróxido de magnesio, además de carbonato de calcio y de los carbonatos básicos de magnesio y calcio, para producir la sedimentación de partículas de un tamaño satisfactorio cuando se opera con un valor de pH de alcalinidad entre 10.5 y 10.8. Cuando se requiere coagulante, el alumbre, el sulfato de hierro y, recientemente, la sílice activada sola o en combinación con el alumbre y el sulfato de hierro, se usan mucho con buen resultado. Cuando se ablanda el agua con cal y sosa, la cantidad de coagulante requerida es generalmente pequeña y rara vez excede los 15 miligramos por litro. Cuando se emplean en combinación con el ablandamiento de agua, los coagulantes tienen la función de producir una sedimentación bien floculada y de fácil asentamiento, que garantizará la llegada a los filtros de agua de baja turbiedad. Además, el empleo de coagulantes hace que las reacciones ablandadoras se efectúen de manera más completa, logrando de ésta manera un agua ablandada de alcalinidad total más baja. Eventualmente, las aguas superficiales o las freáticas con dureza inconveniente tienen color por materia orgánica y contienen sulfato de hierro y sulfuro de hidrógeno. La dureza y el color se presentan muy frecuentemente en lugares donde los pozos que atraviesan piedra caliza porosa se cargan de aguas superficiales con alto colorido orgánico.

A veces, el ablandamiento con exceso de cal reduce este color a un grado aceptable sin necesidad de tratamiento adicional. Más frecuentemente, sin embargo, es necesario ablandar primero el agua y después eliminar el color por coagulación u otro tratamiento. Al tratar estas aguas, las sales férricas tienen la ventaja suplementaria de ayudar a la eliminación de sulfatos de hierro y sulfuro de hidrógeno, a la vez que obran como coagulantes.

5.7 Naturaleza de la turbiedad.

La turbiedad es el efecto óptico causado por la dispersión o interferencia de los rayos luminosos que pasan a través del agua que contiene pequeñas partículas en suspensión, causadas por el lodo extraído del suelo, por escurrimientos superficiales que

contienen materia suspendida, orgánica y mineral por el carbonato de calcio precipitado en las aguas duras, por el hidróxido de hierro precipitado de aguas corrosivas, por organismos microscópicos. En lagos, la turbiedad es debida a dispersiones extremadamente finas y coloidales, mientras que en los ríos es debida a dispersiones normales.

En términos sencillos, la turbiedad es la expresión empleada para describir las partículas insolubles de arcilla, limo, material mineral, basuras orgánicas, plancton y otros microorganismos que impiden el paso de la luz a través del agua.

La turbiedad es de importante consideración en las aguas de abastecimiento, por tres razones principales: **a) antiestética**, puesto que cualquier turbiedad en el agua para beber produce en el consumidor pocos deseos de ingerirla y utilizarla en sus alimentos; **b) filtrabilidad**, se tiene que la filtración del agua se vuelve más difícil y por consiguiente aumenta su costo al aumentar la turbiedad; **c) desinfección**, la desinfección en las aguas de abastecimiento es usualmente por cloro u ozono, y para ser efectiva deben estar en contacto el agente desinfectante y los organismos por eliminar. En aguas turbias, los organismos perjudiciales son expuestos a la acción del desinfectante, y en los casos en que la turbiedad es causada por desechos sólidos, algunos de los organismos patógenos pueden estar contenidos en las partículas estando protegidos al desinfectante.

La unidad patrón de turbiedad fue definida como la obstrucción óptica de la luz causada por un miligramo por litro de sílice insoluble en agua destilada.(7).

Los contaminantes causantes de la turbiedad en el agua son las partículas en suspensión, tales como la arcilla, minerales, sedimento, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos. Los tamaños de las partículas varían desde partículas coloidales hasta partículas más grandes. La arcilla es quizá la causa más común de turbiedad en las aguas. Comúnmente, entendemos por arcilla un material natural, terroso, de gránulos muy finos, que se vuelve plástico cuando se mezcla con cierta cantidad de agua. Varios análisis de arcilla han demostrado que ésta se compone principalmente de sílice, aluminio y agua, frecuentemente con cantidades apreciables de hierro, álcalis y tierra alcalina. Desde el punto de vista físico, las arcillas son cristales con una estructura atómica reticular. Las arcillas más comunes y su respectiva fórmula química son:

Caolinita: $\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8 + \text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_6)(\text{OH})_{16}$

Bentonita: $\text{Al}(\text{Si}_8\text{O}_{20})(\text{OH})_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$

Muscovita: $\text{K}_2\text{Al}_4(\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{20})(\text{OH})_4$

Los valores de turbiedad pueden variar desde cero hasta varios miles de unidades en aguas altamente turbias, y consecuentemente no hay un método de análisis que abarque un rango tan amplio.

Se describen dos métodos de análisis; el método **turbidimétrico** de bujía de Jackson, cuyo principio se basa en el paso de la luz a través de una suspensión que justamente haga desaparecer la imagen de la flama de una bujía patrón, y el método **nefelométrico**, cuyo principio involucra la medición de la luz dispersa en una dirección específica, tal como a 90° del paso de la luz incidente.

La medición se realiza al hacer pasar un fuerte rayo de luz a través de la muestra, donde las partículas finas que constituyen la turbiedad dispersan una porción del rayo de luz en ángulos rectos o en otros ángulos, y a un ángulo seleccionado llega el rayo a un sensor donde es convertido a un impulso eléctrico, que es el que activa el medidor. La intensidad de luz que da sobre el sensor es proporcional a la turbiedad. Obviamente, una muestra libre de turbiedad no llevará luz a la fotocelda.

Un largo paso de luz aumenta la sensibilidad de la medición fotométrica a valores bajos. En la mayoría de los casos, para la estimación de turbiedades de bajo nivel, los aparatos fotométricos han sido sustituidos por turbidímetros más sensibles que se basan en el principio nefelométrico.

El detector fotoeléctrico es un espectrofotómetro, el cual se coloca en posición para recibir el rayo de luz directo, mientras que el sensor es una fotocelda o un tubo fotomultiplicador.

5.8 Naturaleza del color.

Generalmente, cuando se habla de calidad del agua, suelen asociársele tres propiedades inherentes a ella: color, sabor y olor. Al considerarse la primera de ellas, se observa que en el agua, para consumo humano, tiene aceptación la transparencia y la carencia de color, pero en diversos abastecimientos el agua se

encuentra coloreada y tiene el problema de que no es aceptada y es rechazada por el usuario, hasta que no se le trata removiendo dicha coloración. Existe un color natural en el agua como producto de las partículas coloidales cargadas negativamente, también del contacto de desechos orgánicos tales como hojas, principalmente de coníferas y madera en diferentes estados de descomposición, así como extractos vegetales de gran variedad, tales como taninos y ácido húmico provenientes de la descomposición de la lignina y algunas sustancias minerales disueltas, como sales de hierro y manganeso que se encuentran en aguas superficiales y subterráneas. El origen de la presencia de color en el agua podría deberse a materia suspendida denominada **color aparente**, el cual, una vez removido, da lugar al que se conoce como **color verdadero**, siendo éste último el de interés para la determinación. Para la determinación del color se ha adoptado una medida estándar, la cual es usada directa o indirectamente en la medida del color verdadero. Así, en ocasiones es necesario remover la materia suspendida para la cual se selecciona cuidadosamente un sistema apropiado de filtración o bien, de centrifugación.

Las aguas que tienen coloración debido a sustancias naturales en descomposición no son consideradas de poseer sustancias tóxicas o perjudiciales, pero normalmente la coloración adquirida por el agua -amarillo-pardo- produce una aversión natural debido a las comparaciones antiestéticas que se le asocian, por lo que el abastecimiento de agua debe proporcionar un agua de apariencia agradable a fin de evitar que los consumidores busquen otras fuentes sin control sanitario que puedan servir como foco de diseminación de organismos patógenos.(7).

La mayoría de los investigadores opina que el color orgánico en el agua es de naturaleza coloidal. Algunos autores, como Packham y Shapiro, 1964, sugieren que se encuentra en solución verdadera. Black y Christman demostraron que los filtros comerciales de membrana, con poros de $3.5 \mu\text{m}$ retenían el 91% del color original, mientras que los poros de $10 \mu\text{m}$ retenían solo el 13% del color. Ésto indica que el tamaño de las partículas del color variaba entre entre 3.5 y $10 \mu\text{m}$, lo que se acerca bastante al límite entre dispersión coloidal y solución verdadera. La discrepancia entre los investigadores puede deberse a que el color se forma por coloides hidrofílicos (del griego *philos*, querido), que son aquellos que muestran gran atracción por el agua, en contraposición a los coloides causantes de la turbiedad, que son

los hidrofóbicos (del griego *phobe*, fobia), es decir, los que muestran menos atracción por el agua.

Los principales constituyentes de color orgánico natural en el agua son los ácidos fúlvicos, himatomelánicos y húmicos, conocidos en su conjunto como sustancias húmicas. Black y Christman analizaron varias aguas y encontraron entre 15 y 50 miligramos por litro de materia orgánica, de la cual un promedio de 87% era ácido fúlvico, 11% ácido himatomelánico y 2% ácido húmico. Por otro lado, la relación entre color y peso no es directa, puesto que a un valor de potencial de hidrógeno igual a 8.0, una solución de un miligramo por litro de ácido húmico tiene un color de 26.5 unidades, mientras que una solución de un miligramo por litro de ácido fúlvico tiene un color de 2.8 unidades, casi diez veces menor.

Las sustancias húmicas están compuestas por moléculas aromáticas de alto peso molecular que muestran características polianiónicas en soluciones neutras o alcalinas. Por medio de estudios de degradación oxidativa se lograron aislar e identificar siete diferentes compuestos fenólicos comunes a los húmicos de la madera y del agua.

El color existente en el agua no se deriva únicamente de la descomposición de productos naturales, sino también de hidróxidos metálicos, como el de hierro. Además, de compuestos orgánicos desconocidos presentes en los desechos domésticos e industriales. Recientemente, se ha demostrado que el color natural del agua puede reaccionar con el cloro para producir compuestos organoclorados, principalmente cloroformo (CHCl_3) y otros trihalometanos. Puesto que el cloroformo ha sido identificado como carcinógeno, existe cierta preocupación, y se está realizando actualmente muchas investigaciones sobre el problema. Otras razones que se han dado para justificar la remoción del color en el agua incluyen: **estética**, por lo general el consumidor prefiere, para uso doméstico, agua clara y sin color; **sabor**, se ha descubierto que el color imparte sabor al agua; **nutrientes**, el color puede actuar como nutriente para bacterias y algas; **requerimientos industriales**, muchas industrias exigen poco color en el agua que utilizan; **análisis**, el color interfiere en los métodos colorimétricos de análisis; **salud**, el color puede deberse a la presencia de desechos orgánicos tóxicos.

5.9 Naturaleza del hierro y del manganeso.

Aunque suelen encontrarse juntos, el hierro tiene una distribución mucho más amplia que el manganeso. Uno y otro elemento se encuentran en los esquistos, las areniscas y los depósitos aluviales de las zonas pantanosas. Los pozos que se abren en terrenos que contienen aquellas rocas y los pozos poco profundos en tierras aluviales dan aguas con hierro y manganeso.

Los embalses de aguas de superficie almacenadas en éstas formaciones también pueden acumular hierro y manganeso, porque la descomposición de las materias orgánicas del fondo da por resultado la eliminación del oxígeno disuelto y la formación de dióxido de carbono, de modo que los compuestos de hierro y manganeso en la tierra y rocas inundadas se convierten en compuestos solubles. Cuando las corrientes verticales llevan las aguas profundas a la superficie de los depósitos, el hierro y el manganeso se oxidan, son precipitados y descienden al fondo donde se produce una nueva disolución en ausencia de oxígeno. Por lo tanto, es probable que las aguas cerca de la superficie de los embalses se encuentren libres de hierro y manganeso.

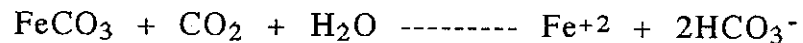
El hierro y el manganeso de aguas naturales de bajo pH y en ausencia de oxígeno se presentan en formas químicamente reducidas y solubles que no dan color al agua. Cuando el material se oxida, por aireación o por el cloro, los minerales precipitan y el hierro imparte al agua un color rojizo o negruzco, y el manganeso un matiz purpúreo o negruzco. El contenido total permisible de hierro y de manganeso se indica generalmente como 0.3 miligramos por litro⁽²⁾ pero el mejor criterio para juzgar la tolerancia es el efecto de éstos minerales en el color y turbiedad del agua y sus caracteres de manchado.

Las aguas con alto contenido orgánico pueden contener mucho más del límite máximo permisible, de modo que para que el agua sea aceptable para el consumidor y para el industrial, debe contener poca o ninguna cantidad de dichos metales.

Tanto el hierro como el manganeso provocan problemas serios en los abastecimientos de agua potable. Los problemas son más extensos y críticos en las aguas subterráneas, pero también se presentan durante cierta época del año en aguas provenientes de ríos y presas. Nuevos estudios indican que cambios bioquímicos o más bien cambios ambientales provocados por reacciones biológicas son de mayor consideración (bacterias ferosas).

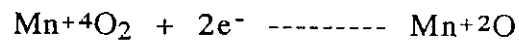
Como el hierro y el manganeso están presentes en forma insoluble

en cantidades apreciables en casi todos los suelos, una explicación de cómo se introdujeron estas cantidades al agua que pasa por el suelo, debe sobre la forma como éstos metales se convierten en formas solubles. El hierro existe en el suelo y los minerales principalmente como óxido férrico, que es insoluble. En algunas partes se encuentra como carbonato ferroso (siderita), que es ligeramente soluble. Como las aguas subterráneas frecuentemente contienen cantidades considerables de dióxido de carbono, se pueden disolver cantidades igualmente apreciables de carbonato ferroso mediante la reacción:



de la misma manera que se disuelven los carbonatos de calcio y de magnesio. Sin embargo, problemas con el hierro prevalecen en sitios donde hay compuestos férricos insolubles.

El manganeso existe en el suelo principalmente como dióxido de manganeso, que es muy insoluble en agua que contenga dióxido de carbono. Bajo condiciones anaeróbicas el dióxido de manganeso se reduce de valencia +4 a +2 y entra en solución en el agua:



Hasta la fecha no se conocen efectos perjudiciales a la salud del hombre por ingerir agua que contenga hierro y manganeso. Este tipo de agua, al entrar en contacto con el aire y absorber el oxígeno, se vuelve turbia e inaceptable desde el punto de vista estético, debido a la oxidación del hierro y el manganeso a Fe^{+3} y Mn^{+4} respectivamente, los cuales forman precipitados coloidales. Las velocidades de oxidación no son rápidas y, debido a ello, las formas reducidas pueden persistir por algún tiempo en aguas aireadas. Esto sucede cuando el pH es menor a 6 unidades para la oxidación del hierro y menor a 9 para el manganeso.

Las velocidades se pueden aumentar por la presencia de ciertos catalizadores inorgánicos o por la acción de microorganismos. Tanto el hierro como el manganeso causan problemas en el lavado de la ropa, dado que la manchan igual que la plomería y provocan dificultades en los sistemas de distribución al propiciar el desarrollo de las bacterias ferrosas. Por lo tanto, se recomienda según la Comisión Guatemalteca de Normas, COGUANOR, un límite máximo aceptable de 0.1 mg/L para el hierro y 0.05 mg/L para el manganeso(4).

5.9.1. Eliminación del manganeso. El manganeso no puede ser oxidado y removido del agua tan fácilmente como el hierro, de modo que la aireación sola no es eficaz. Sin embargo, si el valor del potencial de hidrógeno del agua se aumenta hasta la zona de 8.5 a 10.0 unidades mediante la adición de un álcali y si la aireación es acompañada o seguida por el contacto con lechos de mineral de manganeso se producirá una oxidación catalítica. El manganeso presente en las aguas crudas sujetas a la filtración ordinaria, también puede quitarse mediante la coagulación y precipitación con coagulantes metálicos.

5.9.2 Eliminación del hierro. Existen varios métodos para eliminar el hierro, algunos de los cuales son también eficaces para eliminar el manganeso. Aún en concentraciones por debajo de 0.5 mg/L, el hierro y el manganeso manchan los muebles sanitarios, la ropa, etc., lo que se remedia usando uno de los metafosfatos comerciales que tienen la propiedad de evitar la precipitación del hierro y del manganeso a temperaturas inferiores a 82°C. Cuando no se emplea la oxidación catalítica ni la oxidación por el cloro, no es necesario aumentar el valor de potencial de hidrógeno a más de 8.5 unidades para que el hierro y el manganeso, cuando estén combinados con materia orgánica, sean oxidados por el oxígeno disuelto. Para aumentar el valor del potencial de hidrógeno se utiliza hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, comercialmente conocido como cal hidratada. Cantidades limitadas de hierro y manganeso en aguas de superficie coloreadas pueden eliminarse por coagulación con sulfato de aluminio, sobre todo si se hace la precloración para la oxidación con los valores bajos de potencial de hidrogeno que caracteriza a éstas aguas.

Con altas concentraciones de hierro y manganeso, los mejores resultados se obtienen cuando con la cal se utiliza sulfato ferroso y cloro para obtener la coagulación con altos valores de potencial de hidrógeno.

Así, la eliminación del hierro y manganeso por la coagulación y filtración de aguas superficiales es solamente una fase del tratamiento ordinario y requiere solo una modificación en la coagulación, mientras que los otros procesos son un medio para un fin específico, y convienen mejor a la eliminación de hierro y manganeso de las aguas subterráneas.

5.10 Naturaleza de la alcalinidad.

Un ejemplo importante y común del uso de las ecuaciones de equilibrio es el cálculo de las formas de la alcalinidad en un abastecimiento de agua.

La alcalinidad de un agua, definida como la capacidad para reaccionar con iones hidrógeno a un valor de potencial de hidrógeno correspondiente al de la formación estequiométrica del ácido carbónico (o bien, dióxido de carbono y agua), se determina generalmente por la presencia de iones bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}), e hidroxilo (OH^-). Ocasionalmente los iones fosfato y silicato u otras bases agregadas, pueden contribuir en forma importante en la alcalinidad.

En aguas residuales municipales, el amoníaco y los aniones de ácidos orgánicos se pueden incluir parcialmente en la determinación.

Para aguas que contengan únicamente iones bicarbonato, carbonato e hidroxilo como formas de alcalinidad pueden obtenerse las siguientes expresiones de equilibrio:

$$K_w' = [\text{H}^+][\text{OH}^-] \quad \text{ec.10-1}$$

$$K_1 = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]/[\text{H}_2\text{CO}_3] \quad \text{ec.10-2}$$

$$K_2 = [\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-] \quad \text{ec.10-3}$$

La alcalinidad **T**, en equivalentes por litro es:

$$T = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] \quad \text{ec.10-4}$$

La concentración de carbonatos se multiplica por 2 puesto que se combinan dos iones hidrógeno al formar ácido carbónico.

Para obtener el balance de cargas, se debe sustraer la concentración del ión hidrógeno $[\text{H}^+]$, o en forma alternativa, las concentraciones de HCO_3^- , CO_3^{2-} , y OH^- , producidas por ionización directa del H_2CO_3 , HCO_3^- y H_2O , respectivamente.

La concentración del ion hidroxilo se evalúa directamente del potencial de hidrógeno:

$$[\text{OH}^-] = K_w' / [\text{H}^+] \quad \text{ec. 10-5}$$

Se deduce la concentración de iones hidroxilo $[\text{OH}^-]$ de la alcalinidad T y se obtiene una alcalinidad corregida debida solamente a los iones bicarbonato $[\text{HCO}_3^-]$ y carbonato. $[\text{CO}_3^{2-}]$
 Por lo tanto:

$$T - [\text{OH}^-] = T' = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] - [\text{H}^+] \quad \text{ec. 10-6}$$

La eliminación del $[\text{CO}_3^{2-}]$ de las ecuaciones 10-3 y 10-6 da como resultado:

$$[\text{HCO}_3^-] = (T' + [\text{H}^+]) / (1 + 2K_2'/[\text{H}^+]) \quad \text{ec. 10-7}$$

y la sustitución de ésta en las ecuaciones 10-2 y 10-3 da como resultado:

$$\begin{aligned} [\text{H}_2\text{CO}_3] \text{ o bien } [\text{CO}_2] &= ([\text{H}^+]/K_1')[\text{HCO}_3^-] \\ &= ([\text{H}^+]/K_1')(T' + [\text{H}^+]) / (1 + 2K_2'/[\text{H}^+]) \quad \text{ec. 10-8} \end{aligned}$$

y también puede obtenerse:

$$\begin{aligned} [\text{CO}_3^{2-}] &= (K_2'/[\text{H}^+])[\text{HCO}_3^-] \\ &= (K_2'/[\text{H}^+])(T' + [\text{H}^+]) / (1 + 2K_2'/[\text{H}^+]) \quad \text{ec. 10-9} \end{aligned}$$

Estas ecuaciones son completas para $[\text{OH}^-]$, $[\text{HCO}_3^-]$, $[\text{CO}_3^{2-}]$ y $[\text{CO}_2]$. Sin embargo, se pueden convertir en otra forma de utilidad más inmediata mediante ciertas sustituciones y conversiones de unidades. Además las ecuaciones 10-7 y 10-9 proporcionan las concentraciones totales del equilibrio, en vez de dar solamente aquella porción asignable a la alcalinidad. Como se notó anteriormente, el término aditivo $[\text{H}^+]$ en $(T' + [\text{H}^+])$ es para tomar en consideración a la ionización directa de los ácidos y carbonatos, en contraste al de $[\text{HCO}_3^-]$ y $[\text{CO}_3^{2-}]$.

La alcalinidad se expresa generalmente como miligramos por litro o bien, en miliequivalentes por litro; es necesario un factor de conversión de 2×10^{-5} o de 10^{-3} respectivamente para obtener T o T' en equivalentes por litro.

Son necesarios los factores de 5×10^4 y de 10^5 para convertir $[\text{HCO}_3^-]$ y $[\text{CO}_3^{2-}]$ a miligramos por litro de CaCO_3 .

Para conversión a miliequivalentes por litro, los factores son 10^3 y 2×10^3 . Un factor de 4.4×10^4 convierte H_2CO_3 a miligramos por

litro de CO₂. La sustitución de K' y [H⁺] por sus equivalentes en términos de K y [H⁺] facilita la sustitución directa a partir del potencial de hidrógeno, pH.

Con estas sustituciones, la ecuación para la alcalinidad de bicarbonato es:

$$\text{mg/L HCO}_3 \text{ (alcalinidad como CaCO}_3\text{)} \\ = [A - (5 \times 10^4)K_w / f_{\text{OH}}(\text{H}^+)] / [1 + 2K_2 f_{\text{HCO}_3} f_{\text{CO}_3}(\text{H}^+)] \quad \text{ec. 10-10}$$

en donde A es la alcalinidad total en miligramos por litro como CaCO₃, y f es el coeficiente de actividad respectivo para cada ion.

Si se desea la concentración total de HCO₃⁻ en éstas unidades, y no solamente la alcalinidad de bicarbonatos, el término (5x10⁴)(H⁺)/ f_H, el cual es despreciable a valores de potencial de hidrógeno mayores de 5 unidades para alcalinidades totales mayores de 10 mg/L, se deberá sumar al numerador.

Con la sustitución adicional del término:

$$A' = A - (5 \times 10^4)K_w / f_{\text{OH}}[\text{H}^+]$$

se obtiene la ecuación para la alcalinidad de carbonato:

$$\text{mg/L CO}_3^{-2} \text{ (alcalinidad como CaCO}_3\text{)} = \\ ([2K_2 f_{\text{HCO}_3}] / [f_{\text{CO}_3}(\text{H}^+)])(A' / [1 + 2K_2 f_{\text{HCO}_3} / f_{\text{CO}_3}(\text{H}^+)]]) \quad \text{ec. 10-11}$$

y de igual forma se obtiene la ecuación para el CO₂:

$$[0.88(\text{H}^+) / K_1 f_{\text{HCO}_3}] - [A' + (5 \times 10^4)(\text{H}^+) / f_{\text{H}}] / [1 + 2K_2 f_{\text{HCO}_3}(\text{H}^+)] \quad \text{ec. 10-12}$$

y la ecuación para los hidróxidos:

$$\text{mg/L OH}^- \text{ como CaCO}_3 = 5 \times 10^4 K_w / f_{\text{OH}}[\text{H}^+] \quad \text{ec. 10-13}$$

Cuando se encuentran presentes en cantidades significativas otras formas de alcalinidad, éstas ecuaciones, excepto la 10-13, no son aplicables directamente. Si se conocen las concentraciones de las otras formas de la alcalinidad a partir de alguna medición independiente, puede utilizarse una A o A' al restar la suma de las otras formas de alcalinidad en las ecuaciones de la 10-10 a la 10-12.

Puede derivarse una serie de ecuaciones para las concentraciones de CO_2 , HCO_3^- y CO_3^{2-} válidas en presencia de otras formas de alcalinidad mediante la ayuda de una determinación analítica del CO_2 total desprendido del agua, a continuación de la acidulación.

Si se designa como C esa cantidad en moles por litro del agua original, de manera que

$$C = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad \text{ec.10-14}$$

entonces, se obtienen las siguientes ecuaciones por métodos similares a los del ejemplo precedente:

$$[\text{HCO}_3^-] = C/[1+(\text{H}^+)f_{\text{HCO}_3}/K_1 + K_2f_{\text{HCO}_3}/(\text{H}^+)f_{\text{CO}_3}] \quad \text{ec. 10-15}$$

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = [(\text{H}^+)f_{\text{HCO}_3}/K_1]C/[1+(\text{H}^+)f_{\text{HCO}_3}/K_1 + K_2f_{\text{HCO}_3}/(\text{H}^+)f_{\text{CO}_3}] \quad \text{ec. 10-16}$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = [K_2f_{\text{HCO}_3}/(\text{H}^+)f_{\text{CO}_3}]C/[1+(\text{H}^+)f_{\text{HCO}_3}/K_1 + K_2f_{\text{HCO}_3}/(\text{H}^+)f_{\text{CO}_3}] \quad \text{ec. 10-17}$$

5.11 Naturaleza de la dureza.

El agua es un solvente universal y disuelve cantidades variables de las diversas sustancias minerales. Este parámetro no afecta la calidad para consumo humano, sino que es importante en su uso doméstico, especialmente para lavado e industrialmente en su uso para calderas.

Las sales de calcio y magnesio son los principales constituyentes minerales. Consumen jabón y lo precipitan en forma de compuestos insolubles o grumos de jabón. La aplicación de detergentes sintéticos ha disminuído notablemente las desventajas de las aguas duras domésticas, no así en aquellos usos en los que se prefiere el jabón como higiene personal.

El problema de las incrustaciones y depósitos aún es de considerarse, pese a los avances teóricos de la química del agua y del desarrollo de dispositivos que evitan éstos, a base de intercambio iónico, como son las zeolitas o como los polifosfatos, que tienen propiedades para ablandamiento formando compuestos con el calcio y el magnesio.

La dureza es una característica del agua que representa la concentración total de iones de calcio y magnesio expresados como CaCO_3 .

La dureza del agua refleja la naturaleza de las formaciones geológicas que ha atravesado; por ésto las aguas varían su dureza de un lugar a otro, siendo las superficies menos duras que las subterráneas.

La causa de la dureza son los cationes bivalentes, los cuales reaccionan con el jabón formando precipitados y con ciertos aniones ocasionando incrustaciones. Los principales cationes que causan la dureza son el calcio magnesio, estroncio, hierro y manganeso.

Estos cationes, así como los aniones más importantes se encuentran en las aguas naturales en el siguiente orden de abundancia: a) **cationes de dureza:** Ca^{+2} , Mg^{+2} , Sr^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} . b) **aniones:** HCO_3^{-} , SO_4^{-2} , Cl^{-} , NO_3^{-} , SiO_3^{-2} .

La dureza se origina al contacto del agua con los suelos de formaciones rocosas y en áreas donde la capa del suelo es gruesa y hay calizas presentes. De igual forma, las aguas blandas o poco duras, se originan en áreas donde la capa vegetal es delgada las calizas escasean o no existen. El agua de lluvia, tal como llega a la tierra, no puede disolver las enormes cantidades de sólidos que se encuentran en las aguas naturales. El poder disolvente lo adquiere en el suelo, donde hay CO_2 producto de la acción bacteriana. El agua del suelo se carga de CO_2 que existe en equilibrio con el ácido carbónico.

Bajo las condiciones de pH ácido, los materiales alcalinos se disuelven. Puesto que la caliza no solo contiene carbonatos, sino también sulfatos, cloruros y silicatos, al exponerse a la acción solvente del agua son disueltos pasando a formar parte de la solución.

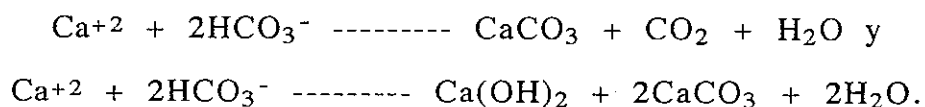
Para el consumo humano, las aguas duras son tan satisfactorias como las suaves, ya que no hay acumulación de sales. Pero sí presentan problemas en la industria por las incrustaciones que ocasionan en el equipo que está en contacto directo a altas temperaturas con el agua. Por ésta razón es necesario la aplicación de tratamientos especiales para la remoción de la dureza.

Además de la dureza total, en ocasiones es necesario conocer los otros tipos de dureza presentes. La dureza se puede clasificar de dos maneras: Según el ión metálico y según los aniones asociados a los iones metálicos, y existe también la llamada dureza aparente.

5.11.1 Dureza de calcio y magnesio. Los iones calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}) causan la mayor parte de la dureza del agua natural. Para poder calcular la cantidad de cal-carbonato de sodio es necesario conocer la dureza de calcio y de magnesio por separado. Como no siempre se cuenta con un análisis completo del agua, se puede recurrir a la medición de la dureza por calcio, y restar ésta a la dureza total para obtener la dureza por magnesio.

5.11.2 Dureza carbonatada y no carbonatada. La porción de la dureza químicamente equivalente a la alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos se considera como dureza carbonatada (o temporal). Como tanto la dureza como la alcalinidad se expresan como equivalencia a CaCO_3 , se tiene que cuando la alcalinidad total es menor que la dureza total, entonces la dureza carbonatada es igual a la alcalinidad. Cuando la alcalinidad total es mayor que la dureza total entonces la dureza carbonatada es igual a la dureza total.

La dureza carbonatada es importante porque los iones de carbonato (CO_3^{-2}) y bicarbonato (HCO_3^{-}) se precipitan a temperaturas elevadas como en calderas o durante el proceso de ablandamiento. Las reacciones implicadas son:



La cantidad de dureza que no se puede remover con la acción del calor se denomina *dureza no carbonatada o permanente*.

5.11.3 Dureza aparente. Las aguas saladas contienen grandes cantidades de sodio (Na^{+2}) y presentan una acción con el jabón similar a la de la dureza, por razón del efecto del ión común. Por esta causa, a este fenómeno se le denomina *dureza aparente*.

Discusión de los resultados

1. Río Los Plátanos

En relación al cuadro 2 del anexo 1 se presenta el siguiente análisis:

1.1 La mejor remoción de turbiedad obtenida es del 99% con un pH = 6.0 y se logró remover la turbiedad de 233 UTN iniciales a 3.0 UTN;

1.2 La mejor remoción de color aparente y verdadero se obtuvo a un pH = 8.0, y los porcentajes de remoción son de 99.8 y 100 % respectivamente. El color aparente se logró remover desde 1795 unidades hasta 3, lo que es muy importante ya que este color es el que el usuario observa.

1.3 El contenido inicial de hierro en el agua del río es de 2.76 mg/L y se logró reducirlo a 0.02 mg/L trabajando a un pH = 8.0, lo que equivale a un 99.3 % de remoción.

1.4 La dosis óptima de sulfato de aluminio más baja se obtuvo utilizando un pH de operación de 6.0 unidades y el costo más bajo fué de Q 0.09 por metro cúbico de agua, también a ese mismo valor de pH;

1.5 El contenido inicial de manganeso en el agua del río es de 0.5 mg/L y se logró reducirlo a 0 mg/L trabajando a un pH = 7.29 unidades.

Debido a que el río Los Plátanos tiene valores altos de turbiedad, color aparente y hierro, y con base en el análisis anterior se tiene que el pH óptimo de trabajo es de 8.0 unidades, ya que se está obteniendo valores de color aparente de 3 unidades, turbiedad de 3 UTN y hierro de 0.02 mg/L. El dato de remoción de manganeso no es de importancia porque el valor inicial es bajo y aceptable en agua potable. Los datos de costos indican que el obtenido para un pH = 8.0 son mayores que el de pH = 6.0, pero se debe considerar que al usar ese valor de pH se incrementan los valores de color aparente, turbiedad y hierro que tendrá el efluente del proceso de coagulación previo a pasar a los filtros.

2. Ríos Xayá - Pixcayá

En relación al cuadro 3 del anexo 1 se presenta el siguiente análisis:

2.1 la mayor remoción de turbiedad es del 100% a un pH = 8, removiéndose la turbiedad desde un valor de 58 UTN hasta 0 UTN;

2.2 la mayor remoción de color aparente y verdadero es del 100 % para un pH de operación de 8.0 unidades;

2.3 el contenido de hierro del agua cruda es de 0.88 mg/L y se redujo a 0.02 mg/L representando un 98% de remoción a un pH de 8 unidades;

2.4 El manganeso se redujo en un 100% en los tres valores de pH que se trabajaron.

De acuerdo con el análisis anterior, se tiene que el pH óptimo de operación es de 8 unidades, puesto que se obtiene tanto para la turbiedad como para color aparente y verdadero un resultado de 0 unidades. Para el hierro se obtuvo un resultado de 0.02 mg/L. Para el manganeso se obtuvo un resultado de 0 mg/L, aunque no es de consideración, debido a que desde la concentración inicial ya se encuentra dentro de los límites máximos aceptables para agua potable. Debe tomarse en cuenta que para la operación con pH = 6 se obtienen costos inferiores, pero a la vez se obtienen valores mayores de turbiedad y hierro.

3. Río Los Esclavos

En relación al cuadro 4 del anexo 1, se presenta el siguiente análisis:

3.1 Para este caso se obtuvo 100% de remoción de turbiedad, color aparente y verdadero cuando se operó al valor de pH = 7.5;

3.2 El mayor porcentaje de remoción de hierro se obtuvo para el valor de pH de operación de 7.5 unidades.

De acuerdo con el anterior análisis, se tiene que el pH óptimo de operación es de 7.5 unidades, puesto que tanto los menores costos con los mayores porcentajes de remoción de los parámetros coinciden en éste valor.

4. Río Cucabaj

En relación con el Cuadro 5 del anexo 1, se presenta el siguiente análisis:

4.1 La mayor remoción de turbiedad se obtuvo a un pH = 7.0, y se logró un porcentaje de remoción del 93%, al reducir de un valor inicial de 68 UTN hasta un valor de 5, dentro del límite máximo aceptable;

4.2 La mayor remoción de color aparente se obtuvo a un pH de 7.0 unidades y la de color verdadero se obtuvo en un valor de pH = 8.0, pero ésta última no se toma en consideración, puesto que los valores de turbiedad y de color, según la norma COGUANOR NGO-29001, sobrepasan los límites máximos aceptables;

4.3 Se obtuvo los mayores porcentajes de remoción de hierro y manganeso para un valor de pH = 7.0, siendo éstos de 91% y 100% respectivamente;

4.4 de igual forma, se obtuvo los menores costos para $\text{pH} = 7.0$, aproximadamente el 50% de los costos obtenidos para los otros dos valores de pH .

De la anterior consideración, se tienen que el pH óptimo de operación es de 7.0 unidades.

5. Río Mayuelas

En relación al cuadro 6 del anexo 1, se presenta el siguiente análisis:

5.1 la mayor remoción de turbiedad se obtuvo en un valor de $\text{pH} = 8$ unidades, y es del 100%, al remover desde 65 UTN hasta 0 UTN;

5.2 la mayor remoción de color, tanto aparente como verdadero se obtienen para el mismo valor de $\text{pH}=8$, con porcentajes de 99 y 100%, respectivamente;

5.3 el porcentaje de remoción del hierro fué de 98% para $\text{pH} = 7.2$ y de 94% para $\text{pH} = 8$. Aunque el primero es mayor, ambos dan resultados inferiores al límite máximo aceptable para agua potable;

5.4 de igual forma, los costos son inferiores en el valor de $\text{pH} = 6$, pero trabajando a $\text{pH}=8$, se obtienen los porcentajes de remoción más bajos, siendo entonces los costos de operación de $\text{pH}=8.0$ los que se han de tomar en consideración;

Como resultado del anterior análisis, se tiene que el pH óptimo de operación es de 8.0 unidades.

6. Río Tacó

En relación al cuadro 7 del anexo 1, se presenta el siguiente análisis:

6.1 la mayor remoción de turbiedad se obtuvo para $\text{pH} = 7.0$, siendo del 97%, al remover de 36 UTN hasta 1.0 UTN;

6.2 la mayor remoción de color se obtuvo para $\text{pH} = 7$ unidades, siendo de 96 y 100% respectivamente;

6.3 los porcentajes de remoción de Fe y Mn se obtuvo en forma satisfactoria, para $\text{pH} = 7$ unidades, siendo ésto de 92% y 100% respectivamente;

6.4 los costos más bajos se obtienen cuando se opera con $\text{pH} = 7$, en comparación con los otros dos.

Del anterior análisis se tiene que el pH óptimo de operación es de 7.0 unidades.

CONCLUSIONES

1. El rango óptimo de valores de potencial de hidrógeno en la operación de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de color verdadero del agua superficial utilizada para consumo humano es de 6.0 a 7.0 unidades.
2. El rango óptimo de valores de potencial de hidrógeno en la operación de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad del agua superficial utilizada para consumo humano es de 7.0 a 8.0 unidades.
3. La modificación de los valores de potencial de hidrógeno y alcalinidad del agua cruda a los respectivos rangos óptimos trae como beneficios adicionales la reducción de la concentración de hierro total en porcentajes superiores a 87%, así como la reducción de la concentración de manganeso en porcentajes superiores al 94%.

RECOMENDACIONES

1. Se deben proporcionar los insumos necesarios e instruir a los operadores de las plantas de tratamiento de agua potable, con el objeto de que controlen adecuadamente los valores de potencial de hidrógeno y alcalinidad del agua cruda que ingresa a las unidades de proceso, para que se pueda efectuar las modificaciones de los mismos antes de la aplicación del coagulante.
2. Siempre que sea necesario, se debe modificar el valor del potencial de hidrógeno del agua cruda que ingresa a las plantas de tratamiento con la finalidad de reducir el consumo de coagulantes, y por consiguiente, reducir costos de operación. Para ello se deben realizar evaluaciones periódicas en las plantas de tratamiento de agua potable.
3. Se debe tomar en cuenta la eficiencia que pueda presentar la operación de coagulación con sulfato de aluminio para reducir la concentración de hierro y manganeso en el agua, antes de incluir en el proceso otras unidades específicas para ello, ya que la construcción e implementación de estas pueden aumentar los costos de las plantas de tratamiento de agua potable.

REFERENCIAS

1. APHA - AWWA - WPCF. **Standard methods for the examination of water and waste water.** 16th. edition U. S. A. : .American Public Health Association. 1985.
2. A. W. W A. **Water quality and treatment.** 2nd. edition U.S.A.: American Water Works Association. 1968.
3. CEPIS - OPS. **El agua, calidad y tratamiento para consumo humano.** Manual I. Perú: Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ambiental. 1990
4. COGUANOR NGO- 29001. **Especificaciones para agua potable.** Guatemala: Comisión guatemalteca de normas. Ministerio de Economía. 1985.
5. DE LEON ACUÑA, Fulvia Etelvina. **Aplicación de la prueba de jarras para la obtención de la dosis óptima de sulfato de aluminio y los parámetros de floculación en el tratamiento de aguas.** (Tesis: Ingeniero químico. Facultad de Ingeniería USAC);Guatemala, 1986.
6. FAIR, Gordon. et al **Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales.** Tomo II. Editorial Limusa. México, 1971.
7. INSTITUTO DE FOMENTO MUNICIPAL. **Proyecto del laboratorio de control de calidad del agua .** Guatemala: División de ingeniería de proyectos; departamento de operación y mantenimiento. 1983.

8. MARTINEZ MORAN, Eddy René. **El uso de la fécula de maíz en el proceso de coagulación del agua cuando se utiliza sulfato de aluminio** . (Tesis: Maestría en ingeniería sanitaria. Escuela regional de ingeniería sanitaria y ambiental. USAC); Guatemala, 1987.

9. RIVERA POMES, Carlos Humberto. **El uso de la harina de papa (Solanum Tuberosum) como alternativa de ayuda en el proceso de coagulación del agua cuando se usa sulfato de aluminio** . (Tesis: Maestría en ingeniería sanitaria. Escuela regional de ingeniería sanitaria y ambiental. USAC) . Guatemala, 1987.

BIBLIOGRAFIA

1. APHA - AWWA - WPCF. **Standard methods for the examination of water and waste water.** 16th. edition U. S. A. : .American Public Health Association. 1985.
2. A. W. W A. **Water quality and treatment.** 2nd. edition U.S.A.: American Water Works Association. 1968.
3. CEPIS - OPS. **El agua, calidad y tratamiento para consumo humano.** Manual I. Perú: Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ambiental. 1990
4. COGUANOR NGO - 4010. **Sistema internacional de medidas.** Guatemala: Comisión guatemalteca de normas. Ministerio de economía 1984.
5. COGUANOR NGO- 29001. **Especificaciones para agua potable.** Guatemala: Comisión guatemalteca de normas. Ministerio de Economía. 1985.
6. DE LEON ACUÑA, Fulvia Etelvina. **Aplicación de la prueba de jarras para la obtención de la dosis óptima de sulfato de aluminio y los parámetros de floculación en el tratamiento de aguas.** (Tesis: Ingeniero químico. Facultad de Ingeniería USAC);Guatemala, 1986.
7. FAIR, Gordon. et al **Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales.** Tomo II. Editorial Limusa. México, 1971.
8. GUARDADO, Miguel Antonio. **Dosificación para la coagulación del agua.** (Tesis: Maestría en ingeniería sanitaria. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria.USAC); Guatemala, 1986.

10. **HERRARTE, Orlando. Evaluación de la planta potabilizadora de Sanarate, El Progreso, Guatemala.** (Tesis: Maestría en ingeniería sanitaria. Escuela regional de ingeniería sanitaria y ambiental. USAC.); Guatemala, 1990.

11. **INSTITUTO DE FOMENTO MUNICIPAL. Proyecto del laboratorio de control de calidad del agua .** Guatemala: División de ingeniería de proyectos; departamento de operación y mantenimiento. 1983.

12. **MARTINEZ MORAN, Eddy René. El uso de la fécula de maíz en el proceso de coagulación del agua cuando se utiliza sulfato de aluminio .** (Tesis: Maestría en ingeniería sanitaria. Escuela regional de ingeniería sanitaria y ambiental. USAC); Guatemala, 1987.

13. **MEJIA, Juan Manuel. Utilización de la semilla de la Moringa Oleifera como coagulante natural .** (Tesis: Maestría en ingeniería sanitaria. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. USAC.); Guatemala, 1986.

14. **RIVERA POMES, Carlos Humberto. El uso de la harina de papa (Solanum Tuberosum) como alternativa de ayuda en el proceso de coagulación del agua cuando se usa sulfato de aluminio .** (Tesis: Maestría en ingeniería sanitaria. Escuela regional de ingeniería sanitaria y ambiental. USAC) . Guatemala, 1987.

ANEXO

ANEXO 1

RESULTADOS

Cuadro 1
Características iniciales del agua cruda de los ríos analizados
en el programa de muestreo.

Parámetro analizado	río Los Plátanos	río Mayuelas	río Tacó	ríos Xayá- Pixcayá	río Los Esclavos	río Cucabaj
turbiedad (UTN)	233	65	36	58	20	68
color aparente (u. Pt-Co)	1795	183	192	326	117	397
color verdadero (u. Pt-Co)	541	57	9	97	102	334
pH	7.29	7.2	8.3	7.5	7.7	6.3
alcalinidad total*	160	50	225.2	80	57.8	31.4
hidróxidos*	0	0	0	0	0	0
carbonatos*	0	0	10.4	0	0	0
bicarbonatos*	160	50	214.8	80	57.8	31.4
dureza total*	225	250	250	90	150	150
dureza de calcio*	50	30	250	50	35	10
dureza magnesio*	175	220	0	40	115	140
calcio**	20	12	100	20	14	4
magnesio**	42.48	53.4	0	9.71	27.9	33.98
hierro**	2.76	0.89	0.26	0.88	0.36	1.19
manganeso**	0.5	0.9	0.5	0.3	0	0.1

(*) en mg/L como CaCO₃

(**) en mg/L

Cuadro 2

Porcentajes de remoción de los parámetros físico-químicos para diferentes valores de potencial de hidrógeno. Río Los Plátanos

Parámetro	inicial	pH = 7.29	% de remoción	pH = 6.0	% de remoción	pH = 8.0	% de remoción
turbiedad (UTN)	233	3	98.7	2	99	3	98.7
color aparente (u. Pt-Co)	1795	31	98.3	25	98.6	3	99.8
color verdadero (u.Pt-Co)	541	0	100	8	98.5	0	100
hierro total(**)	2.76	0.08	97	0.06	98	0.02	99
manganeso (**)	0.5	0	100	0.3	40	0.3	40
dosis coagulante (**)		70		40		60	
costo (Q/m3)		0.29		0.17		0.1	

(**) en mg/L

cuadro 3

Porcentajes de remoción de los parámetros físico-químicos
para diferentes valores de potencial de hidrógeno.
Ríos Xayá-Pixcayá

parámetro	inicial	pH = 7.5	% de remoción	pH = 6.0	% de remoción	pH = 8.0	% de remoción
turbiedad (UTN)	58	2	96.5	6	89.6	0	100
color aparente (u.Pt-Co)	326	13	96	0	100	0	100
color verdadero (u.Pt-Co)	97	10	90	0	100	0	100
hierro total (**)	0.88	0	100	0.06	93	0.02	98
manganeso (**)	0.3	0	100	0	100	0	100
dosis coagulante (**)		40		20		50	
costo (Q/ m3)		0.17		0.09		0.17	

(**) en mg/L

cuadro 4

Porcentajes de remoción de los parámetros físico-químicos
para diferentes valores de potencial de hidrógeno.
Río Los Esclavos

parámetro	inicial	pH = 7.5	% de remoción	pH = 6.01	% de remoción	pH = 8.0	% de remoción
turbiedad (UTN)	20	0	100	8	60	4	80
color aparente (u.Pt-Co)	117	0	100	40	66	5	96
color verdadero (u.Pt-Co)	102	0	100	15	85	0	100
hierro total (**)	0.36	0.02	94	0.02	94	0.04	89
manganeso (**)	0	0	---	0	---	0	---
dosis coagulante (**)		40		20		40	
costo (Q/m3)		0.17		0.09		0.17	

(**) en mg/L

cuadro 5

Porcentajes de remoción de los parámetros físico-químicos para diferentes valores de potencial de hidrógeno. Río Cucabaj

parámetro	inicial	pH = 6.3	% de remoción	pH = 7.0	% de remoción	pH = 8.0	% de remoción
turbiedad (UTN)	68	58	15	5	92.6	10	85
color aparente (u.Pt-Co)	397	189	52	33	92	46	88
color verdadero (u. Pt-Co)	334	8	97.6	8	97.6	1	99.7
hierro total (**)	1.19	0.14	88	0.11	91	0.15	87
manganeso (**)	0.1	0.1	0	0	100	0	100
dosis coagulante (**)		40		20		40	
costo (Q/m3)		0.17		0.09		0.17	

(**) en mg/L

cuadro 6

porcentajes de remoción de los parámetros físico-químicos
para diferentes valores de potencial de hidrógeno.
Río Mayuelas

parámetro	inicial	pH = 7.2	% de remoción	pH = 6.0	% de remoción	pH = 8.0	% de remoción
turbiedad (UTN)	65	6	91	5	92	0	100
color aparente (u.Pt-Co)	357	17	95	56	84	5	98.6
color verdadero (u.Pt-Co)	183	14	92	0	100	0	100
hierro total (**)	0.89	0.02	98	0.08	91	0.05	94
manganeso (**)	0.9	0	100	0	100	0	100
dosis coagulante (**)		40		20		30	
costo (Q/m3)		0.17		0.09		0.13	

(**) en mg/L

cuadro 7

porcentajes de remoción de los parámetros físico-químicos
para diferentes valores de potencial de hidrógeno.

Río Tacó

parámetro	inicial	pH = 8.3	% de remoción	pH = 6.0	% de remoción	pH = 7.0	% de remoción
turbiedad (UTN)	36	2	94	3	92	1	9
color aparente (u. Pt-Co)	192	28	85	25	87	8	96
color verdadero (u. Pt-Co)	9	5	44	2	78	0	100
hierro total (**)	0.26	0	100	0.08	69	0.02	92
manganeso (**)	0.5	0	100	0.2	160	0	100
dosis coagulante (**)		60		60		30	
costo (Q/m3)		0.25		0.25		0.13	

(**) en mg/L

Cuadro 8

Porcentajes de remoción de hierro
y manganeso obtenidos en
la coagulación a diferentes valores de pH

Río	pH	concentración Fe mg/L		% de de remoción	concentración Mn,mg/l		% de remoción
		inicial	final		inicial	final	
Los Plátanos	6	2.76	0.06	97.83	0.5	0.3	40
	7.29	2.76	0.08	97.1	0.5	0	100
	8	2.76	0.02	99.27	0.5	0.3	40
Xayá-Pixcayá	6	0.88	0.06	93.18	0.3	0	100
	7.5	0.88	0	100	0.3	0	100
	8	0.88	0.02	97.73	0.3	0	100
Los Esclavos	6	0.36	0.02	94.44	0	0	-
	7.5	0.36	0.02	94.44	0	0	-
	8	0.36	0.04	88.88	0	0	-
Cucabaj	6.3	1.19	0.14	88.23	0.1	0.1	0
	7	1.19	0.11	90.76	0.1	0	100
	8	1.19	0.15	87.39	0.1	0	100
Mayuelas	6	0.89	0.08	91.01	0.9	0	100
	7.22	0.89	0.02	97.75	0.9	0	100
	8	0.89	0.05	94.38	0.9	0	100
Tacó	6	0.26	0.08	69.23	0.5	0.2	60
	7	0.26	0.02	92.31	0.5	0	100
	8.3	0.26	0	100	0.5	0	100

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento "La Carbonera".
fuente: Río Los Plátanos
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Sanarate departamento: El Progreso

características del agua cruda

color aparente: 1795 unidades Pt-Co dureza total 225 mg/L
color verdadero: 541 unidades Pt-Co dureza de calcio: 50 mg/L
turbiedad: 233 UTN dureza de magnesio: 175 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.29 unidades calcio: 20 mg/L
Alcalinidad total: 160 mg/L magnesio: 42.48 mg/L
hierro: 2.76 mg/L manganeso: 0.5 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: no se utilizó
dosis de modificador de pH: - - - - pH de operación: 7.29

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	40	10	68	11
2	50	4	38	14
3	60	8	60	9
4	70	3	31	0
5	80	15	95	6
6	90	29	163	8

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 32 mg/L dureza total: 40 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 25 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 15 mg/L
bicarbonatos: 32 mg/L magnesio: 3.64 mg/L
calcio: 10 mg/L hierro: 0.08 mg/L manganeso: 0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento "La Carbonera"
fuente: Río Los Plátanos
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Sanarate departamento: El Progreso

características del agua cruda

color aparente: 1795 unidades Pt-Co dureza total 225 mg/L
color verdadero: 541 unidades Pt-Co dureza de calcio: 50 mg/L
turbiedad: 233 UTN dureza de magnesio: 175 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.29 unidades calcio: 20 mg/L
Alcalinidad total: 160 mg/L magnesio: 42.48 mg/L
hierro: 2.76 mg/L manganeso: 0.5 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: ácido sulfúrico al 1%
dosis de modificador de pH: 2.45 mL/L pH de operación: 6.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	40	2	25	8
2	50	13	31	4
3	60	22	108	17
4	70	24	128	19
5	80	43	221	46
6	90	19	95	24

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 18 mg/L dureza total: 200 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 50 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 150 mg/L
bicarbonatos: 18 mg/L magnesio: 36.41 mg/L
calcio: 20 mg/L hierro: 0.06 mg/L manganeso: 0.3 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento "La Carbonera".
fuente: Río Los Plátanos
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Sanarate departamento: El Progreso

características del agua cruda

color aparente: 1795 unidades Pt-Co dureza total 225 mg/L
color verdadero: 541 unidades Pt-Co dureza de calcio: 50 mg/L
turbiedad: 233 UTN dureza de magnesio: 175 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.29 unidades calcio: 20 mg/L
Alcalinidad total: 160 mg/L magnesio: 42.48 mg/L
hierro: 2.76 mg/L manganeso: 0.5 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: hidróxido de calcio (cal hidratada)
dosis de modificador de pH: 2.938 mg/L pH de operación: 8.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	40	13	72	33
2	50	3	9	7
3	60	3	3	0
4	70	8	19	7
5	80	57	294	43
6	90	11	50	15

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 36 mg/L dureza total: 200 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 50 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 150 mg/L
bicarbonatos: 36 mg/L magnesio: 36.41 mg/L
calcio: 20 mg/L hierro: 0.02 mg/L manganeso: 0.3 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento "Lo de Coy"
fuente: Ríos Xayá - Pixcayá
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Mixco departamento: Guatemala

características del agua cruda

color aparente: 326 unidades Pt-Co dureza total 90 mg/L
color verdadero: 97 unidades Pt-Co dureza de calcio: 50 mg/L
turbiedad: 58 UTN dureza de magnesio: 40 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.5 unidades calcio: 20 mg/L
Alcalinidad total: 80.0 mg/L magnesio: 9.7087 mg/L
hierro: 0.88 mg/L manganeso: 0.3 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: no se utilizó
dosis de modificador de pH: ----- pH de operación: 7.5

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	10	26	150	95
2	20	27	150	92
3	30	13	69	20
4	40	2	17	15
5	50	4	20	18
6	60	2	13	10

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 48.0 mg/L dureza total: 110 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 60 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 50 mg/L
bicarbonatos: 48.0 mg/L magnesio: 12.14 mg/L
calcio: 24 mg/L hierro: 0.0 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento "Lo de Coy"
fuente: Ríos Xayá - Pixcayá
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Mixco departamento: Guatemala

características del agua cruda

color aparente: 326 unidades Pt-Co dureza total 90 mg/L
color verdadero: 97 unidades Pt-Co dureza de calcio: 50 mg/L
turbiedad: 58 UTN dureza de magnesio: 40 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.5 unidades calcio: 20 mg/L
Alcalinidad total: 80.0 mg/L magnesio: 9.7087 mg/L
hierro: 0.88 mg/L manganeso: 0.3 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: ácido sulfúrico al 1%
dosis de modificador de pH: 2.71 mL/L pH de operación: 6.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	10	28	147	90
2	20	0	19	11
3	30	3	11	10
4	40	6	0	0
5	50	9	19	14
6	60	9	22	8

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 32.0 mg/L dureza total: 100 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 50 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 50 mg/L
bicarbonatos: 32.0 mg/L magnesio: 12.14 mg/L
calcio: 20 mg/L hierro: 0.06 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento "Lo de Coy"
fuente: R í o s X a y á - P i x c a y á
condiciones de transporte: a m b i e n t e
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: M i x c o departamento: G u a t e m a l a

características del agua cruda

color aparente: 326 unidades Pt-Co dureza total 90 mg/L
color verdadero: 97 unidades Pt-Co dureza de calcio: 50 mg/L
turbiedad: 58 UTN dureza de magnesio: 40 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.5 unidades calcio: 20 mg/L
Alcalinidad total: 80.0 mg/L magnesio: 9.7087 mg/L
hierro: 0.88 mg/L manganeso: 0.3 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: hidróxido de calcio (cal hidratada)
dosis de modificador de pH: 2.86 mg/L pH de operación: 8.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	10	33	153	103
2	20	32	142	91
3	30	26	143	63
4	40	1	2	2
5	50	0	0	0
6	60	2	12	0

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 60.0 mg/L dureza total: 70 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 35 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 35 mg/L
bicarbonatos: 60.0 mg/L magnesio: 8.49514 mg/L
calcio: 14 mg/L hierro: 0.02 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: captación
fuente: Río Los Esclavos
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Casillas departamento: Santa Rosa

características del agua cruda

color aparente: 117 unidades Pt-Co dureza total: 150 mg/L
color verdadero: 102 unidades Pt-Co dureza de calcio: 35 mg/L
turbiedad: 20 UTN dureza de magnesio: 115 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.7 unidades calcio: 14 mg/L
Alcalinidad total: 57.8 mg/L magnesio: 27.91 mg/L
hierro: 0.36 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: no se utilizó
dosis de modificador de pH: ----- pH de operación: 7.5

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	5	17	91	89
2	10	18	99	83
3	20	22	114	73
4	30	8	38	33
5	40	0	0	0
6	50	5	21	0

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 54.0 mg/L dureza total: 90 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 30 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 60 mg/L
bicarbonatos: 54.0 mg/L magnesio: 14.56 mg/L
calcio: 12 mg/L hierro: 0.02 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: captación
fuente: Río Los Esclavos
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Casillas departamento: Santa Rosa

características del agua cruda

color aparente: 117 unidades Pt-Co dureza total 150 mg/L
color verdadero: 102 unidades Pt-Co dureza de calcio: 35 mg/L
turbiedad: 20 UTN dureza de magnesio: 115 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.7 unidades calcio: 14 mg/L
Alcalinidad total: 57.8 mg/L magnesio: 27.91 mg/L
hierro: 0.36 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: ácido sulfúrico al 1 %
dosis de modificador de pH: 2.0 mL/L pH de operación: 6.01

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	5	20	113	74
2	10	15	108	39
3	20	8	40	15
4	30	12	69	12
5	40	28	158	0
6	50	35	184	0

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 28 mg/L dureza total: 120 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 40 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 80 mg/L
bicarbonatos: 28 mg/L magnesio: 19.42 mg/L
calcio: 16 mg/L hierro: 0.02 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: captación
fuente: Río Los Esclavos
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Casillas departamento: Santa Rosa

características del agua cruda

color aparente: 117 unidades Pt-Co dureza total 150 mg/L
color verdadero: 102 unidades Pt-Co dureza de calcio: 35 mg/L
turbiedad: 20 UTN dureza de magnesio: 115 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.7 unidades calcio: 14 mg/L
Alcalinidad total: 57.8 mg/L magnesio: 27.91 mg/L
hierro: 0.36 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: hidróxido de calcio (cal hidratada)
dosis de modificador de pH: 2.73 mg/L pH de operación: 8.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	5	18	86	82
2	10	15	74	73
3	20	23	102	95
4	30	8	18	14
5	40	4	5	0
6	50	6	3	0

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 49 mg/L dureza total: 190 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 30 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 160 mg/L
bicarbonatos: 49 mg/L magnesio: 38.83 mg/L
calcio: 12 mg/L hierro: 0.04 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento municipal
fuente: Río Cucabaj
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Santa Cruz del Quiché departamento: El Quiché

características del agua cruda

color aparente: 397 unidades Pt-Co dureza total 150 mg/L
color verdadero: 334 unidades Pt-Co dureza de calcio: 10 mg/L
turbiedad: 68 UTN dureza de magnesio: 140 mg/L
Potencial de hidrógeno: 6.3 unidades calcio: 4.0 mg/L
Alcalinidad total: 31.4 mg/L magnesio: 33.98 mg/L
hierro: 1.19 mg/L manganeso: 0.1 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: no se utilizó
dosis de modificador de pH: ----- pH de operación: 6.3

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	20	68	442	356
2	30	13	30	11
3	40	58	189	8
4	50	70	176	20
5	60	77	442	286
6	70	81	472	273

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 28.6 mg/L dureza total: 70.0 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 20.0 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 50.0 mg/L
bicarbonatos: 28.6 mg/L magnesio: 12.14 mg/L
calcio: 8.0 mg/L hierro: 0.14 mg/L manganeso: 0.1 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento municipal
fuente: Río Cucabaj
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Santa Cruz del Quiché departamento: El Quiché

características del agua cruda

color aparente: 397 unidades Pt-Co dureza total: 150 mg/L
color verdadero: 334 unidades Pt-Co dureza de calcio: 10 mg/L
turbiedad: 68 UTN dureza de magnesio: 140 mg/L
Potencial de hidrógeno: 6.3 unidades calcio: 4.0 mg/L
Alcalinidad total: 31.4 mg/L magnesio: 33.98 mg/L
hierro: 1.19 mg/L manganeso: 0.1 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: hidróxido de calcio (cal hidratada)
dosis de modificador de pH: 2.88 mg/l pH de operación: 7.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	20	5	33	8
2	30	80	425	147
3	40	87	463	312
4	50	89	476	307
5	60	91	483	327
6	70	88	469	236

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 19.8 mg/L dureza total: 30 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 15 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 15 mg/L
bicarbonatos: 19.8 mg/L magnesio: 3.64 mg/L
calcio: 6.0 mg/L hierro: 0.11 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento municipal
fuente: Río Cucabaj
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Santa Cruz del Quiché departamento: El Quiché

características del agua cruda

color aparente: 397 unidades Pt-Co dureza total 150 mg/L
color verdadero: 334 unidades Pt-Co dureza de calcio: 10 mg/L
turbiedad: 68 UTN dureza de magnesio: 140 mg/L
Potencial de hidrógeno: 6.3 unidades calcio: 4.0 mg/L
Alcalinidad total: 31.4 mg/L magnesio: 33.98 mg/L
hierro: 1.19 mg/L manganeso: 0.1 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: hidróxido de calcio (cal hidratada)
dosis de modificador de pH: 5.76 mg/l pH de operación: 8.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	20	71	379	329
2	30	11	58	15
3	40	10	46	1
4	50	78	404	58
5	60	84	438	295
6	70	81	421	247

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 21.0 mg/L dureza total: 25 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 15 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 10 mg/L
bicarbonatos: 19.8 mg/L magnesio: 2.427 mg/L
calcio: 6.0 mg/L hierro: 0.15 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento municipal
fuente: Río Mayuelas
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Gualán departamento: Zacapa

características del agua cruda

color aparente: 357 unidades Pt-Co dureza total 250 mg/L
color verdadero: 183 unidades Pt-Co dureza de calcio: 30 mg/L
turbiedad: 65 UTN dureza de magnesio: 220 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.20 unidades calcio: 12 mg/L
Alcalinidad total: 50.0 mg/L magnesio: 53.40 mg/L
hierro: 0.89 mg/L manganeso: 0.9 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: no se utilizó
dosis de modificador de pH: - - - - - pH de operación: 7.20

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	10	57	301	135
2	20	6	28	17
3	30	6	17	16
4	40	6	17	14
5	50	12	48	23
6	60	17	68	36

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 30.2 mg/L dureza total: 180 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 20 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 160 mg/L
bicarbonatos: 30.2 mg/L magnesio: 38.83 mg/L
calcio: 8.0 mg/L hierro: 0.02 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento municipal
fuente: R í o M a y u e l a s
condiciones de transporte: a m b i e n t e
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: G u a l á n departamento: Z a c a p a

características del agua cruda

color aparente: 357 unidades Pt-Co dureza total 250 mg/L
color verdadero: 183 unidades Pt-Co dureza de calcio: 30 mg/L
turbiedad: 65 UTN dureza de magnesio: 220 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.20 unidades calcio: 12 mg/L
Alcalinidad total: 50.0 mg/L magnesio: 53.40 mg/L
hierro: 0.89 mg/L manganeso: 0.9 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: ácido sulfúrico al 1%
dosis de modificador de pH: 1.2857 mL/L pH de operación: 6.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	10	5	50	8
2	20	5	56	0
3	30	35	239	17
4	40	43	266	38
5	50	43	266	48
6	60	44	259	54

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 18.0 mg/L dureza total: 130 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 40 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 90 mg/L
bicarbonatos: 18.0 mg/L magnesio: 21.84 mg/L
calcio: 16 mg/L hierro: 0.08 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento municipal
fuente: R í o M a y u e l a s
condiciones de transporte: a m b i e n t e
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: G u a l á n departamento: Z a c a p a

características del agua cruda

color aparente: 357 unidades Pt-Co dureza total 250 mg/L
color verdadero: 183 unidades Pt-Co dureza de calcio: 30 mg/L
turbiedad: 65 UTN dureza de magnesio: 220 mg/L
Potencial de hidrógeno: 7.20 unidades calcio: 12 mg/L
Alcalinidad total: 50.0 mg/L magnesio: 53.40 mg/L
hierro: 0.89 mg/L manganeso: 0.9 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: hidróxido de calcio (cal hidratada)
dosis de modificador de pH: 2.857 mg/L pH de operación: 8.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	10	49	270	118
2	20	2	14	0
3	30	0	5	0
4	40	2	17	6
5	50	3	17	2
6	60	8	49	11

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 44 mg/L dureza total: 50 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 25 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 25 mg/L
bicarbonatos: 44 mg/L magnesio: 6.0679 mg/L
calcio: 10 mg/L hierro: 0.05 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento municipal
fuente: R í o T a c ó
condiciones de transporte: a m b i e n t e
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Chiquimula departamento: Chiquimla

características del agua cruda

color aparente: 192 unidades Pt-Co dureza total 250 mg/L
color verdadero: 9.0 unidades Pt-Co dureza de calcio: 250 mg/L
turbiedad: 36 UTN dureza de magnesio: 0 mg/L
Potencial de hidrógeno: 8.3 unidades calcio: 100 mg/L
Alcalinidad total: 225.2 mg/L magnesio: 0 mg/L
hierro: 0.26 mg/L manganeso: 0.5 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: .no se utilizó
dosis de modificador de pH: ----- pH de operación: 8.3

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	20	1	37	11
2	30	1	36	20
3	40	0	25	11
4	50	1	30	20
5	60	1	32	13
6	70	2	28	5

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 216 mg/L dureza total: 240 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 190 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 50 mg/L
bicarbonatos: 216 mg/L magnesio: 12.14 mg/L
calcio: 76 mg/L hierro: 0.0 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento municipal
fuente: Río Tacó
condiciones de transporte: ambiente
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Chiquimula departamento: Chiquimula

características del agua cruda

color aparente: 192 unidades Pt-Co dureza total 250 mg/L
color verdadero: 9.0 unidades Pt-Co dureza de calcio: 250 mg/L
turbiedad: 36 UTN dureza de magnesio: 0 mg/L
Potencial de hidrógeno: 8.3 unidades calcio: 100 mg/L
Alcalinidad total: 225.2 mg/L magnesio: 0 mg/L
hierro: 0.26 mg/L manganeso: 0.5 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: ácido sulfúrico al 1%
dosis de modificador de pH: 7.73 mL/L pH de operación: 6.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	20	3	17	12
2	30	5	19	14
3	40	5	14	11
4	50	6	23	23
5	60	9	31	18
6	70	3	25	2

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 92.0 mg/L dureza total: 230 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 210 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 20 mg/L
bicarbonatos: 92.0 mg/L magnesio: 4.854 mg/L
calcio: 84 mg/L hierro: 0.08 mg/L manganeso: 0.2 mg/L

Prueba de dosis óptima de coagulante

identificación de la muestra

lugar: Canal de entrada a planta de tratamiento municipal
fuente: R í o T a c ó
condiciones de transporte: a m b i e n t e
volumen de muestra captada: 37.8 litros (10 galones)
municipio: Chiquimula departamento: Chiquimula

características del agua cruda

color aparente: 192 unidades Pt-Co dureza total 250 mg/L
color verdadero: 9.0 unidades Pt-Co dureza de calcio: 250 mg/L
turbiedad: 36 UTN dureza de magnesio: 0 mg/L
Potencial de hidrógeno: 8.3 unidades calcio: 100 mg/L
Alcalinidad total: 225.2 mg/L magnesio: 0 mg/L
hierro: 0.26 mg/L manganeso: 0.5 mg/L

datos de la prueba

coagulante: sulfato de aluminio
modificador de pH: ácido sulfúrico al 1%
dosis de modificador de pH: 3.5714 mL/L pH de operación: 7.0

No. de jarra	mg/L de coagulante	turbiedad (UTN)	color aparente (u. Pt-Co)	color verdadero (u. Pt-Co)
1	20	3	25	14
2	30	2	20	15
3	40	1	8	0
4	50	4	22	2
5	60	0	13	1
6	70	1	20	7

características del agua tratada en la jarra óptima

alcalinidad total: 147.4 mg/L dureza total: 210 mg/L
hidróxidos: 0 mg/L dureza de calcio: 140 mg/L
carbonatos: 0 mg/L dureza de magnesio: 70 mg/L
bicarbonatos: 147.4 mg/L magnesio: 16.99 mg/L
calcio: 56 mg/L hierro: 0.02 mg/L manganeso: 0.0 mg/L

APÉNDICE

Apéndice 1

Métodos de análisis (7)

1. Color

Para la determinación del color en el agua existen dos métodos: 1) por comparación visual de la muestra con soluciones coloreadas de concentraciones conocidas de cloroplatinato potásico y cloruro de cobalto cristalizado y, 2) el método espectrofotométrico.

1.1 Procedimiento

- a) colocar 25 mL de muestra en la celda del espectrofotómetro;
- b) calibrar en cero la escala del espectrofotómetro utilizando una celda con 25 mL de agua destilada.
- c) anotar la lectura del espectrofotómetro a 455 nm.
- d) para obtener el color verdadero, se repite el procedimiento anterior, pero previamente se filtran 25 ml de muestra

2. Determinación de la turbiedad por el método nefelométrico

2.1 Principio del método.

La nefelometría involucra la medición de la luz dispersa en una dirección específica, tal como a 90° del paso de luz incidente. La medición se realiza al hacer pasar un fuerte rayo de luz a través de la muestra. Las partículas finas que constituyen la turbiedad dispersan una porción del rayo de luz, la cual es dispersada en ángulos rectos y el rayo llega a un sensor en donde es convertido en un impulso eléctrico, el cual produce la activación del medidor. La intensidad de luz que absorbe el sensor es proporcional a la turbiedad.

Obviamente, una muestra libre de turbiedad no llevará luz a la fotocelda. Un largo paso de luz aumenta la sensibilidad de la medición fotométrica a valores bajos.

2.2 Procedimiento.

Los turbidímetros generalmente se calibran contra una suspensión de polímero de formazina que se produce mezclando soluciones de hexametilentetramina y de sulfato de hidrazina.

- 2.2.1 calibrar el turbidímetro en la escala apropiada;
- 2.2.2 insertar la celda de vidrio conteniendo la muestra a analizar;
- 2.2.3 leer en la escala seleccionada el valor de las unidades nefelométricas de turbiedad (UTN).

3. Potencial de hidrógeno (pH). Método electrométrico.

- 3.1 enjuagar los electrodos con agua destilada o desmineralizada;
- 3.2 estandarizar los electrodos sumergiéndolos en soluciones estándar de pH = 4.0 y 9.0;
- 3.3 enjuagar nuevamente los electrodos y secarlos con un paño suave;
- 3.4 sumergir los electrodos en la muestra permitiendo un tiempo suficiente para que se alcance el equilibrio térmico. Entonces se ajusta el dial de temperatura en el valor determinado con un termómetro calibrado.
- 3.5 leer las unidades de pH.

4. Alcalinidad

4.1 principio del método

La alcalinidad se determina por titulación con una solución valorada de un ácido inorgánico fuerte, a los puntos sucesivos de equivalencia del bicarbonato y del ácido carbónico, bien sea electrónicamente o por medio de indicadores.

4.2 procedimiento

- a) se toman 50 mL de muestra en un frasco erlenmeyer.
- b) se agregan tres gotas de indicador fenolftaleína
- c) si la muestra adquiere una coloración rosada, se titula con ácido sulfúrico 0.02N hasta que el color desaparezca y se anota los mL de ácido empleados. Si la muestra no adquiere color rosado, se anota la alcalinidad a la fenolftaleína como cero (0).
- d) se agregan tres gotas de indicador anaranjado de metilo.
- e) si la muestra adquiere coloración amarilla, se titula con el ácido sulfúrico 0.02N hasta que el color cambie de amarillo a naranja, y se anotan los mL de ácido empleados.
- f) las relaciones de alcalinidad se calculan según el siguiente cuadro:

titulación	hidróxidos	carbonatos	bicarbonatos
F=0	0	0	T
F<1/2T	0	2F	T-2F
F=1/2T	0	2F	0
F>1/2T	2F-T	2(F-T)	0
F=T	T	0	0

donde F es la titulación a la fenolftaleína, obtenida en el paso (c), y T es la titulación total. Los valores en mg/L como CaCO₃ para cada forma de alcalinidad se encuentran multiplicando cada cantidad por 20.

5. Hierro total.

5.1 principio del método

Éste método es el más usado en la actualidad, y se basa en que la 1,10 fenantrolina se combina con el hierro (II) para formar un ion complejo de color anaranjado rojizo que presenta la absorción máxima de luz a una longitud de onda de 508 nm. La absorbancia de la solución coloreada es proporcional a la concentración del hierro, la intensidad del color es independiente del pH entre valores de 3 a 9, y es indefinidamente estable. Es preciso asegurarse de que todo el hierro se encuentra en forma soluble, y ésto se logra haciendo una digestión con ácido sulfúrico con el propósito también de destruir la materia orgánica y eliminar los iones interferentes, tales como cianuro (CN⁻) y nitrito (NO₂⁻), y procurar la completa disolución del hierro. La solución resultante se hace 8 Normal con ácido clorhídrico y el hierro se separa de las sustancias interferentes por extracción del cloruro férrico con éter isopropílico. Como el reactivo de 1,10 fenantrolina es específico para determinar hierro (II), debe reducirse el hierro (III) a hierro (II) por medio de hidroxilamina como agente reductor y se forma así el complejo en una solución amortiguadora con acetato, por la adición de fenantrolina.

5.2 Procedimiento

- a) Tomar una muestra de 25 ml en una probeta de 100 ml y trasvasar a una celda del espectrofotómetro.
- b) añadir el contenido de un bolsillo de reactivo FerroVer (patentado por la marca HACH) y agitar. Si hay hierro presente se desarrollará una coloración naranja. Dejar reposar durante cinco minutos para que el color se desarrolle, pero no dejar más de 15 minutos.
- c) insertar la escala de medición del espectrofotómetro en el dispositivo especial y ajustar la longitud de onda en 510 nm.
- d) llenar otra celda con 25 ml de la muestra, colocar en el portaceldas, cerrar el protector de luz y ajustar la lectura del espectrofotómetro en cero mg/l.
- e) colocar la celda con la muestra preparada en el portaceldas, cerrar el protector de luz, anotar la lectura del aparato en mg/l como hierro total.

6. Manganeso. Método del periodato en frío.

6.1 principio del método

El método del periodato es muy conveniente para análisis rutinario de manganeso debido a que no se requiere de pretratamiento de la muestra para eliminar la interferencia de cloruros. El manganeso se determina fácilmente en pequeñas concentraciones por oxidación en solución ácida a ion permanganato intensamente coloreado y se mide la absorbancia de la solución resultante a una longitud de onda de 525 nm

Después de que la muestra se ha digerido con ácido para oxidar la materia orgánica y volatilizar el cloruro con HCl, se agrega ácido fosfórico para formar un complejo incoloro con el ion férrico. La oxidación con el ion periodato se verifica en una solución ácida caliente, en presencia de plata como catalizador.

6.2 Procedimiento.

- a) colocar en una celda del espectrofotómetro 25 mL de muestra; agregar el contenido de un bolsillo de buffer tipo citrato (patentado por la marca HACH) y agitar.
- b) añadir el contenido de un bolsillo de periodato de sodio (patentado por la marca HACH) y agitar hasta disolución completa. Si hay manganeso presente se desarrollará una coloración violeta. Dejar reposar por lo menos dos minutos para que el color se desarrolle, pero no más de diez minutos
- c) colocar una celda con 25 mL de muestra en el espectrofotómetro y ajustar la escala del mismo en cero, colocando la longitud de onda en 525 nm;
- d) colocar la celda con la muestra de los pasos a y b en el espectrofotómetro y proceder a anotar la lectura del mismo.

7. Determinación de dureza.

7.1 Procedimiento para dureza total

- a) medir con una pipeta exactamente 10 mL de muestra y trasvasar en un erlenmeyer para titulación.
- b) añadir 3 gotas de la solución "Hardness I" (patentado por la marca HACH) y agitar para mezclar.
- c) añadir el contenido de un bolsillo de reactivo "ManVer II" y agitar hasta disolución completa.
- d) titular con la solución "TitraVer" hasta que la coloración rosada se torne azul. (ésto se debe hacer lentamente, puesto que la reacción y la coloración resultante ocurren despacio, especialmente cuando se titulan aguas frías).
- e) el resultado en mg/L de dureza total (expresada como carbonato de calcio) se calcula multiplicando por 100 los mililitros de TitraVer usados en la titulación.

7.2 procedimiento para dureza de calcio

- a) medir con una pipeta exactamente 10 mL de la muestra y trasvasar a un erlenmeyer.
- b) añadir dos gotas de solución de hidróxido de potasio 8N y agitar.
- c) añadir el contenido de un bolsillo de reactivo "CalVer II" y agitar hasta disolución completa.
- d) titular con solución "TitraVer" hasta que la coloración rosada de la muestra se torne azul. También debe hacerse lentamente, igual que en el procedimiento anterior.
- e) el resultado en mg/L de dureza de calcio, expresado como carbonato de calcio se calcula multiplicando por 100 los mL de TitraVer usados en la titulación.
- f) la concentración de calcio en mg/L se calcula dividiendo el resultado del paso (e) dentro de 2.5.

7.3 procedimiento para dureza de magnesio.

- a) al resultado de dureza total (obtenido en el paso 7.1, inciso "e") se le resta el resultado de dureza de calcio, (obtenido en el paso 7.2. inciso "e") y se obtiene como resultado la dureza de magnesio en mg/L expresada como carbonato de calcio.
- b) la concentración de magnesio, en mg/L, se obtiene dividiendo el resultado de dureza de magnesio dentro de 4.12.

8. Prueba de jarras normalizada.

8.1 Equipo y materiales.

- seis vasos de precipitar de 2000 cm³;
- equipo de agitación (patentado por la marca Phips & Bird);
- turbidímetro nefelométrico;
- espectrofotómetro;
- potenciómetro;
- pipetas serológicas de 10 cm³;
- embudos;
- deflectores de PVC;
- jeringas desechables de 10 cm³;
- papel filtro.

8.2 Procedimiento

- a) Colocar 2000 cm³ de agua de la muestra en cada vaso de precipitar.
- b) Introducir en cada vaso los deflectores de PVC.
- c) Ensamblar el equipo de agitación con los vasos de precipitar (véase la figura 1), y conectar el agitador en 100 rpm.
- d) Colocar en una bureta una cantidad de solución de sulfato de aluminio al 2%, y trasvasar en seis vasos de precipitar de 100 cm³ la cantidad correspondiente a cada dosis que se haya seleccionado.
- e) Por medio de una aguja hipodérmica, succionar la dosis de coagulante en cada una de las jeringas.
- f) Si se requiere de la modificación del potencial de hidrógeno del agua, ésta debe hacerse previamente a la prueba de coagulación. El tiempo que demore esto no es necesario contabilizarlo.
- g) Inyectar la dosis seleccionada de coagulante a cada vaso de precipitar por medio de las jeringas y dejar la agitación de 100 rpm durante un minuto. (mezcla rápida).
- h) Una vez realizada la mezcla rápida, disminuir la velocidad del agitador a 40 rpm, y dejar flocular el agua durante 15 minutos.
- i) Luego del período de floculación, suspender la agitación, retirar el equipo de agitación, colocar los sifones para la toma de la muestra y dejar sedimentar el agua durante 20 minutos.
- j) Luego del período de sedimentación, tomar muestras de agua de cada uno de los vasos de precipitar de 2000 cm³ descartando los primeros diez cm³ y colocando los siguientes 100 cm³ en vasos de precipitar.
- k) Proceder a efectuar las mediciones de los parámetros fisico-químicos a cada una de las muestras recolectadas.