



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

ANALISIS COMPARATIVO DE
POLIMEROS NATURALES Y SINTETICOS
APLICADOS AL TRATAMIENTO DE AGUAS

JAIME VARELA SALAZAR

T R A B A J O

Presentado a la División de Estudios de
Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERIA

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

como requisito para obtener

el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(A M B I E N T A L)

CIUDAD UNIVERSITARIA

D. F., Agosto de 1986

01177
3
2ej

TEJIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RESUMEN

En el presente informe se hace una breve descripción de la teoría básica sobre coagulación y floculación, con el único objeto de introducir al tema. También se presenta la justificación para el posible uso de los ayuda coagulantes naturales en los países en desarrollo.

Se revisan los antecedentes bibliográficos, presentando algunas conclusiones de los experimentos pioneros que comparan los polielectrolitos naturales con los sintéticos, incluyendo las experiencias logradas en la India, en México y algunos otros países.

Se incluye, así mismo, una descripción de los tipos y estructuras de los polímeros naturales más comunes, indicando algunas patentes a base de ellos, seguida de una reseña de algunos usos terminales de los polímeros naturales en el tratamiento de aguas y aguas residuales.

Se detalla la obtención del almidón a base de cañagria, por ser el ayuda coagulante natural que ofrece mayores posibilidades regionales, y se termina enlistando un glosario de términos usados en el reporte, así como las referencias consultadas.

ANALISIS COMPARATIVO DE
POLIMEROS NATURALES Y SINTETICOS
APLICADOS AL TRATAMIENTO DE AGUAS

CONTENIDO

	Pág.
Resumen	
Introducción	v
I. Teoría básica sobre coagulación y floculación	1
II. Co-coagulantes naturales	20
III. Fuentes de polímeros naturales	25
IV. Algunos usos de los polímeros naturales en aguas y aguas residuales	38
V. Modelo mecánico-químico de la acción de los polielectrolitos	47
VI. Antecedentes bibliográficos	50
VII. Experiencia en la India	68
VIII. Experiencia en la U.N.A.M.	82
IX. Obtención del almidón a partir de la cañagria	86
X. Experimentación	95
XI. Conclusiones y recomendaciones	97
Referencias	103

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Primera teoría sobre el modelo físico de la doble capa (Helmholtz)	4
Fig. 1.2. Teoría de la capa difusa (Gouy-Chapman)	5
Fig. 1.3. Teoría de las dos capas (Stern)	6
Fig. 1.4. Potenciales de un coloide	8
Fig. 1.5. Tipos de mediciones electrocinéticas	11
Fig. 1.6. Fuerzas de atracción y de repulsión en un coloide	13a
Fig. 3.1. Estructura de la amilosa y la amilopectina	26
Fig. 3.2. Estructura de la goma guar	30
Fig. 3.3. Estructura de la celulosa	35
Fig. 5.1. Efecto de la carga eléctrica sobre la forma de las moléculas en solución	48
Fig. 6.1. Efecto del aniónico A sobre agua turbia sintética	54
Fig. 6.2. Efecto del catiónico B sobre agua de río	57
Fig. 6.3. Reducción de los requerimientos de alumbre por el uso del catiónico B	58
Fig. 6.4. Efectos del catiónico B	60
Fig. 6.5. Efectos del no iónico C	63
Fig. 9.1. Diagrama de bloques del proceso I para la obtención del almidón	89
Fig. 9.2. Diagrama de bloques del proceso II para la obtención del almidón	91

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla : 3.1. Floculación con goma guar	33
Tabla : 7.1. Reducción de turbiedad utilizando semillas de nirsali	71
Tabla : 7.1. Polímeros naturales probados en comparación con el alumbre	74
Tabla : 7.1. Eficiencia del chitosan como coagulante primario y como co-coagulante.	76

INTRODUCCION

Como es bien sabido, durante la práctica de los procesos de clarificación de las aguas, existen grandes problemas en la coagulación y floculación de algunos tipos de éstas, en las que solo es posible la creación de flóculos pequeños que sedimentan muy lentamente, lo que hace antieconómico el proceso. También la contaminación acelerada de las aguas introduce material interferente que hace aún más difícil las operaciones; para reducir estos problemas se usan, junto con los coagulantes metálicos tradicionales, sustancias denominadas co-coagulantes o ayudas de coagulación, que mejoran el proceso al formar flóculos más densos, que eliminan las sustancias interferentes o que pueden actuar directamente como coagulantes.

Entre la gran variedad de sustancias que se aplican como co-coagulan

tes se tienen los polielectrolitos, tantos sintéticos como naturales. Los primeros tienen la ventaja de que, debido al gran avance de la química experimental, pueden diseñarse prácticamente para cualquier fin. En cambio tienen las desventajas de su alto costo y de que a veces no se encuentran disponibles o su adquisición es muy problemática. Además, requieren una rigurosa dosificación y un monitoreo muy sofisticado lo que aumenta, aún más, el costo de las operaciones.

Para obviar los problemas anteriores, el uso de los polielectrolitos obtenidos de plantas regionales parece ser una alternativa razonable, principalmente para los países en desarrollo que carecen de una alta tecnología, pero que tienen a su disposición dichos materiales, además de mano de obra abundante y barata.

Los objetivos de este informe son los siguientes:

1. Realizar una revisión bibliográfica acerca de los co-coagulantes derivados de plantas regionales con lo cual se establecerán las bases para la realización de experimentos posteriores.
2. Comparar la utilidad de los polielectrolitos naturales y sintéticos aplicándolos a aguas con diferentes características.
3. Encontrar la eficiencia de extracción mediante pruebas preliminares, utilizando principalmente la penca de nopal.

CAPITULO I

TEORIA BASICA SOBRE COAGULACION Y FLOCULACION

Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas, con peso específico superior al del agua, llamadas floc. Dicho proceso se utiliza para ayudar a la sedimentación, lográndose eliminar lo siguiente:

- a) Turbiedad orgánica e inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- b) Color verdadero y aparente.
- c) Bacterias, virus y otros organismos susceptibles de ser separados por coagulación.
- d) Algas y plancton en general.
- e) Sustancias productoras de sabor y olor.

Hay que distinguir dos aspectos fundamentales en la coagulación-floculación del agua:

- a) La desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la eliminación de las fuerzas que las mantienen separadas; a este aspecto los autores suelen llamarle proceso de coagulación.
- b) El transporte de las partículas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de coágulos porosos, este es el llamado proceso de floculación.

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

Durante la floculación las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores.

En el segundo proceso, debe distinguirse entre floculación ortocinética y pericinéctica. La primera es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias, por ejemplo). La segunda es la promovida dentro del líquido por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro de aquél (movimiento browniano) y por la gravedad o peso de las partículas que al caer tienden a aglomerarse, y se realiza en un tiempo muy corto después de desestabilizada la partícula.

1.1. Desestabilización de las partículas coloidales (coagulación).

Dos modelos explican la coagulación: el de la doble capa, basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión, y el del puente químico, que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides.

1.1.1. Modelo físico (doble capa).

El modelo físico explica la coagulación del agua teniendo en cuenta las fuerzas electrostáticas existentes en las partículas, considerándolas rodeadas de una doble capa eléctrica que interactúa con la fase acuosa. Para explicar este concepto, se han presentado, sucesivamente, tres teorías:

- a) La primera supone que acudirán a la superficie del coloide tantos iones positivos (contraiones) del medio dispersante como sean necesarios para neutralizar su carga (ver Fig. 1.1.).

Se formará una capa adherida alrededor de él, en la que caerá todo el potencial ψ . Esta fue la teoría inicial propuesta por Helmholtz en 1879 y analizada por Nernst diez años más tarde.

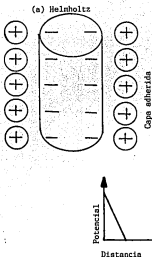


Fig. 1.1. Teoría de la capa adherida.

- b) Gouy en 1910 y Chapman en 1913 demostraron que la teoría de Helmholtz-Nernst no era adecuada, pues la agitación térmica del líquido tiende a separar los contraiones de la superficie del coloide y a formar una capa difusa alrededor de ella, en la que el potencial cae lentamente prolongándose hasta una distancia d dentro del líquido que lo rodea, como lo indica la Figura 1.2.

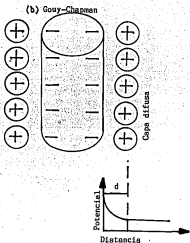


Fig. 1.2. Teoría de la capa difusa.

- c) En 1924, Stern mostró que era necesario aceptar la posibilidad de la coexistencia de ambas teorías, considerando la formación de una capa adherida y una capa difusa alrededor del coloide, como lo indica la Figura 1.3. El potencial ψ cae rápidamente en la capa adherida y lentamente en la capa difusa.

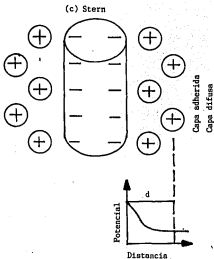


Fig. 1.3. Teoría de las dos capas.

A esta última suelen referirse los autores como "Capa de Gouy" o "Gouy-Chapman", y su espesor d (teóricamente infinito) puede determinarse prácticamente. La capa adherida es llamada "Capa de Stern". Por transportarse junto con la partícula se puede considerar como parte de la carga del coloide. Debe notarse que el espesor del doble lecho en comparación con su diámetro es muy pequeño, del orden de centésimas de micrones.

1.1.1.1. Potenciales del coloide.

En un coloide deben tenerse en cuenta, como lo indica la Figura 1.4., los siguientes potenciales:

1. El potencial ψ que existe en la superficie interior de la doble capa, donde empieza la parte difusa.
2. El potencial zeta que existe en el plano de cizalla, que es el más importante en el proceso de coagulación.

Fueron Johnson y Alexander, citados por Arboleda [1], los que definieron el potencial zeta, como la energía requerida para traer una carga unitaria desde el infinito hasta el "plano de cizalla".

Stern, sin embargo, no definió el potencial zeta de esta manera, sino como el existente al comienzo de la parte difusa, en este caso $\psi = z$.

El "plano de cizalla" es el que separa del resto de la dispersión la sección de la capa que se mueve junto con la partícula formando parte integral de ella y está situado en algún punto entre la superficie interior y la superficie exterior de la doble capa.

Como no se puede separar el coloide de los contraiones que lo rodean, el único potencial que se puede determinar con más o menos precisión es el potencial zeta, o sea el potencial en la superficie del "plano de cizalla".

1.1.1.2. Potencial zeta.

La teoría de la doble capa no es aún cabalmente comprendida.

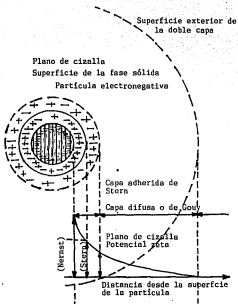


Fig. 1.4. Potenciales de un coloide

La simplificación hecha por Helmholtz da, sin embargo, una mayor comprensión del fenómeno.

Helmholtz [1] asimila la doble capa a un condensador de dos cargas iguales y opuestas separadas por un espesor d . Si las cargas son iguales a q , el potencial de dicho condensador es el potencial zeta. De acuerdo con la electrostática, este potencial varía con la constante dieléctrica D_c y viene expresado por la fórmula:

$$z = 4\pi \frac{qd}{D_c} \quad 1$$

en la que:

z = potencial zeta, en milivoltios

q = carga de la partícula, en coulombs

d = distancia efectiva, en cms.

D_c = constante dieléctrica del medio

de donde:

$$qd = \frac{zD_c}{4\pi} \quad 2$$

El producto qd , o sea la carga de la partícula por la distancia hasta la cual se le considera efectiva, es llamado el momento eléctrico del coloide y ha sido determinado experimentalmente partiendo del valor de la constante dieléctrica.

1.1.1.3. Mediciones electrocinéticas.

Para estimar el potencial en la superficie del conjunto partícula-contraciones, que se transportan unidos dentro del líquido cuando se les somete a un campo eléctrico, se suele medir el

desplazamiento diferencial y por él calcular el potencial en el plano de cizalla o potencial zeta, que será inferior al de Stern, pero no muy inferior.

Tres tipos de mediciones electrocinéticas suelen efectuarse para determinar el potencial zeta:

- a) La electroforesis
- b) La electroósmosis
- c) El potencial de corriente

La diferencia es la siguiente: si las partículas coloidales se mueven en un campo eléctrico, llevando parte de la doble capa consigo, ésto es electroforesis. Si la superficie cargada se mantiene quieta, como por ejemplo la pared de vidrio de la célula, la aplicación de un campo eléctrico en la suspensión hará que las contraiones cerca de la pared se muevan, arrastrando con ellos el líquido. Esto es electroósmosis. Igualmente, si el líquido que contiene contraiones se difunde a través de un tapón poroso éste desarrolla una diferencia de potencial entre los dos lados del tapón. Esto es "potencial de corriente".

Los conceptos anteriores se muestran en la Figura 1.5.

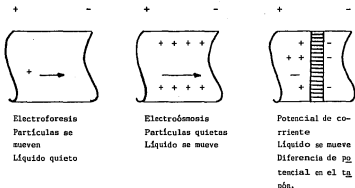


Fig. 1.5. Tipos de mediciones electrocinéticas.

La electroforesis es el procedimiento más empleado para medir el potencial zeta. - Se hace básicamente en dos formas: con el medidor de potencial zeta y con la celda de Briggs.

En ambos casos la suspensión coloidal cuyo potencial zeta se quiere medir, se coloca en una celda capilar con electrodos en los extremos, la cual va montada sobre un microscopio, provisto de retículos calibrados. Se aplica una determinada corriente a dichos electrodos, para crear una diferencia de potencial y se mira en el microscopio la velocidad con que las partículas, que se ven como puntos luminosos, se desplazan entre los retículos. Esta medición hay que hacerla en el punto de la celda en que el movimiento del agua para efectos térmicos es cero.

La velocidad con que la partícula se traslada guarda relación con el mayor o menor potencial zeta que élla posee, según la ecuación de Helmholtz-Smoluchowski.

$$v = \frac{zDc}{4\pi\mu} \quad 3$$

en la que:

v = velocidad de la partícula, cm/seg

z = potencial z en milivoltios

Dc = constante dieléctrica del medio

μ = viscosidad absoluta del agua, en poises.

de donde:

$$z = \frac{4\pi\mu v}{Dc} \quad 4$$

Para un líquido dado y a una temperatura constante:

$\frac{4\pi\mu}{Dc}$ = constante. Por tanto, $z = kv$, en donde k es una constante.

con esta última expresión se calcula el potencial zeta experimentalmente.

1.1.1.4. Estabilidad e inestabilidad de las suspensiones coloidales.

Hamaker, citado por Arboleda [1], en 1936, desarrolló su célebre teoría sobre la estabilidad e inestabilidad de los coloides liofóbicos, según la cual, éstos dependen de la acción combinada:

- a) De las fuerzas coulombicas de repulsión.
- b) De las fuerzas atractivas de Van der Waals

Si se suman, tal como se ve en la Figura 1.6., las fuerzas atractivas y repulsivas nos dan una resultante que es la marcada por la línea de puntos. Esta resultante tiene una cresta llamada barrera de energía. Para que un coloide floccule, es decir, se aglutine con otros, es necesario que las partículas se aproximen a una distancia menor que L , ésto es una distancia menor que la que existe entre el centro del coloide y la cresta de la resultante o barrera de energía. La ubicación de la barrera de energía varía con el pH. Ahora bien, los coloides se aproximan a distancia menor que la de la barrera de energía, cuando el potencial zeta baja hasta un punto llamado "punto isoelectrico," $z=0$, con lo que:

- a) Se neutraliza la carga q
- b) Disminuye o incrementando el número de iones en solución.

1. Coagulación por neutralización de la carga q .

La neutralización de la carga de coloides liofóbicos, puede hacerse:

- a) Por cambio de la concentración de los iones que determinan el potencial del coloide.
- b) Por la adsorción de iones que posean una carga opuesta a la de los iones determinantes del potencial y que sean capaces de reemplazar a éstos en la capa de Stern.

2. Coagulación por compresión de la doble capa.

Incrementando la concentración del electrolito se incorporan contraiones en la capa difusa o de Gouy-Chapman, con

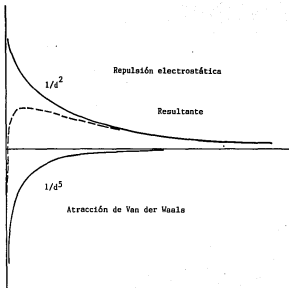


Fig. 1.6.- Fuerzas de atracción y de repulsión en un coloide.

lo cual ésta se aquieta y disminuye la magnitud de las fuerzas repulsivas, permitiendo la eliminación de la barrera de energía. Por eso, la adición de una sal neutra (electrolito indiferente) no cambia el potencial del coloide pero altera la forma de la curva de las fuerzas coulombicas, disminuyendo la distancia d hasta la cual son efectivas.

Al primer tipo de coagulación los autores lo consideran como el mecanismo de interacción de la superficie específica; al segundo, como el mecanismo de reducción de la interacción de la doble capa. No existe una línea de demarcación precisa entre estos dos mecanismos, ambos pueden actuar simultáneamente para promover la desestabilización de las partículas.

Sin embargo, la reducción del espesor de la doble capa es más importante que la reducción del potencial zeta hasta el punto isoelectrico ($\zeta=0$).

La concentración de electrolito necesaria para realizar la coagulación depende de la carga de los iones, de acuerdo con la Ley de Schulze-Hardy, que dice: "la precipitación de un coloide se efectúa por aquel ion del electrolito añadido que tenga una carga opuesta en signo a la de las partículas coloidales y el efecto de dicho ion se incrementa tanto más cuanto mayor sea el número de cargas que posea".

De acuerdo con esta ley se ha encontrado que un ion bivalente es de 30 a 60 veces más efectivo que un ion monovalente; y un ion trivalente, de 700 a 1,000 veces más efectivo que un ion monovalente.

Del modelo físico de la coagulación, tal como se ha explicado, se deducen los siguientes principios:

- a) Existe una concentración crítica de coagulación (c.c.c.) que debiera alcanzarse cuando los coloides disminuyen su potencial hasta alcanzar el punto isoeléctrico ($z=0$).
- b) La concentración crítica de coagulación (c.c.c.) debe ser independiente de la concentración de la fase dispersa o concentración de sólidos floculables en el agua.
- c) El exceso de coagulantes agregados al agua, no puede producir inestabilización de las partículas, debido a que los coloides no absorben más cargas de lo que su carga primaria lo permite.

Se ha observado, sin embargo, que la c.c.c. se alcanza con valores cercanos al punto isoeléctrico como regla general, pero no necesariamente cuando $z=0$, lo cual contradice al punto (a). Por otro lado, a mayor turbiedad, aunque no siempre, se requiere mayor cantidad de coagulante, ésto contradice el punto (b). Asimismo, si se agrega un exceso de coagulantes, la coagulación no se efectúa, o se efectúa muy pobremente, porque los coloides pueden reestabilizarse, lo que contradice el punto (c). El modelo físico por tanto, podría no explicar la totalidad del fenómeno. Algunos autores han recurrido por eso a un modelo químico para complementarlo.

1.1.2. Modelo químico de la coagulación.

El modelo químico de la coagulación considera que la carga primaria de las partículas coloidales se debe a la ionización directa de los grupos químicos presentes en la superficie de ellas, tales como hidróxilos, carboxilos, fosfatos o sulfatos y que la precipitación de los coloides se realiza por reacción de estos grupos con los iones metálicos polivalentes agregados con los coagulantes.

Según esto, el efecto desestabilizante de ciertos iones se interpreta más en términos de interacción química que exclusivamente en términos de adsorción de contraiones en la doble capa, como en el modelo físico.

La repulsión electrostática puede disminuir, pero no necesariamente eliminar la adsorción de un ion en la superficie de un electrodo que tiene una carga similar, de donde se deduce que la contribución química de la adsorción de iones, puede ser mayor, a veces, que la contribución electrostática.

Por otra parte, la desestabilización de los coloides, producida por los compuestos poliméricos que se forman en la coagulación o por polímeros como los polielectrolitos, no puede explicarse con el modelo de la doble capa.

La Mer [11] propuso, para esto, la teoría del puente químico, que supone la molécula del polímero adherida a la superficie del coloide en uno o más sitios de adsorción, dejando libre, extendida en el agua, el resto de la cadena, la cual puede pegarse de nuevo a otros coloides en sitios de adsorción vacantes. Se

forma así un puente químico entre las partículas, que permite el incremento del tamaño de éstas y promueve su eventual precipitación.

Si T es el número de segmentos por molécula que posee un polímero, y B es el número de segmentos adsorbidos por moléculas, la cantidad de segmentos libres será (T-B). La proporción de segmentos adsorbidos será B/T. Por otro lado, si Co es la concentración de polímero añadido y C la concentración residual del polímero después de realizada la adsorción, (Co-C) será la concentración adsorbida y (Co-C)N, es el número de moléculas concentradas en la interfase, donde N es el número de Avogadro.

El número de sitios cubiertos será:

$$B(Co-C)N \quad 6$$

y la fracción de sitios cubiertos en una superficie será:

$$R = \frac{B(Co-C)N}{sS_0} \quad 7$$

en donde s es el número de sitios de adsorción por unidad de área y S₀ es el área superficial de los coloides.

La probabilidad de flocular de los coloides es proporcional a la fracción de superficie cubierta (R) por el polímero y a la fracción de superficie no cubierta (1-R).

Por tanto, la velocidad de formación de floc, dNo/dt (velocidad de disminución del número de partículas primarias sin flocular) es igual a:

$$- \frac{dNo}{dt} = K_1 No^2 R(1-R) \quad 8$$

donde:

No es el número de partículas primarias sin flocular.

Partiendo de la ecuación anterior los autores concluyen que:

- a) Cuando el polímero no es absorbido ($R=0$) el floc se desintegra espontáneamente y dN_0/dt se aproxima también a cero.
- b) Cuando la superficie está totalmente cubierta ($R=1$) no se pueden formar puentes y dN_0/dt se aproxima también a cero.
- c) En cambio, cuando $R=0.5$ y la mitad de la superficie de los coloides está cubierta por los segmentos poliméricos, el floc tiene la máxima estabilidad ($dN_0/dt = \text{máxima}$).

Esto explica el que la coagulación sea pobre o no se produzca, cuando se pone un exceso de polímeros, pues, en este caso, todos los sitios de adsorción pueden quedar cubiertos ($R=1$), lo que reestabiliza las partículas sin que tal cosa signifique reversión del potencial zeta.

Por otra parte, dentro de determinadas condiciones, una suspensión desestabilizada puede estabilizarse de nuevo si se somete a una agitación violenta, puesto que las partículas llegan a quedar totalmente cubiertas por el polímero, al doblarse las cadenas poliméricas, sobre sí mismas y ocupar otros sitios en el mismo coloide al cual se han adherido.

El modelo del puente químico también explica la relación (estequiométrica) que existe entre la cantidad de superficie disponible o cantidad de coloides y la cantidad de coagulantes agregados. Además se puede comprender el hecho de que en muchos casos se obtenga coagulación óptima con polímeros que tienen una carga similar a la de los coloides.

Por último, según O'Neil [15]: "Aunque el modelo del puente químico ignora el efecto de las cargas eléctricas, explica la estequiometría y la sobredosis. Es probable que la desestabilización de las partículas coloidales por sales Fe^{+++} y Al^{+++} , no se pueda describir en forma completa por ninguno de estos dos modelos: sin embargo, la comprensión del proceso empieza con la comprensión de ambos modelos."

Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que estos modelos simplifican el fenómeno para poderlo analizar. En la práctica, en adición a los efectos químicos y electrostáticos, hay que considerar los aspectos perifericos y ortocinéticos capaces de crear segregación del coagulante dentro de la masa de agua, haciendo que su concentración no sea uniforme y que, en consecuencia, las reacciones tengan diferentes características en los diferentes puntos del líquido.

Esto quizá puede explicar por qué ninguno de los dos modelos describe la totalidad del proceso.

CAPITULO II

CO-COAGULANTES NATURALES

Se encuentran disponibles una gran cantidad de sustancias naturales y sintéticas para ayudar en los procesos de clarificación del agua. La correcta aplicación de estos ayuda coagulantes puede mejorar las características de sedimentación y la solidez del floc formado, lo cual permite períodos de sedimentación más cortos y velocidades de filtración más altas. Pero, más importante es que tales materiales pueden reducir la dosis del coagulante principal (por ejemplo: alumbre), lo cual es benéfico para aquellos países en desarrollo que tienen que importar coagulantes.

Un gran número de productos químicos sintéticos (es decir, polielectrolitos catiónicos, aniónicos y anfóteros) pueden resolver los problemas

que se suscitan en ciertos tipos de coagulación-floculación (especialmente aquellos ocasionados por la calidad y temperatura del agua durante los cambios de estación). Tales productos han sido desarrollados, principalmente, en EE.UU y Europa. En general, el uso de tales productos no es muy adecuado para aquellos países que no los producen, debido a la necesidad de importación, al cuidadoso monitoreo y regulación requeridos, y a su alto costo, su continuo suministro también es cuestionable. Una alternativa razonable, por lo tanto, es el uso de ayudas coagulantes naturales, los cuales están disponibles a bajo costo en muchos países en desarrollo.

Los ayuda coagulantes naturales pueden clasificarse en dos categorías, a saber: (1) agentes adsorbentes que ayudan a aumentar el peso del floc, y (2) polielectrolitos naturales; ambos se discuten enseguida:

2.1. Agentes adsorbentes.

Las arcillas bentoníticas, tierras fuller, y otras arcillas adsorbentes se utilizan para ayudar en la coagulación de las aguas que contienen mucho color y baja turbiedad. Ellas suministran materia suspendida adicional a través de la cual puede formarse el floc. Estas partículas floculantes son entonces capaces de sedimentar rápidamente debido al alto peso específico de las arcillas. Algunas arcillas se hinchan cuando se añaden al agua y pueden producir el floc cuando se usan ellas solas o con una dosis limitada de alumbre. La experiencia ha mostrado que la dosis de arcilla entre 10 a 50 mg/l forma un buen floc, mejora la remoción de color y de materia orgánica y amplía el rango de pH para una coagulación efectiva (American Water Works Association, 1971). Para aguas crudas de baja turbiedad (menos

de 10 UTM) la adición de arcillos adsorbentes puede reducir la dosis de alumbre requerida.

El carbonato de calcio en polvo también es efectivo para aumentar el peso del floc y además suministra alcalinidad adicional al agua, es fácil de manejar, almacenar y aplicar. Una dosis aproximada de 20 mg/l puede utilizarse para tratar aguas de baja turbiedad.

2.2. Polielectrolitos naturales.

Los polielectrolitos son derivados de fuentes naturales o sintetizados de fábrica de productos químicos. En ambos casos, su estructura consiste de unidades de pequeño peso molecular repetidas en gran número, combinadas químicamente para formar una gran molécula de tamaño coloidal llevando cargas eléctricas o grupos ionizables. Los polielectrolitos se clasifican a menudo por el tipo de carga que llevan. Así, los polímeros que poseen carga eléctrica negativa se llaman aniónicos, aquellos que poseen carga positiva son catiónicos y los que llevan cargas de ambos tipos son anfóteros. Una gran cantidad de polímeros anfóteros se derivan de fuentes naturales.

La aplicación de polielectrolitos sintéticos como ayuda coagulantes en tratamiento de aguas es adecuada únicamente en los países industrializados o en las grandes ciudades que tienen desarrollada la infraestructura para el suministro de agua y son capaces de monitorear la dosis de tales productos. Por ejemplo, un gel de poliácridamida fabricado en la India con la marca

de fabrica Polymix se ha usado durante muchos años por The Delhi Water Works. El costo de tal ayuda coagulante es de \$1.10 (1982 EE.UU \$) por kilogramo. Se ha encontrado que la máxima dosis requerida no excede de 0.30 mg/l de Polymix y 10 mg/l de alumbre, durante la temporada de lluvias cuando los niveles de turbiedad son muy altos. Con ésto se alcanzó un ahorro del 30% en el costo del proceso de coagulación.

Un reporte publicado por The International Reference Center for Community Water Supply (1973) que resume los aspectos de utilizar polielectrolitos sintéticos en el tratamiento de aguas y que explica los procedimientos para su control se ha adoptado en EE.UU. e Inglaterra. Sin embargo, en muchos países en desarrollo, los ayuda coagulantes naturales son los preferidos, debido a que no requieren una regulación estricta para su control y, usualmente, son menos costosos.

2.3. Antecedentes.

Los polielectrolitos naturales se han usado durante muchos años en algunos países para clarificar el agua. La escritura sánscrita [13] de la India, reporta que las semillas de *Stychnos potatorum* se usan desde hace 4,000 años para clarificar las aguas turbias de río. En Perú, el agua se ha clarificado tradicionalmente con la savia mucilaginosa de la tuna que se obtiene de ciertas especies de cactus (Kirchner, Arboleda y Castro, 1975). Jahn (1979) reporta que en varios países de Africa (Chad, Nigeria, Sudán y Túnez) algunas plantas indígenas se añaden al agua para

removerie la turbiedad y los olores y sabores desagradables. Así, La potencia clarificadora de los polielectrolitos naturales es conocida por los habitantes rurales de muchos países no desarrollados. Al mismo tiempo, estas sustancias también han probado su efectividad como co-coagulantes en algunos países desarrollados, tales como Gran Bretaña.

Los Británicos están entre los primeros que usaron polielectrolitos naturales como ayuda coagulantes en sus suministros de agua urbanos (Manual of British Water Engineering Practice, 1969; Peckham, 1967). El alginato de sodio, un polímero natural extraído de las algas marinas pardas se ha empleado en dosis de 0.4 a 0.5 mg/l, como ayuda del alumbre, particularmente durante los períodos de baja temperatura. Los alginatos de sodio se usan extensamente como agentes espesadores y estabilizadores en la industria alimentaria, pintado de textiles y en la industria del papel. Otros polímeros naturales que se han usado en Inglaterra son la hidroxietil celulosa y el Wisprofloc, un derivado del almidón de patata.

Sin embargo, no existen reportes cuantitativos sobre los casos mencionados anteriormente, por lo que se procederá en el capítulo VI, a hacer una revisión de los antecedentes bibliográficos.

CAPITULO III

FUENTES DE POLIMEROS NATURALES

3.1. Tipos y estructura de los polímeros naturales.

Los polímeros naturales más comunes que pueden usarse en sistemas de tratamiento de agua potable y de aguas residuales incluyen almidones, galactosos, derivados de la celulosa, polisacáridos microbianos, gelatinas y gomas. Son polímeros solubles en agua, principalmente no iónicos. Varían en estructura, peso molecular, biodegradabilidad, facilidad de disolución y temperatura de preparación.

Enseguida se da una breve descripción de los tipos más comunes.

3.1.1. Almidones.

Son hidratos de carbono, blancos, inodoros e insípidos. Proviene de fuentes tales como la patata, el maíz, el trigo, la tapioca y la cañagria. Difieren en tamaño y forma de grano, temperatura de gelatinización, velocidad de turgencia en diversos solventes y relación de amilosa a amilopectina. La Figura 3.1 muestra la composición y la estructura de la amilasa y la amilopectina.

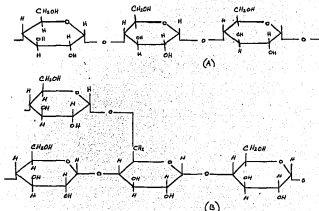


Fig. 3.1. Estructura de la amilosa (A) y de la amilopectina (B).

Se encuentran patentados algunos tipos de co-coagulantes a base de almidón. Entre ellos tenemos los siguientes:

- a) Patente N° 3,002,173 (3/19/63) de los EE.UU. Describe un producto líquido estable que consiste de un coloide hidrofílico (guar, almidón y dextrina), junto con aluminato de sodio, para asistir al floc durante el proceso de clarificación con coagulantes tales como el alumbre y el sulfato férrico.
- b) Patente N° 3,157,594 (11/17/64) de los EE.UU. Describe el uso de derivados del almidón, obtenidos por la reacción de α -alquil metilol triazona, que son particularmente útiles como floculantes de la turbiedad del agua y en el tratamiento de las aguas de alcantarillado. Son co-coagulantes del cloruro férrico y de la cal. Son capaces de proporcionar muy altas velocidades de filtración, ya que no forman gomas con el producto floculado. Además, estos productos son muy económicos tanto en su fabricación como en su uso. Reducen drásticamente el consumo de alumbre.

Se puede emplear almidón de una gran variedad de fuentes.

Es una patente de A.D. Nevers [7].

- c) Patente N° 3,423,312 (1/21/69) de los EE.UU. D.S. Blaisdell y R.E.B. Klass [14] describen un proceso para tratar aguas que elimina las desventajas de los métodos químicos a base de hierro y aluminio, los cuales tienen un grado limitado de efectividad para remover coloides y materia suspendida muy finamente dividida.

Dicho proceso es adecuado y económico para el tratamiento de residuos municipales, efluentes de fosas sépticas, fuentes individuales de residuos, residuos industriales y suministros de agua cruda.

La adición de agua con un polímero sintético catiónico como material floculante que tiene un peso molecular mayor de 10,000 y al menos un grupo amino por 10,000 unidades de peso molecular, a concentraciones de 1 a 300 ppm de residuos, junto con mineral de hierro con un tamaño de partícula menor de 50 mallas, hace que los sólidos se asienten muy eficientemente. De esta manera, las desventajas del tratamiento químico convencional para clarificar licores acuosos son sustancialmente eliminadas. Se obtienen resultados especialmente buenos si el electrolito y el hierro se combinan en la proporción 1 a 300.

Se puede utilizar el almidón catiónico con un peso molecular promedio de 1,000,000 y mineral de hierro que tenga un tamaño de malla menor de 50 (estándar, EE.UU), en cantidades suficientes para lograr la floculación y una sedimentación acelerada de los residuos, resultando una porción acuosa sustancialmente libre de sólidos suspendidos.

El almidón catiónico empleado es un almidón de maíz modificado teniendo aproximadamente un grupo amino por cada 20 unidades de anhidroglucosa. El material ferruginoso está compuesto de fierro mineral y/o cloruro férrico.

El polímero orgánico aniónico es un copolímero de anhídrido maleico y estireno caracterizado por un peso molecular aproximado de 100,000 y la bentonita es la que se encuentra comercialmente.

Se hicieron diversas pruebas para obtener los costos del proceso,

basados en precios EE.UU de 1959, es decir, \$ 0.0125 por libra de bentonita; \$ 0.01 por libra de mineral de hierro; \$ 0.05 por libra de cloruro férrico grado técnico; \$ 0.17 por libra de almidón catiónico y \$ 0.50 por libra de copolímero.

Los costos son únicamente aproximados, puesto que los efectos sinérgicos obtenidos por la interacción de los componentes muestran un grado de efectividad de al menos el doble, y algunas veces 10 veces más, que el comportamiento de los ingredientes cuando éstos se usan en forma separada.

- d) Patente N° 3,561,933 (2/9/71) de los EE.UU A.J. Restaino y W.N. Reed [7] describen el uso de mezclas de polímeros de almidón como agentes floculantes muy eficientes que pueden utilizarse para flocular sólidos dispersos finamente divididos.
- e) Patente N° 3,979,286 (9/7/76) de los EE.UU. Describe el uso de xantatos insolubles de almidón para remover iones de metales pesados de los efluentes industriales.
- f) Patente N° 4,051,316 (9/27/77) de los EE.UU. Describe el uso de compuestos de álcali - magnesio y xantatos de almidón, las cuales son capaces de remover iones de metales pesados en los efluentes industriales.
- g) Patente N° 4,083,793 (4/11/78) de los EE.UU. Describe el uso de álcali - magnesio cruzado con xantatos de almidón para remover iones de metales pesados de los efluentes industriales.

3.1.2 Galactomanosas.

Son polisacáridos compuestos de D - galactosa y D - manosa comúnmente encontrados en la endosperma de las leguminosas, donde

sirven como una reserva de alimentos. La relación de galactosa a manosa varía en diferentes especies, por ejemplo, en la goma guar (1 a 2), en la robinia o algarrobo (1 a 4) y en tara (1 a 3). La especie más importante para el tratamiento de aguas es el guar, cuya estructura básica se muestra en la Figura 3.2. Es una leguminosa que se ha adaptado en las regiones semáridas de México y EE.UU, donde se le conoce como "cluster bean".

La General Mills Inc. fabrica el Super Col Gum y recomienda una concentración máxima de 10 ppm.

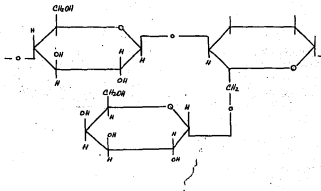


Figura 3.2. Estructura del guar.

Algunas patentes a base de la goma guar son las siguientes:

- a) Patente N° 3,082,173 (3/19/63) de los EE.UU. Describe un producto líquido estable consistente de un coloide hidrofílico (guar, almidón y dextrina) junto con aluminato de sodio, para asistir al floc durante el proceso de clarificación con coagulantes tales como el alumbre y el sulfato férrico.
- b) Patente N° 3,498,912 (3/3/70) de los EE.UU. D.L. Kieper y S.S. Treichel [7] describen un proceso para la remoción de sólidos suspendidos y para la reducción de la DBO de efluentes residuales tales como desechos crudos o efluentes industriales utilizando un derivado catiónico de una goma poligalactomanosa en combinación con un metal catiónico polivalente.

Se habían hecho varios intentos para reducir los sólidos suspendidos y la DBO de desechos crudos, pero no se alcanzaban resultados satisfactorios. Por medio de este proceso es posible obtener un alto nivel de remoción de sólidos suspendidos, hasta un 90 - 95%, y reducir la DBO por sobre un 50%.

Como se indicó anteriormente, el proceso incluye la combinación de reactivos. Las gomas poligalactomanosas están disponibles en el comercio. Las más comunes de éstas son la goma guar y la goma de algarrobo (locust bean gum), las cuales son particularmente útiles. Los derivados preferidos de estas gomas son los grupos amino y el amonio cuaternario, lo que se logra haciéndolas reaccionar con compuestos que contengan aminas o con amonio cuaternario.

El tratamiento de los residuos con estos reactivos es relativamen-

te simple. Primero se añade el metal polivalente con el fin de efectuar la neutralización de la carga y espesar la coagulación de las partículas suspendidas, enseguida se añaden las poligalactomanosas. Sin embargo, los reactivos también pueden añadirse simultáneamente. En ambos casos deben añadirse en forma de solución. El residuo se agita después de la adición del metal polivalente y también después de que se añade la goma la agitación debe continuar durante un tiempo adecuado.

Después se continúa la agitación, pero a una velocidad más baja, para permitir que las partículas floculen y aumenten su tamaño. Enseguida el residuo pasa al sedimentador en donde la materia sólida se asienta.

En un ejemplo de laboratorio se trató el residuo crudo con el objetivo de determinar la eficiencia del tratamiento. El experimento se hizo en un aparato para prueba de jarra (coagulador-floculador).

Primero se añadió el compuesto del metal polivalente con una velocidad de agitación de 99 rpm y enseguida se añadió la goma. Esta agitación duró 2 minutos, enseguida se agitó a 20 rpm durante 15 minutos y se permitió un asentamiento de 30 minutos. La Tabla 3.1 ilustra el efecto del tratamiento.

Para propósito de comparación también se reporta el tratamiento sin co-coagulante.

Prueba N° 1	Sólidos Suspendidos	DBO
Residuo crudo - - - - -	305	244
Efluente después del mezclado		
Floculación y asentamiento - - - - -	56	143
Efluente después del tratamiento con 10 ppm de Fe Cl ₃ y 1.5 ppm de guar A - - - - -	25	116
Prueba N° 2		
Residuo crudo- - - - -	101	155
Efluente después de mezclado		
Floculación y asentamiento- - - - -	44	98
Efluente después del tratamiento con 10 ppm de Fe Cl ₃ y 1.5 ppm de guar A- - - - -	8	70
Prueba N° 3		
Residuo crudo- - - - -	291	250
Efluente después de mezclado		
Floculación y asentamiento- - - - -	72	152
Efluente después del tratamiento con 10 ppm de Fe Cl ₃ y 1.5 ppm de guar A- - - - -	12	115

Guar A=Beta-hidroxipropil trimetil cloruro de amonio cuaternario guar eter.

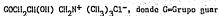


Tabla 3.1. Floculación con goma guar.

3.1.3. Derivados de la celulosa.

La celulosa es un carbohidrato compuesto de unidades de anhidroglucosa que tienen la fórmula empírica $C_6H_{10}O_5$. Esta es la estructura elemental de las células de la corteza de los árboles y otras plantas superiores.

Los derivados de la celulosa incluyen nitrato de celulosa, acetato de celulosa, metil celulosa, carboximetilcelulosa, hidroetilcelulosa e hidroxipropilcelulosa. El derivado más utilizado en tratamiento de aguas es la hidroximetilcelulosa.

La celulosa es un polímero polidisperso de alto peso molecular compuesto de largas cadenas de unidades de D-glucosa unidas por enlaces β 1-4 glicosídicos. Las unidades de anhidroglucosa contienen tres grupos hidroxílicos, uno primario y dos secundarios. La Figura N° 15 muestra la estructura de la celulosa.

La Hercules Powder Co., fabrica la carboximetilcelulosa y recomienda una concentración máxima de 1 ppm.

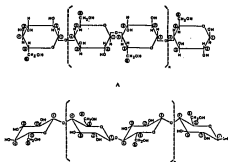


Figura 3.3. Estructura de la celulosa.

Algunas patentes son las siguientes:

- a) Patente N° 3,066,095 (11/27/62) de EE.UU. J.J. Hronas [7] encontró que la adición de alguno de los coagulantes comunes al agua cruda seguida de pequeñas dosis de arcillas bentoníticas y ciertos polielectrolitos es capaz de reducir drásticamente el tiempo de formación de los flóculos y acelerar el asentamiento de los mismos en el proceso de clarificación.

Aparentemente la adición de polielectrolitos incrementa la densidad de carga superficial de las arcillas o de los flóculos, aumentando su capacidad para adsorber los sólidos suspendidos en el agua. Los polielectrolitos que se han encontrado particularmente efectivos son derivados solubles de la celulosa y las poli(acrilamidas).

- b) Patente N° 3,338,828 (9/29/67) de EE.UU. J.R. Clark [7] describe un tratamiento de aguas y desechos acuosos con mayores velocidades de coagulación, asentamiento y clarificación, lo cual reduce el tamaño de las plantas de tratamiento y genera una economía en las cantidades de los coagulantes y de los co-coagulantes, mejorando también la remoción de sabor, olor y color.

Se añade al agua o al desecho acuoso un coagulante inorgánico, un co-coagulante en forma de polielectrolito orgánico y pequeñas cantidades de cenizas para formar un gran floc.

Son particularmente adecuados los polielectrolitos derivados de la celulosa tales como hidroxietilcelulosa, carboximetilcelulosa, almidón modificado y algunos polisacáridos.

3.1.4. Polisacáridos microbiales.

Los polisacáridos microbiales son polímeros de alto peso molecular sintetizados a partir de azúcares simples tales como la glucosa por fermentación en un medio acuoso que contenga bacterias no patógenas, enzimas, nutrientes, oxígeno y trazas de catalizadores metálicos.

Algunas patentes son:

- a) Patente N° 3,406,114 (10/10/67) de EE.UU. Trata de polisacáridos microbiales como agentes floculantes para sólidos suspendidos finamente divididos.
- b) Patente N° 3,285,849 (11/15/66) de EE.UU. Describe un floculante para polvo muy fino de carbón, por reacción de polisacáridos o sus derivados con resinas que contengan nitrógeno, como la urea, y adición de sales inorgánicas a la suspensión.

3.1.5. Gomas y gelatinas.

Las gomas usadas en tratamiento de aguas se obtienen del colágeno, que es el principal constituyente del tejido conectivo de los animales, encontrado en pieles, nervios y huesos. La goma animal está estrechamente relacionada con la gelatina y es un producto de la hidrólisis del colágeno.

CAPITULO IV

ALGUNOS USOS DE LOS POLIMEROS NATURALES EN AGUAS Y AGUAS RESIDUALES.

4.1. Obtención de aluminio.

La principal fuente de aluminio es la bauxita, la cual se trata por el Proceso Baeyer (alta causticidad, alta temperatura) para producir alúmina. La alúmina se mezcla entonces con criolita y se electroliza para producir cátodos de aluminio. En el proceso de producción de alúmina se requiere una separación sólido-líquido para remover la solución lixiviada que consiste de aluminato de sodio, sosa caústica y silicatos de un residuo de sólidos finamente divididos consistente de óxidos de fierro, algo de

delonita y varios silicatos. Este residuo se llama lodo rojo debido al color que le dan los óxidos de fierro.

El polímero que más se usa para separar los lodos rojos es el almidón. Dependiendo del tiempo, temperatura y contenido de causticidad se pueden utilizar diferentes fuentes de almidón tales como maíz, patatas, sorgo y tapioca. Debido a su precio y disponibilidad, en EE.UU se prefiere el almidón de maíz.

La función realizada por el almidón incluye asentamiento rápido de sólidos, clarificación de los licores de aluminatos, ayuda a recuperar la sosa caústica por lavado a contra corriente en 6-9 etapas y, por lo tanto, también minimiza la cantidad de caústicos tirados hacia el medio ambiente.

Las dosis de almidón requeridas van desde 1 a 2 lb/ton. de lodos rojo en las bauxitas de Surinam, hasta 40 lb/ton. de lodos rojos en los minerales de Jamaica.

Recientemente se han utilizado polímeros sintéticos tales como los acrilatos de sodio, ya que requieren dosis bajas y producen lodos de alta densidad. Sin embargo, debido a su alto precio (\$1.50/lb) y a la pobre claridad que producen, parece ser que el almidón se conservará en uso.

4.2. Efluentes de fábricas de papel.

Los molinos de papel de seda producen artículos como papel para servilletas, papel para baño, para cigarrros, papel facial, etc.

El efluente de estas plantas lleva un alto contenido de sólidos.

dos suspendidos y de DBO, por lo que se requiere un tratamiento para reducirlos y así proteger la vida de los peces y las fuentes de aprovisionamiento de agua. Debido a ésto se han incorporado plantas de tratamiento antes de las descargas. Estas incluyen procesos de flotación, algunas veces referidos como Sven-Pedersen, para remover las fibras finas del efluente.

Los mejores reactantes para este tipo de efluentes han sido los guares catiónicos de mediana densidad de carga los cuales causan la floculación de las fibras por puentes seguido de una adsorción por puentes de hidrógeno y por atracción electrostática. Esto es facilitado por las características aniónicas y de hidratación de las fibras. Los flocs resultantes se presurizan con aire saturado con agua y luego flotan con las burbujas de aire desprendidas cuando se exponen a la presión atmosférica normal. Los sólidos suspendidos que permanecen en el efluente después de este tratamiento son generalmente menores a 20 ppm y la DBO es aceptable.

El guar catiónico se usa en forma de polvo. Son ejemplos de productos comerciales Jaguar C-13, fabricado por Celanese Plastics and Specialties Company, y Gendriv, fabricado por Henkel. Estos productos satisfacen las especificaciones de U.S. Food and Drug Administration (FDA). Las dosis varían desde 1 a 2 mg/l, basadas en el peso del licor que va a tratarse. La preparación del polvo es generalmente de 0.25 a 0.50% en agua desmineralizada o en agua de repuesto. Deben de hidratarse cuando menos una hora antes de su uso y luego diluirse

con agua de reciclaje o de proceso a 0.05% o menos, antes de entrar al efluente que va a tratarse. Los productos competitivos, incluyendo polímeros naturales y sintéticos, no son tan efectivos como los guares catiónicos para producir la claridad requerida del efluente.

4.3. Agua potable.

El agua potable debe reunir muy estrictos estándares con respecto a pH, dureza, conteo de bacterias, sólidos suspendidos, etc. Los polielectrolitos pueden usarse como co-coagulantes junto con coagulantes tales como ácido, cal, alumbre y aluminato de sodio para renovar los sólidos suspendidos y/o precipitados asociados con la remoción de dureza. Los polielectrolitos se usan principalmente con aguas de ríos.

Los polímeros naturales más comúnmente usados con aguas de ríos incluyen guares no iónicos y catiónicos y almidón de patatas pregelatinizado. Estos y otros polímeros han sido aprobados por el Departamento de Salud, Educación y Bienestar (EE.UU) en cantidades del orden de 1 mg/l o menos.

La principal aplicación es como ayudantes de sedimentación en recipientes de sistemas convencionales y en unidades cilíndricas en donde ayudan a formar una capa de lodo permeable y coherente, por lo tanto, funcionan algunas veces como filtros. En otras aplicaciones el polímero puede añadirse a la alimentación de filtros de arena que funcionan por gravedad, a filtros de medio múltiples o a filtros a presión. En estos casos la turbiedad del filtrado se reduce a menos de 1 mg/l y puede aumentarse

el tiempo de operación del filtro entre cada lavado.

El polielectrolito usualmente se añade al influente enseguida de la adición del coagulante en cantidades que van desde 0.1 a 0.5 mg/l. El polímero se prepara en soluciones de 0.25 a 1.0% con dilución hasta 0.05% con agua cruda o agua de proceso antes de entrar en contacto con el agua que va a tratarse.

El guar catiónico puede ser especialmente efectivo cuando hay cantidades significativas de arcilla en el influente, principalmente durante la temporada de grandes avenidas.

Los principales competidores de los polímeros naturales son las poliacrilamidas no iónicas de alto peso molecular que tienen un contenido de monómero libre inferior a 0.5%.

4.4. Beneficio de minerales de hierro.

Muchos minerales de hierro se procesan con métodos que emplean grandes cantidades de agua, por ejemplo, 1,000 a 2,000 gal/ton. Estos incluyen procesos de gravitación, separación magnética y flotación. Los desechos finos que se producen tienen que separarse del agua para proveer una recirculación del 85 al 95% y también para prevenir la contaminación a través de los escapes hacia tierra. Muchas operaciones en EE.UU y Canadá usan polímeros, los cuales se alimentan a los desechos finos espesando el agua y luego descargando hacia áreas de disposición.

Hasta 1977 un guar catiónico se utilizó en una gran planta de Canadá. Este producto con una baja densidad de carga y un peso molecular menor de 200,000, fué suplantado por una poliamida

de alta densidad de carga. Los niveles usados fueron alrededor de 0.5 a 1.0 mg/l. Su uso no únicamente ayudó a la separación sólido - líquido, sino que fué suficientemente efectivo para clarificar el agua y permitir una buena filtración de los minerales concentrados sin obstruir los filtros.

Varias plantas usan una combinación de cal y de almidón "caustizado." La dosis de almidón va de 0.2 a 0.5 lb/ton de sólidos. La cal ayuda a la coagulación de los coloides de óxidos de hierro y silicatos mientras que el almidón aumenta el tamaño del floc. Los polímeros sintéticos están compitiendo debido a su comportamiento y facilidad de manejo (menos trabajo para prepararlos). El almidón requiere en su preparación un tratamiento caústico y, algunas veces, calentamiento (180°F). Generalmente el almidón se prepara como una solución al 1-5% y se diluye con agua de proceso antes de usarse.

4.5. Obtención de soda ash a partir de minerales de trona.

La soda ash (carbonato de sodio) se obtiene por medio sintético a partir del proceso Solvay y en forma natural a partir de los minerales de trona por lixiviación, purificación y recristalización. Algunos polielectrolitos naturales como guar no iónico y en algunos casos guar catiónico se usan para flocular las impurezas (tipo arcilla) y clarificar los licores saturados de carbonato antes de la filtración y la recristalización. Esto se lleva a cabo a temperaturas elevadas seguido de la digestión del mineral calcinado por adición del floculante a la alisección que se va a clarificar, para que las arcillas floculen y se asienten.

4.6. Lavado de carbón.

Durante los últimos años se ha puesto mucho énfasis en producir carbón de tamaño muy fino por flotación con aire disperso. También se ha puesto en práctica la recirculación del agua para minimizar el volumen de efluentes y además cumplir con las normas en cuanto a pH, DBO, sales ferrosas, sales férricas y turbiedad. Además, es necesario lavar los desechos.

A principios de los sesentas la floculación en Virginia y Pensilvania fué dominada por el almidón de maíz y de patata el cual requiere cocimiento hasta 180°F para preparar concentraciones de 2-5%. El rango de la dosis fué de 0.25 a 1.0 lb/ton. de sólidos secos. El comportamiento dejó mucho que desear, por lo que se utilizó una mezcla con poliacrilamidas. El uso de polímeros naturales disminuyó debido a que los sintéticos requieren un quinto o menos de dosis para producir asentamientos más rápidos.

En el Oeste de EE.UU las minas que contienen grandes cantidades de arcilla reportan el uso en serie de guar no iónico con poliacrilamidas aniónicas para conservar bajos los costos y facilitar un mejor tratamiento de las arcillas muy finas.

4.7. Procesamiento de minerales de uranio.

El uranio se obtiene a partir de areniscas y esquistos en Colorado, Wyoming, Nuevo México, Texas y Utah.

En Africa del Sur el uranio está asociado con el oro y en Canadá se obtiene a partir de minerales de brannerite. El proce-

so es por lixiviación ácida o con carbonato seguida de una separación sólido líquido y una decontación a contra corriente en espesadores o filtros.

Se usa guar o sus derivados solos o junto con poliacrilamidas para lograr una mejor separación sólido-líquido. Otros polímeros naturales han sido inefectivos en comparación con las poliacrilamidas excepto las gomas usadas en Canadá, EE.UU y el Sur de Africa para producir buena clarificación. La propensión a crear hongos ha desanimado el uso de las gomas.

El guar es especialmente efectivo como ayuda filtro debido a la regularidad de la forma de su floc.

En un gran número de plantas se utilizan mezclas de guar y poliacrilamidas para crear sinergismo y así reducir los costos.

4.6. Remoción de metales pesados del agua.

Debido a los requerimientos que establecen las normas, no es posible descargar los metales pesados junto con las aguas residuales. Trabajos desarrollados por el Departamento de Agricultura de Peoria, Ill., han mostrado que los xantatos de almidón pueden utilizarse para precipitar metales tales como Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Mn, Hg, Ni, Ag y Zn. Cuando se usan en conjunto con polianinas estos metales pueden eliminarse fácilmente. El comportamiento es superior al que se obtiene con cal o sosa cáustica solos, el volumen de lodos es menor y menos gelatinoso que el que se obtiene por métodos químicos de precipitación y el pH efectivo tiene un rango de 3 a 11.

4.9. Residuos radioactivos.

Un problema muy especial existe durante el transporte de residuos radiactivos hacia los sitios donde van a enterrarse para su disposición final. Puesto que están, usualmente, en forma de licores ácidos, hay peligro de filtraciones o derrames durante su traslado, por lo que se han hecho esfuerzos para producir geles estables por solidificación parcial del licor. Se han considerado los polímeros naturales, tales como el guar, debido a su habilidad para formar geles estables. El gel no permanece estable indefinidamente, únicamente el tiempo necesario para su transportación completa.

CAPITULO V

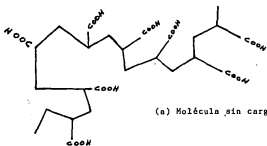
MODELO MECANICO-QUIMICO DE LA ACCION DE LOS POLIELECTROLITOS.

Como se ha visto algunos polielectrolitos, aún a muy bajas concentraciones, producen resultados espectaculares en el proceso de coagulación. Es necesario, por lo tanto, exsinar la naturaleza y propiedades de estos materiales con el fin de explicar su modo de acción.

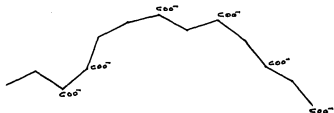
Según el modelo de Black [3] el polielectrolito sin carga puede compararse con un resorte enrollado. Esta forma es el resultado de las fuerzas al azar que existen alrededor del polielectrolito.

Cuando el polímero básico se neutraliza con ácido o un polímero ácido se neutraliza con una base, los iones de la base o ácido neutralizado

se disocian de la cadena, dejando cargas en los puntos de disociación. Por ejemplo, si un polímero ácido es 10% neutralizado con una base, cada décima de la molécula en la cadena tendrá carga negativa. Estas cargas pueden repeler a otras y la cadena comienza a desarrollarse estirándose la molécula con un consecuente incremento en la viscosidad, lo cual se muestra en la Figura 5.1.



(a) Molécula sin carga



(b) Molécula cargada

Fig. 5.1. Efecto de la carga eléctrica sobre la forma de las moléculas en solución.

A medida que la neutralización procede y aparecen más sitios cargados en la molécula, ésta se desdobra más, hasta que queda en línea recta alcanzando su máxima viscosidad. Entonces los sitios cargados en la cadena del polímero atraen iones o coloides de carga opuesta o pueden cruzarse con otros polímeros de carga opuesta. Este efecto "mecano-químico" ha sido extensamente estudiado en el laboratorio, utilizando una balanza de brazos para medir la contracción o expansión del polímero. Uno puede imaginar las grandes cadenas de polielectrolitos sintéticos o naturales como pequeños músculos suspendidos en el agua, los cuales atraen y aglomeran las partículas que en ella encuentran.

El mecanismo anterior explica la acción de algunos polielectrolitos como ayuda coagulantes, pero no de todos. Por ejemplo la alta viscosidad de soluciones de materiales naturales no iónicos como el almidón y la goma guar es, probablemente, el resultado de la rápida hidratación de las moléculas altamente hidrofílicas, aunque actualmente existe el almidón catiónico, el cual está disponible comercialmente.

CAPITULO VI

ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS

Uno de los primeros estudios cuantitativos que se hicieron acerca de los polielectrolitos sintéticos y naturales es el de Cohen, Rourke y Woodward [5], que han estudiado y comparado dichos polielectrolitos, obteniendo algunas conclusiones muy valiosas. Anteriormente a sus estudios no había un competidor serio para la sílica activada como ayuda coagulante en los procesos de clarificación del agua y las referencias anteriores se refieren a procedimientos empíricos, hasta que dichos autores demostraron la efectividad de los polielectrolitos como ayuda coagulantes, ya que producen un gran floc y altas velocidades de asentamiento, cuando se usan junto con los coagulantes químicos tradicionales. Se sabe que anteriormente a ellos, unos 3 ó 4 años antes, se hicieron estudios con polímeros, pero

la literatura no reporta gran cosa acerca de estos nuevos compuestos.

Una excepción notable es el artículo publicado por Johnson [10], quien estudió el efecto de los polielectrolitos, ya sea actuando solos o en conjunto con coagulantes metálicos. Este autor enfocó sus experimentos al estudio de polímeros naturales (almidón) y sintéticos (polielectrolitos catiónicos y aniónicos). Su conclusión fué que "los polielectrolitos muestran resultados promisorios en los estudios realizados y pueden convertirse en importantes suplementos o auxiliares en los procesos de clarificación."

También existen estudios de Gardner y Ray [6] acerca del uso de polielectrolitos en el tratamiento de residuos industriales, especialmente durante el desbastado de minerales (dressing) y en las operaciones de lavado.

La Mer y Smellie [12] también investigaron el uso de estos materiales, reportando que el almidón modificado es un floculante efectivo y de bajo costo. Esto está de acuerdo con lo reportado por Johnson [10], el cual encontró que el almidón es un buen clarificador para aguas con alto contenido de cobre. En su estudio preparó almidón de patata de la siguiente manera: se suspendieron 1.75 gramos de almidón en 400 mililitros de agua deionizada y se agregaron 100 ml de solución de hidróxido de sodio al 10%. Dicho autor no reporta valores graficados ni tabulados, sino que sus conclusiones las apoya en fotografías tomadas antes y después de las pruebas.

Como los trabajos de Cohen et al [5] son pioneros en este campo, vale la pena relatarlos con cierto detalle.

Su estudio se dividió en tres fases:

1. Usando un polielectrolito aniónico sintético
2. Probando un polielectrolito catiónico sintético
3. Empleando un polielectrolito natural.

El coagulante fue el alumbre, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, el cual se adicionó cuando el agitador estaba operando y la floculación se llevó a cabo agitando durante 30 minutos a 42 rpm, dejando sedimentar durante 30 minutos. La medida de la turbiedad se hizo en un espectrofotómetro a una longitud de onda de $470 \text{ m}\mu$, usando celdas de 5 cm. La turbiedad de referencia se tomó preparando agua turbia con arcilla finamente dividida disuelta en agua y calibrando con un turbidímetro Jackson.

Para representar a los tres polielectrolitos se utilizaron los siguientes compuestos comerciales:

1. Aniónico A. Se utilizó poliacrilamida. Su hidrólisis parcial resultó en el reemplazo de algunos grupos amidas con grupos carboxilos, lo que la convierte de un polímero sin carga en un polielectrolito aniónico. Este compuesto se suministra como un sólido amorfo, blanco, en forma de pequeñas escamas, a partir del cual se preparan las soluciones.
2. Catiónico B. Se empleó un éxar coloreado, en forma de líquido caústico y ligeramente viscoso. Esta solución contiene un polímero orgánico catiónico en una solución caústica aproximadamente 1 Normal, miscible en el agua en todas proporciones.
3. No Iónico. Se utilizó una mezcla de un polielectrolito suministrada por los fabricantes. Las pruebas realizadas en

el laboratorio demostraron que el ingrediente activo de esta mezcla es un derivado de la celulosa, probablemente similar a la carboximetilcelulosa.

Aniónico A. Se hizo un estudio preliminar preparando agua turbia en el laboratorio. La turbiedad de esta agua varió de 90 a 110 unidades y la alcalinidad de 50 a 54 mg/l como carbonato de calcio.

Se probó adicionando el polielectrolito antes y después del coagulante metálico (alumbre). Los resultados muestran que la secuencia de adición es prácticamente indiferente, es decir, la adición del polielectrolito puede hacerse antes o después del coagulante metálico, no afectando los resultados. Trabajos subsiguientes mostraron, sin embargo, que el tiempo óptimo de adición varía con las características del agua que se está tratando.

La concentración óptima del aniónico A se determinó añadiendo diferentes cantidades al agua turbia, con una concentración de 10 mg/l de alumbre. El criterio para juzgar la calidad de la coagulación se consideró midiendo la turbiedad residual después de 30 minutos de asentamiento.

El principal efecto del polielectrolito sobre la coagulación fué un gran incremento en el tamaño del floc, lo cual se demostró analíticamente por la medición de un gran incremento en la velocidad de asentamiento. Este efecto se muestra en la Figura 6.1.

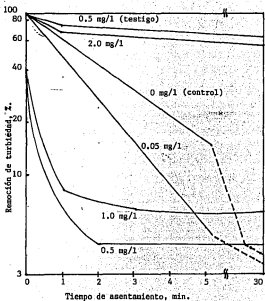


Fig. 6.1.- Efecto del Aniónico A sobre agua turbia sintética.

El máximo beneficio (una gran velocidad de asentamiento y una baja turbiedad residual) se obtuvo con una dosificación de 0.5 mg/l. Cuando se aumentó la concentración a 1 mg/l, se observó una disminución en el beneficio (mayor turbiedad residual), mientras que con 2 mg/l hubo interferencias y una casi completa inhibición de la coagulación.

Los resultados que se obtuvieron con la adición de 0.5 mg/l de aniónico A, sin alumbre, muestran que este polielectrolito no es un coagulante, sino más bien un ayuda coagulante que necesita de la formación anterior del floc por algún coagulante metálico.

También se demostró que para obtener los máximos beneficios la concentración del aniónico A debe aumentarse linealmente con la dosificación de alumbre.

Entre otras observaciones, se hicieron varias pruebas para determinar los efectos de factores tales como pH, alcalinidad, dureza y turbiedad, sobre el uso del aniónico A. Se concluyó que el aniónico A no afecta el pH más allá de lo que puede afectarlo la coagulación con alumbre solo. Cuando se obtiene una buena coagulación con alumbre, la adición de aniónico A da un mejor resultado. Con valores de pH que dan resultados insatisfactorios de coagulación con alumbre, la adición de aniónico A da resultados solo ligeramente superiores.

Se pueden obtener mayores velocidades de asentamiento con el aniónico A dentro de un gran rango de alcalinidades, 5-300 mg/l, en presencia de una gran variedad de grados de dureza, 0-1,600 mg/l, y dentro de un gran rango de turbiedades que va de 50 a 540 unidades.

La actividad del aniónico A, por lo tanto, es independiente de las características físicas y químicas del agua, necesitando que, como único requisito, exista un floc producido por un coagulante metálico.

Catiónico B. Con el catiónico B se observó, preliminarmente, que el agua utilizada para el aniónico A no se benefició. Trabajos posteriores demostraron que el catiónico B no tiene efectos sobre la coagulación cuando el agua tiene bajo contenido o ausencia de minerales.

Estos hechos obligaron a preparar agua con arcilla suspendida, similar a la de un río (el Río Cincinati).

La adición de catiónico B a la coagulación con alumbre de este tipo de aguas da incrementos en las velocidades de asentamiento, tal como se muestra en la Figura 6.2.

Cuando el agua de prueba se diluyó con igual cantidad de agua destilada, lo cual produce agua ligeramente mineralizada, con alrededor de 20 mg/l de alcalinidad, no se obtuvieron beneficios demostrando que las sustancias disueltas y no las partículas de arcilla son responsables de la falta de actividad.

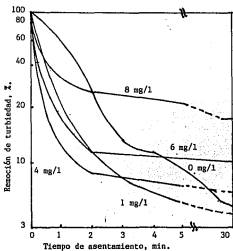


Fig. 6.2.- Efecto del Catiónico B sobre el agua del río Cincinnati.

El Catiónico B se añadió en las cantidades indicadas. Todas las soluciones contenían 10 mg/l de alumbre.

También se hicieron estudios para evaluar la disminución del alumbre requerido utilizando el catiónico B. Los resultados se muestran en la Figura 6.3.

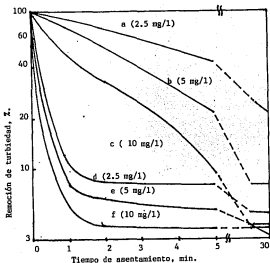


Fig. 6.3. Reducción de los requerimientos de alumbre por el uso del Catiónico B.

Las curvas a, b y c representan cantidades incrementadas de alumbre de 2.5, 5 y 10 mg/l, respectivamente. La dosificación de 10 mg/l produce la coagulación más aceptable. La adición de 8 mg/l de catiónico B a cada una de las concentraciones de alumbre mencionadas, mostradas en las curvas d, e y f, producen una coagulación mucho mejor. En esta prueba, la combinación de 2.5 mg/l de alumbre y 8 mg/l de catiónico B fue superior en cuatro veces, al uso de 10 mg/l de alumbre solo.

En la Figura 6.4, la curva a representa una coagulación obtenida con la adición de 8 mg/l de catiónico B, sin adición de coagulante, produciendo un efluente que probablemente pueda ser adecuado para aplicación a filtros de arena. A este respecto, el catiónico B difiere marcadamente del aniónico A, el cual fue incapaz de producir coagulación por sí solo.

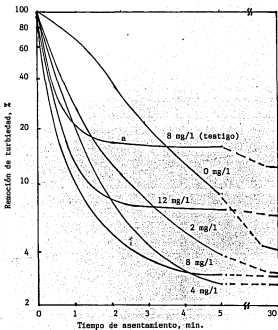


Fig. 6.4.-- Efecto del Catiónico B. El Catiónico B se añadió en las cantidades mostradas; todas las soluciones, excepto la indicada, contenían 20 mg/l de alumbre.

Por otro lado, el catiónico B puede reducir las interferencias ocasionadas por el tripolifosfato de sodio (un componente de los detergentes sintéticos), lo cual no puede lograrse con el aniónico A.

Los compuestos de lignina, que producen color difícil de eliminar, también dificultan el tratamiento por coagulación, incrementando la cantidad requerida de alumbre, porque el floc formado es fino y de lento asentamiento. El catiónico B puede ayudar a disminuir estos efectos indeseables.

También es importante el comportamiento respecto a su carga. Ives [9] demostró, por medio de experimentos electroforéticos, que las algas y el plancton en general tienen carga eléctrica similar a la de los coloides no vivientes. Todas las algas investigadas fueron electromeritas a todos los valores de pH, por lo que concluyó que el mecanismo básico de floculación de las algas por coagulantes químicos es de mutua atracción y neutralización de la carga de las algas con el floc positivo, el cual se forma utilizando el catiónico B.

No Iónico C. Los experimentos preliminares con el no iónico C y el agua preparada en el laboratorio encontraron las mismas dificultades que con el catiónico B. Se añadió en rangos de concentraciones de 0,05 a 2,0 mg/l, antes y después de la adición de alumbre sin ningún efecto en la calidad de la coagulación, por lo que los trabajos con esta agua fueron abandonados.

Se intentaron otras evaluaciones del no iónico C usando agua semisintética preparada con arcilla. La adición de dosis de 0,05 a 0,5 mg/l, realmente disminuyó la calidad de la coagulación con alumbre. Las concentraciones de 2 mg/l eliminan completamente la coagulación. Con aguas

de alta turbiedad también se obtuvo una disminución en la velocidad de asentamiento. Las características del agua empleada fueron las siguientes: pH, 7.6; alcalinidad, 84 mg/l; dureza, 132 mg/l y turbiedad, 1,000 unidades.

También se trabajó con agua de laguna con algunas diferencias en las características minerales y de turbiedad: pH 7.4; alcalinidad, 36 mg/l; dureza, 55 mg/l; y turbiedad, 300 unidades, no encontrándose ningún beneficio con dosis de 2 a 20 mg/l de no iónico C.

Aunque se ha visto, en los párrafos anteriores, que el no iónico C no es efectivo con algunos tipos de agua, puede proporcionar ciertos beneficios con aguas de características específicas. Por ejemplo, con agua del Río Virgín, Nev., cuyas características son: pH, 7.6. alcalinidad, 280 mg/l; dureza, 900 mg/l, y turbiedad, 2,700 unidades.

Los resultados obtenidos al tratar esta agua altamente mineralizada con alumbre y con cantidades incrementadas del no iónico C se muestran en la Figura 6.5.

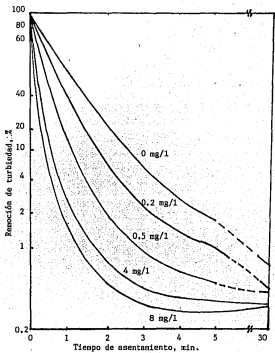


Fig. 6.5.- Efectos del no iónico C sobre aguas de río. El no iónico C se añadió en las cantidades mostradas.

Todas las soluciones contenían 30 mg/l de alumbre.

En esta serie de coagulaciones, todas las concentraciones de no iónico C probadas, desde 0.2 a 8.0 mg/l, mejoraron la coagulación con alumbre, incrementando la velocidad de asentamiento del floc. La concentración óptima fué de 4.0 mg/l. Un incremento hasta 8.0 mg/l produce únicamente un ligero aumento en la velocidad de asentamiento.

Resumiendo, el polielectrolito natural (no iónico C) ha mostrado que es menos efectivo y versátil que el aniónico A y que el catiónico B. De todas las aguas tratadas únicamente una fué ayudada por el no iónico C en el proceso de coagulación.

En este estudio no se hicieron intentos por determinar los costos del tratamiento de aguas utilizando polielectrolitos. Como el precio de los compuestos comerciales varía de 15 a 95 ¢ la libra (1950) y las cantidades requeridas para cualquier tipo de aguas van desde 0.005 a varios mg/l, un análisis de costos se convierte en una consideración individual. Con excepción de los derivados naturales, los polielectrolitos son, en general, reactivos caros para el tratamiento de aguas.

El tratamiento con polielectrolitos se justifica cuando la dosificación de alumbre o de algún otro coagulante metálico se reduce drásticamente o cuando su dosificación es necesaria en aguas de características especiales.

Debe enfatizarse que la dosificación obtenida en las pruebas es óptima, por lo que en la práctica podría trabajarse con cantidades menores sin afectar grandemente el tiempo de operación, con respecto a la disminución de costos.

Los datos obtenidos con el estudio de los polielectrolitos demuestran que son co-coagulantes muy efectivos con ciertos tipos de aguas aunque no se puede hacer una generalización con respecto a su comportamiento. En general, se pueden obtener los siguientes beneficios:

1. Cuando se usan junto con coagulantes metálicos comunes, los polielectrolitos producen flocs grandes y densos y un rápido asentamiento. La clarificación también se mejora.
2. Puesto que el floc se asienta rápidamente, puede reducirse el tiempo de floculación.
3. Con algunas aguas se puede ahorrar una gran cantidad del coagulante metálico.
4. Ciertos polielectrolitos, especialmente los del tipo catiónico, ayudan en la coagulación cuando el agua contiene materia interferente. Así, se obtiene buena coagulación con mínimas cantidades de alumbre, aún con la presencia de dispersantes como la lignina y el tripolifosfato de sodio.
5. Las algas coagulan rápida y completamente con polielectrolitos catiónicos.
6. Con algunas aguas se puede obtener la coagulación adicionando un polielectrolito sin el uso conjunto de un coagulante metálico.

Cuando se usen los polielectrolitos como co-coagulantes deben observarse ciertas precauciones:

1. Los polielectrolitos no son igualmente efectivos con todas las aguas. Se requiere un estudio experimental para cada tipo de agua en la selección del polielectrolito más adecuado.
2. Se obtienen los máximos beneficios de un ayuda coagulante dentro de un rango relativamente estrecho de concentraciones. Las dosis en exceso frecuentemente disminuyen la calidad de la coagulación causando dispersión o clarificación incompleta.
3. El punto de adición de un polielectrolito en una coagulación con alumbre debe determinarse para cada tipo de agua. El tiempo de adición varía desde un momento antes a varios minutos después de la dosificación del alumbre.
4. Los co-coagulantes deben añadirse como soluciones muy diluidas para asegurar un mezclado completo.
5. Los polielectrolitos naturales son adecuados únicamente en casos específicos, es decir, no tienen la versatilidad de los sintéticos.

En otro análisis económico, Hudson [8] hace la aclaración de que los coagulantes orgánicos pueden mezclarse con bentonita, con lo cual se ejerce una ayuda mutua, reportando costos de 0.50 a \$1.50 (1957) por libra, pero como las dosis requeridas son muy pequeñas, su empleo es costeable para obtener una buena coagulación.

Por su parte, Beardsley [2] reporta el caso de una planta que trataba el agua de río moderadamente dura con 50 ppm de sulfato de fierro; al reemplazar éste con un polielectrolito catiónico se necesitó una ppm, con una eficiencia comparable, menor formación de lodos y los costos se redujeron hasta 1/4 del tratamiento anterior. El agua del proceso anterior es previamente ablandada con cal en frío.

También explica el caso de una planta de tratamiento de aguas blandas con contenido de color, hierro y manganeso, donde se usaban 35 ppm de alumbre, 2 ppm de aluminato de sodio y cal. Como el floc formado era muy ligero, había arrastre hacia los filtros, cuya carrera era de 24 horas. Después se utilizó un polielectrolito catiónico dosificado a una ppm, seguido de 20 ppm de alumbre, resultando en un costo menor y mejor calidad del agua, siendo la carrera de los filtros de hasta 72 horas. Un incremento en el pH del agua coagulada de 5.7 a 6.3 ayudó en la remoción del manganeso.

También menciona un tercer caso, en donde una planta que trataba agua superficial de baja turbiedad con alumbre, producía lodos que se secaban sobre arena, permaneciendo húmedos después de cuatro días. Al reemplazar el alumbre con un polímero catiónico se observó que los lodos formados se secaban fácilmente produciendo escamas duras bajo condiciones similares al tratamiento anterior. Este hecho es muy importante desde el punto de vista ecológico.

Cabe hacer la aclaración de que los tres polímeros mencionados anteriormente son sintéticos, pero abren la posibilidad de un uso similar para los polímeros naturales.

CAPITULO VII

EXPERIENCIA EN LA INDIA

The National Environmental Engineering Research Institute (NEERI) en la India, ha llevado a cabo estudios en varias plantas para determinar su efectividad como ayuda coagulantes (NEERI, 1976, Tripathi et. al, 1976). Han estudiado las semillas de las siguientes plantas:

1. Arbol de mirrali (*Strychnos potatorum*)
2. Arbol de tamarindo (*Tamarindus indica*)
3. Guar (*Cyamopsis psoraloides*)
4. Planta de red sorella (*Hibiscus sabdariffa*)
5. Fenogreco (*Trigonella foenum*)
6. Lentejas (*Lens esculenta*)

Los estudios de laboratorio, planta piloto y a escala industrial que se llevaron a cabo con aguas crudas cuya turbiedad fue de 50 a 7,500 UTN condujeron a las siguientes conclusiones:

1. La dosis efectiva es de 2 a 20 mg/l y el rango de pH va de 4 a 9.
2. Los ayuda coagulantes no son económicos para aguas cuya turbiedad es menor de 300 UTN.
3. Los ayuda coagulantes son efectivos para altos niveles de turbiedad, pudiendo ahorrarse de 40 a 54% en el consumo de alumbre.
4. Los ayuda coagulantes se deterioran alrededor de los 3 meses, por lo que necesitan la adición de preservativos, y/o un buen control de existencias.

Los ensayos realizados en la Planta de Kanhan, Nagpur, India (Jahn, 1981) permitieron evaluar los beneficios económicos de este método de ahorro de alumbre. Los resultados se muestran en la lista siguiente:

Cantidad total de agua tratada en julio (1970)	1.74 millones de m ³
Cantidad total de alumbre ahorrado	56,040 Kg.
Valor de 56,040 Kg. de alumbre a \$0.09 por Kg.	\$ 5,043.6
Trabajo extra requerido para la operación	
9 trabajadores por día, por 31 días.	279 días de labor
Costo del trabajo a \$1.20 por trabajador por día.	\$ 334.8

Potencia, agua y depreciación de la maquinaria usada para preparar los ayuda coagulantes a \$1340 por millón de m ³	\$ 2,331.6
Costos adicionales debido al uso de ayuda coagulantes: \$ 334.8 + 2,331.6	\$ 2,666.4
Ahorro neto= \$5,043.6 - 2,666.4	\$ 2,377.2
Ahorro por millón de m ³ tratado	\$ 1,366.2

Todos los polímeros naturales estudiados en la India se prepararon de la siguiente manera:

1. La materia prima se limpió de cualquier material fibroso y se pulverizó.
2. El polvo se cribó para remover cáscaras y se mezcló con soda ash en una relación de 9 a 1.
3. A un kg. de mezcla se le añadió 0.5 m³ de agua para formar una solución lechosa.
4. La solución se calentó (pero no es necesaria la ebullición).

7.1. Semillas de nirmali [18]

La efectividad de la semilla de nirmali molida como un coagulante se verificó en estudios de prueba de Jarras llevados a cabo en la Universidad Johns Hopkins, Baltimore, Maryland (Kazoyoski Kawata). Las corridas de prueba involucraron seis muestras de 500 ml de agua turbia (4.5 UTN), la cual se hizo usando una suspensión de bentonita en agua. Las semillas de nirmali molidas se añadieron a las 6 muestras en dosis de 0 a 70 mg/l, y luego las

mezclas se sometieron a mezclado rápido durante un minuto seguido de agitación lenta durante 2 a 3 minutos sonetiéndose después a un asentamiento de 15 minutos. La reducción de turbiedad se muestra en la Tabla 7.1, para agua a temperaturas de 20°C y 30°C.

Una comprobación del pH y la alcalinidad antes y después de la adición de nirsali muestra que no hubo cambio apreciable.

Dosis (mg/l)	Turbiedad (U T N)	
	20°C, 15 minutos de Asentamiento	30°C, 15 minutos de Asentamiento
0	4.5	4.5
20	2.9	1.25
40	2.5	1.1
50	2.25	1.5
70	2.25	-

Fuente: Kazuyoshi Kawata

Tabla 7.1. Reducción de turbiedad utilizando raspaduras de semillas de nirsali (*Strychnos potatorum*).

7.2. Semillas de *Moringa oleifera*. [17] [18]

Estudios de laboratorio llevados a cabo en Sudán (John and Dirar, 1979) revelan que las semillas de *Moringa oleifera* actúan como un coagulante primario y se comparan favorablemente con el alumbre en cuanto a velocidad de remoción de turbiedad en aguas crudas. Los resultados de la prueba de jarras muestran que el

alumbre da únicamente un máximo del 10% más en la reducción de turbiedad. (Fig. 7.1).

La eficiencia de varias plantas (incluyendo moringa oleifera y semillas de nirsali) como coagulantes naturales ha sido estudiada por varios investigadores en comparación con el alumbre. Sus trabajos se resumen en la Tabla 7.2.

En la India se ha experimentado también con semillas de *Strychnos potatorum* como ayuda coagulante, adicionando 1 mg/l seguido después de 3 minutos por 10 a 15 mg/l de alumbre, logrando reducir la turbiedad de 2200 UTN de 8.5 a 1.5 UTN, después de media hora. En adición a la Tabla 7.2 Schulz y Okun [16] reportan que en Perú se utilizan dos co-coagulantes conocidos como Tunafloc A y Tunafloc B, los cuales se extraen de cactus regionales. Estas sustancias se aplican en el tratamiento de las aguas ayudando a reducir el consumo de alumbre, añadiendo que con el extracto de *Opuntia ficus indica* como ayuda coagulante se logra reducir la turbiedad de 32 a 15 UTN después de media hora, con una dosis de 0.4 mg/l, seguida de 0.5 mg/l de alumbre.

7.3

Chitosan.

Un polielectrolito catiónico muy notable llamado chitosan actúa más rápido que cualquier coagulante conocido obtenido a partir de las plantas (Jahn, 1981). Este se deriva del quitin, el cual es la sustancia orgánica que se encuentra en la coraza de los crustáceos tales como el camarón, la gamba y la langosta. El chitosan se produce por la diacetilación parcial del quitin en soluciones concentradas de álcali a 135-150°C.

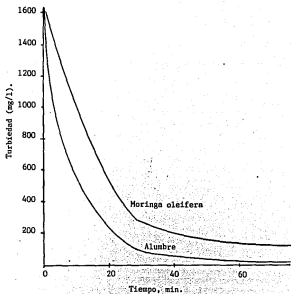


Fig. 7.1.- Propiedades coagulantes de las semillas de *Moringa oleifera* en comparación con el alumbre (concentración de coagulantes: 200 mg/l).

País	Fuente	Turbiedad (UTN)	Dosis de alumbre (mg/l)	Turbiedad residual (UTN)	Polímero natural como coagulante primario (ng/l)	Turbiedad residual (UTN)
<i>Semillas de Moringa oleifera</i>						
Sudán	Hafir of El Querabin pH=8.5	470	200	11 (1 hora)	200	16 (1 hora)
Sudán	Nilo pH=8.4	75	40	3 (1 hora)	50	10 (1 hora)
<i>Semillas de Moringa stenopetala</i>						
Sudán	Nilo pH=8.4	75	40	3 (1 hora)	5	8 (1 hora)
<i>Raíces de Maerua pseudo petalosa</i>						
Sudán	Hafir of El Querabin pH=8.5	470	200	11 (1 hora)	200	35 (1 hora)
<i>Semillas de Strychnos potatorum</i>						
India	Río Yamuna	2,200	65	40 (2 horas)	3 a 3.5	16 a 17 (1 hora)
	Agua de canal	500			2	30
<i>Extracto de Opuntia ficus indica</i>						
Perú	Río Rimac	28	32	5 (0,5 hora)		

Tabla 7.2. Polímeros naturales probados en comparación con el alumbre, usados como coagulantes primarios y como co-coagulantes.

El quitosán ha sido internamente aprobado para dosis arriba de 10 mg/l por The U.S. Environmental Protection Agency para su uso en plantas de tratamiento de agua potable. Se ha expedido una patente para su uso como ayuda coagulante en tratamiento de aguas (Peniston y Johnson, 1970). En Japón se ha utilizado el quitosán como ayuda coagulante desde 1950 aproximadamente (Kawamura, citado por Schulz y Okun [12]).

La Tabla 7.3 resume los resultados de las pruebas de laboratorio llevadas a cabo en la India utilizando quitosán. La prueba de jarras se llevó a cabo para ambos coagulantes, el alumbre y el quitosán, usando: (1) mezclado rápido por un minuto a 100 rpm; (2) floculación por 9 minutos a 40 rpm, y (3) sedimentación por 10 minutos. No hubo cambio en el pH después del tratamiento con el quitosán.

Los resultados muestran que las propiedades coagulantes del quitosán superan a las del alumbre a altas turbiedades. Además, como co-coagulante, el quitosán puede efectuar una reducción más grande de la turbiedad que cuando se usa solo como coagulante primario.

Un estudio de filtro piloto llevando a cabo para desarrollar criterios de diseño para una planta nueva de tratamiento de aguas en la Isla de Maui, Hawaii, mostró que utilizando juntos el quitosán y el alumbre fueron muy efectivos en la reducción de la turbiedad y el color (Kawamura *op. cit.*). Con una tasa de filtración de 17.9 m/hora, una dosis de 8.8 mg/l de alumbre y 0.22 mg/l de quitosán renovieron el 75% de la turbiedad influente (de 19.4

Turbiedad del agua cruda (UTN)	Alumbre (mg/l)	Turbiedad residual (UTN)	Chitosan como coagulante primario (mg/l)	Turbiedad residual (UTN)	Chitosan como ayuda coagulante (mg/l)	Turbiedad residual (UTN)
3,200	300	90	1.00	10	0.15+20 mg/l Alumbre	4
1,400	100	10	1.00	10	0.10+20 mg/l Alumbre	3
500	30	5	0.25	25	0.10+ 5 mg/l Alumbre	5
70	10	14	0.25	18	0.05+ 8 mg/l Alumbre	10

Tabla 7.3. Eficiencia del chitosan como coagulante primario y como ayuda coagulante.

Turbiedad del agua cruda (UTN)	Alumbre (mg/l)	Turbiedad residual (UTN)	Chitosan como coagulante primario (mg/l)	Turbiedad residual (UTN)	Chitosan como ayuda coagulante (mg/l)	Turbiedad residual (UTN)
3,200	300	90	1.00	10	0.15+20 mg/l Alumbre	4
1,400	100	10	1.00	10	0.10+20 mg/l Alumbre	3
500	30	5	0.25	25	0.10+ 5 mg/l Alumbre	5
70	10	14	0.25	18	0.05+ 8 mg/l Alumbre	10

Tabla 7.3. Eficiencia del chitosan como coagulante primario y como ayuda coagulante.

a 4.8 UTH) y el 38% del color (de 90 a 10 unidades). Dosis de 8 mg/l de alumbre y 0.5 mg/l de quitosan removieron el 98% de la turbiedad influente y alrededor del 90% del color, produciendo un efluente con 0.25 UTH. Por otro lado, 75 mg/l de alumbre utilizado solo, removió el 97% de la turbiedad influente y alrededor del 90% del color, produciendo un efluente con una turbiedad de 0.38 UTH.

La producción local de quitosan para aplicaciones en tratamientos de aguas debe ser considerada en aquellas regiones costeras que tienen industrias procesadoras de alimentos y las corizas de los crustáceos son un producto de desecho, particularmente si el alumbre es costoso.

Un efecto nocivo de algunos polielectrolitos naturales es su propensión a aumentar el crecimiento de bacterias en el agua que va a tratarse. Estudios independientes llevados a cabo en la India y Sudán mostraron que las semillas de sirnali y moringa, cuando se usaron como ayuda coagulantes, inicialmente removieron las bacterias del agua, pero después de varias horas el conteo de bacterias se elevó ligeramente (Jahn, 1979, citado por Schulz y Okun [17]). Este fenómeno se atribuyó a que la materia orgánica contenida en las semillas sirvió como sustrato adicional para el crecimiento de las bacterias. Sin embargo, una desinfección adecuada del agua tratada puede eliminar los microorganismos, incluyendo a las bacterias.

Otro problema potencial es que los polielectrolitos naturales tienen un gran uso en la industria alimentaria, lo cual puede

ocasionar un escaseamiento local; su calidad tiende a deteriorarse con el tiempo y, por lo tanto, no debe almacenarse más de tres meses. El chitosan, sin embargo, ha mostrado que es estable indefinidamente en soluciones diluidas (Kawamura, op. cit.) no hubo señas de actividad bacteriana o degradación en una solución de chitosan que tenía 5 años.

7.4. Otras experiencias.

Durante la revisión bibliográfica se encontraron los siguientes resúmenes de publicaciones relacionadas con el tema:

- a) Kalaichelvan, G., Guruswamy, R; Srinivasan, K. "Effect of Natural Polymers on Chemical Sludge Dewatering on Sand Beds." Indian J. Environ. Health, 24(2) 136-44, 1982.

En este artículo se reportó una disminución en el tamaño del lecho de lodos en una planta de tratamiento en donde se usaron alginato de sodio y quitosán como coagulantes.

- b) Takino, Takehiko, Kogano, Shoichi; Sonada, Hiroshi; Tatsuoka, Hideo. Japan Kokai Tokkyo Koho, 1979.

"Cikunin as Natural Flocculant."

Aquí se reporta otro coagulante natural conocido como cikunin, que se obtiene del jugo de manil kara zapota. En este estudio se rebanaron 818 gramos de fruta, se eliminaron las semillas y, por medio de prensado, obtuvieron aproximadamente 500 mililitros de jugo, el cual se añadió al ácido glutámico fermentado al 1%, logrando con esta mezcla muy poca precipitación de bacterias, después de tratar el agua durante 90 minutos, pero la transparencia del sobrenadante fue con mucho superior a los resultados obtenidos con tanino del pérsimo.

- c) Sapronov, A. R., Slovyanski, A. A., Sidorenko, Y. I., Pusanchev, V. A., Kolpakov, A. N., Strelnikov, V. I.

"Use of a Flocculant Prepared From Dry Sugar Beet Pulp for Improvement of the Clarification of First Carbonation Juice."

NTIPP, Moscow, USSR, 1985.

En este artículo se explica la preparación y el uso de la pulpa de remolacha hidrolizada como un floculante en la producción de jugos, lográndose una mejor sedimentación y eliminación de la turbiedad del jugo clarificado.

Se obtuvieron los mejores resultados cuando la pulpa hidrolizada contiene aproximadamente el 3% de sustancias pécticas, preparada tratando la pulpa seca con una solución 0.05 Normal de ácido clorhídrico e hirviendo durante 50-60 minutos, neutralizando a un pH de 6-7 y usándola en concentraciones de 0.005-0.01%.

Existe una planta donde se fabrica este floculante y en este artículo se muestra su operación así como los resultados de varias pruebas industriales.

- d) Brakalov, L; Gospodinov, N., Sulev, T., Shumkov, S.

"Sedimentation of Magnesium Hydroxide in The Presence of Additives."

Vissh Khim. Tekhnol. Inst. Sofia, Bulg. 1983.

Aquí se explica el uso del almidón de maíz hidrolizado como un floculante para acelerar la velocidad de sedimentación del hidróxido de magnesio. Este producto es más efectivo que aquellos comúnmente usados debido a su alta estabilidad

mecánica, inactividad biológica y toxicidad nula. Se propone un nuevo criterio para evaluar la estabilidad mecánica de los flóculos formados y se recomienda una ecuación empírica para determinar las velocidades de asentamiento con alta precisión.

CAPITULO VIII
EXPERIENCIA EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

Otra valiosa experiencia es la lograda en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México [13] , en donde los objetivos fueron:

- a) Obtener polímeros de origen vegetal a partir de la peca del nopal, del fruto del nopal y del tamarindo.
- b) Evaluar en forma preliminar el rendimiento de los polímeros con técnicas de extracción conocidas.

Como materia prima se emplearon:

Nopal (*Opuntia occidentalis*);

Tuna (*Opuntia tuna*)

Semillas de Tamarindo (*Tamarindus indica*)

Este estudio se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería.

La metodología que se siguió para la extracción de polímeros naturales, de acuerdo al Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) consistió en la aplicación de métodos fisicoquímicos y físicos.

El método fisicoquímico se empleó en la extracción de los polímeros de tuna y tamarindo, el procedimiento es el siguiente:

- Aplicación de calor seco a las muestras de 1000g durante 48 a 72 horas, a una temperatura de 40 a 45°C.
- Extracción de polímeros por medio de álcali diluido (carbonato de sodio al 10%) a un pH de 11.
- Precipitación del polímero en medio ácido (ácido clorhídrico al 5%) a un pH de 2, aproximadamente.
- Filtración del precipitado y reprecipitación en etanol a un pH de 7.

El método físico se empleó en la extracción de goma del nopal, con el siguiente procedimiento:

- Aplicación de calor en una muestra cortada en cubos de 1 cm. de lado, durante 72 horas, a una temperatura de 40 a 45°C.

- b) Molienda de la muestra libre de agua y cribado por malla número 20 para eliminar el material fibroso.
- c) Extracción de pigmentos del producto por medio de alcohol etílico como solvente utilizando la unidad Soxhlet.
- d) Cribado del material obtenido y molienda hasta obtener un polvo blanco con vetas café.

Los rendimientos de polímeros naturales obtenidos fueron:

Material	Método de extracción	Rendimiento, porcentaje (en peso y base húmeda)
Tuna purificada	Calor, extracción con álcali y precipitación ácida.	0.074
Tuna sin purificar	Idem	0.0792
Tuna fermentada	Idem	0.052
Tamarindo fermentado	Extracción con álcali y precipitación ácida	0.51
Penca de nopal	calor	1.23

Los rendimientos obtenidos son poco menores que los que presenta el CEPIS, siendo el más alto, como se observa, el de la penca de nopal.

En este estudio solo se observaron las propiedades de color e hidratación de los polímeros obtenidos, teniendo un color pardo para el tamarindo, blanco para la tuna y blanco con vetas café para el nopal; con un alto contenido de hidratación todos ellos.

Las conclusiones de esta experimentación fueron las siguientes:

1. Se obtuvieron tres compuestos poliméricos a partir de nopal, tuna y tamarindo, empleando los métodos fisicoquímico y físico.
2. La acción del calor seco prolongado favorece la formación de la goma de nopal.
3. La fermentación de la tuna produjo bajos rendimientos, probablemente asociados con lisis de los biopolímeros.
4. Los polímeros obtenidos son parcialmente solubles en agua, disolviéndose en soluciones de álcali diluido (carbonato de sodio al 10%).

CAPITULO IX
OBTENCION DEL ALMIDON A PARTIR
DE LA CAÑAGRIA

Una de las sustancias regionales que ofrece mayores posibilidades de investigación es el almidón, que se obtiene a partir de la cañagria (*Rumex hymenosepalus*) familia de los poligonáceas, género *Rumex* y especie *hymenosepalus*.

La cañagria es una planta silvestre distribuida principalmente en los estados de Sonora y Chihuahua, su nombre vulgar se deriva del sabor ácido que tienen sus pecíolos y pedúnculo carnosos. Es una planta herbácea que mide aproximadamente 50 cm. de altura, pero llega a tener hasta un metro en terreno fértiles.

El principio activo más importante de la cañagria es el tanino localizado en su raíz. La materia colorante que tiene la raíz se encuentra en celdillas aisladas estando el almidón localizado en las de color claro.

Durante los últimos años el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora (CICTUS) ha venido realizando estudios tendientes al desarrollo de un proceso de obtención de extracto curtiente a partir de la cañagria.

Durante dichos estudios se ha observado que el extracto curtiente contiene cantidades considerables de almidón, el cual puede extraerse.

9.1. Procesos tradicionales de obtención del almidón.

Son varios los métodos de obtención del almidón, sin embargo todos siguen el mismo principio, con pequeñas variaciones de acuerdo con las condiciones de la materia prima inicial.

Con el propósito de llevar a cabo la extracción de almidón se experimentaron los dos procesos siguientes: [21]

Extracción de almidón con molienda en seco de la materia prima (Proceso I).

Extracción de almidón con molienda húmeda de la materia prima (Proceso II).

9.1.1. Proceso I.

La materia prima se somete a la operación de molienda en un molino Tipo SCX, obteniéndose diferentes tamaños de partículas, las cuales se separan en mallas de 20, 40, 60, 100 y 200.

Las extracciones se efectúan con 50 gramos de muestra de cada tamaño de partículas y a temperaturas de 2L y 40°C, sosteniéndose una relación de solvente a sólido de 20: 1. El solvente es el agua y se utiliza un recipiente tipo tanque agitado, con un tiempo de residencia de 24 horas.

Después de este tiempo la mezcla se separa utilizando mallas de 100 y 200, obteniéndose por un lado el extracto de almidón y por otro materia prima parcialmente extraída la cual se somete sucesivamente a dos lavados más con agua fresca para lograr una mayor extracción. Los extractos de almidón obtenidos tanto de la operación de extracción como de los lavados se someten a centrifugación obteniéndose por un lado agua y por otro un concentrado de almidón el cual se somete sucesivamente a lavado y centrifugación tres veces más. El concentrado final de almidón se somete a la operación de secado (Fig. 9.1).

9.1.2. Proceso II.

En este proceso la materia prima, la cual se prepara en rebanadas de aproximadamente 3 mm de espesor y 3 X 2 cm de tamaño, en porciones de 50 gramos se somete a la operación de hidratación en una relación líquido a sólido de 15 a 1, durante 6, 12 y 24 horas y a 3 diferentes temperaturas: 20, 35 y 45°C.

Una vez hidratada la muestra se somete a una operación de molienda en una licuadora durante 2 a 3 minutos, obteniéndose una mezcla, la cual se separa en mallas de 100 y 200. A partir de este punto se repiten las operaciones de lavado de la muestra parcialmente extraída y de recuperación de extracto, así como

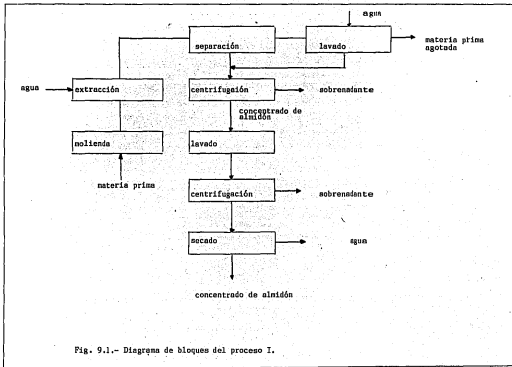


Fig. 9.1.- Diagrama de bloques del proceso I.

de concentración y secado del almidón descritos en el Proceso I. (Fig. 9.2).

La interpretación de los resultados en los dos procesos anteriores se puede hacer en función de la eficiencia de extracción y de la pureza del extracto, expresada como porcentaje de almidón en el extracto.

Del Proceso I, donde se utilizaron dos diferentes temperaturas de extracción y 5 tamaños de partículas se observó que existe un aumento en la eficiencia de extracción conforme se disminuye el tamaño de las partículas, sin embargo, la pureza del extracto disminuye, viéndose que a un tamaño de malla de 20 se obtiene una eficiencia de extracción de 59% y una pureza del extracto de 78.3%. Cuando el tamaño de malla disminuye a 200, la eficiencia de extracción es de 88.5%, pero la pureza disminuye a 67%.

El aumento tanto de eficiencia de extracción como pureza del extracto se ve influenciado por la temperatura de operación, así por ejemplo, a un tamaño de malla de 200 se tiene una eficiencia de extracción de 88.5% y una pureza del extracto de 67%, para una temperatura de 28°C. Cuando la temperatura de extracción se eleva a 40°C los valores, para el mismo tamaño de malla, de eficiencia de extracción y de pureza del extracto son de 97% y 72.8%, respectivamente.

En el Proceso II se puede observar que cuando la temperatura de hidratación aumenta, existe un ligero aumento en la eficiencia de extracción, sin embargo la pureza del extracto permanece prácticamente constante. Analizando el efecto del tiempo de

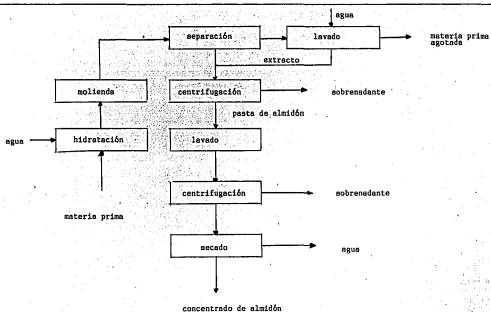


Fig. 9.2.- Diagrama de bloques del proceso II.

hidratación se observa que conforme éste es mayor, la eficiencia de extracción aumenta ligeramente, no así la pureza del extracto, así, por ejemplo, para un tiempo de 6 horas de hidratación los valores máximos de eficiencia de extracción y de pureza de extracto fueron de 44.5% y 90%, 42.59% y 90%, 50.3% y 91.6%, a temperaturas de 20, 35 y 45°C, respectivamente.

Los resultados completos se encuentran tabulados en la referencia [20], concluyéndose que con el Proceso I se obtiene mayor rendimiento en la extracción de almidón. En el Proceso II la eficiencia es menor, pero la pureza del almidón es mayor.

El método más adecuado para cuantificar el almidón de cañaria es el colorimétrico [19] para cuyo desarrollo se requieren los siguientes reactivos:

- a) HCl concentrado
- b) HCl 1+1
- c) HCl 1+9
- d) Solución I-KI, pesar 7.5g de KI y 5g de I_2 por litro de solución.
- e) Algodón.

Se sigue el siguiente procedimiento: pesar un gramo de muestra para determinar almidón y 1 ó 2 gramos para determinar humedad. Colocar la muestra en un desintegrador eléctrico, agregar una pequeña cantidad de agua destilada (40-80 ml). Vierta a un vaso de 250 ml. Use pequeñas cantidades de agua para enjuagar y llevar a 100 ml. Calentar en un baño justo bajo el punto de ebullición durante 15 minutos. Llevar el conte-

nido del vaso a un crisol colocado en un matraz de succión, drenar y lavar el residuo con 10 ó 12 ml de agua caliente. Agregar 25 ml de HCl 1+1 en el crisol filtro y dejar durante 2 a 3 minutos. Aplicar succión durante 2 minutos con 25 ml de HCl 1+1. Drenar y restablecer la presión, agregar 25 ml de HCl concentrado y dejar de 19 a 20 segundos. Reinicie la succión y agite el frasco.

Lavar el residuo con 200 ml de agua caliente y pruebe la presencia de almidón en el crisol agregando 1 a 2 gotas de I-KI. Las trazas de almidón dan una apariencia azul.

La solución de almidón se pasa a un matraz volumétrico de 500 ml y se afora con agua. Mezclar perfectamente y si la solución es turbia centrifugar aproximadamente 50 ml durante 10 minutos.

Pipetear 25 ml de la solución sobrenadante a un matraz volumétrico de 50 ml., agregar 2.5 ml de I-KI, aforar con agua y mezclar bien.

Medir la absorbancia a 580 nanómetros, contra un blanco preparando diluyendo 25 ml de HCl 1+9 y 2.5 ml de I-KI aforando a 50 ml con agua. Leer la concentración del almidón en la curva de calibración y calcular el porcentaje de almidón.

Curva de calibración: pesar 0.1 gramo de almidón soluble de papa dentro de un vaso de 250 ml, agregar 100 ml de agua, calentar durante 5 minutos en baño María justo antes del punto de ebullición.

Agregar 1 gramo de algodón a la solución y calentar 15 minutos o más, decantar con succión a la solución a través de un filtro de vidrio, lavar con agua caliente y refiltrar.

Proceder con la extracción con HCl en la misma forma que en el caso de la muestra problema. Diluir el filtrado a 500 ml.

Centrifugar una porción de la solución por 10 minutos y tomar alícuotas para la curva de calibración.

Diluciones para la Curva de Calibración.

Concentración de	Volúmen	Alícuotas	Agua	Sol. I-KI
10	100	5	0	5
20	100	10	5	5
30	100	15	10	5
40	100	20	15	5
50	100	25	20	5

Nota: Las diluciones se realizan con solución de HCl 1+9.

Para cuantificar el almidón también existen los métodos volumétrico y polarimétrico [14] .

CAPITULO X

EXPERIMENTACION

Los experimentos realizados con la penca de nopal, siguiendo la técnica recomendada por el CEPIS, no dieron los resultados esperados según los antecedentes bibliográficos. Se hicieron 6 corridas de extracción, con tiempos de entre 3 y 5 horas; utilizando la unidad Soxhlet y el alcohol etílico como solvente. La máxima extracción obtenida fué de 6 gramos a partir de 1750 gramos de materia (en base húmeda), por lo que la eficiencia de extracción fue de:

$$\frac{1750}{6} = \frac{100}{X} \cdot X = 0.34\%$$

la cual es más baja que las encontradas en la bibliografía, lo que hace antieconómico el proceso utilizando nopal regional forrajero, el cual además presenta mucha resistencia al secado.

Con esta muestra se intentó hacer una corrida experimental, utilizando el extracto como ayuda coagulante del alumbre. La mejoría obtenida en las pruebas de jarras fué muy leve, habiendo utilizado aguas de 85 UTM y de 20 UTM.

Otros experimentos mostraron los siguientes resultados.

- a) La goma de mezquite no ayuda al alumbre impartiendo además una coloración amarillenta al agua tratada.
- b) Con goma guar como ayuda coagulante del alumbre en aguas de 20 UTM la precipitación es instantánea, pero se forma una espuma sobrenadante difícil de eliminar. La solución se preparó según la experiencia Hindú, observando que con menor dosificación de carbonato de sodio, la espuma tiende a disminuir, pero no desaparece.
- c) Con agua de 85 UTM la goma guar no ayuda en la coagulación.
- d) Con almidón, preparado según las referencias bibliográficas, si se nota una mejoría en aguas con contenido de cobre y alta turbiedad.

La turbiedad del agua utilizada se debe a arcillas de alta densidad, las cuales precipitan con el alumbre muy eficientemente.

Se utilizó este tipo de agua porque es con la que se abastece la planta potabilizadora de Hermosillo, Sonora, lugar que es el interés del presente reporte.

CAPITULO XI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque los resultados experimentales no fueron los deseados, se aprovechó el tema para hacer una comparación bibliográfica entre los polielectrolitos naturales y sintéticos, concluyendo que, aunque los sintéticos son más versátiles, se pueden utilizar los naturales en condiciones específicas, ofreciendo las ventajas de su bajo costo (fijando experimentalmente las condiciones óptimas de extracción), su fácil adquisición y su menor necesidad de control estricto.

Se recomienda que se realicen estudios experimentales más a fondo, financiados por alguna institución, sobre el uso del nopal, y principalmente del almidón, ya que éste ofrece algunas ventajas, sobre todo en

aguas con contenido de cobre, que es uno de los problemas de contaminación en Sonora. Además, la tecnología de extracción del almidón se encuentra desarrollada por un centro de investigación local, a partir de cañagria, la cual es abundante en la región.

Puede concluirse que no existen lineamientos generales con respecto a los co-coagulantes naturales, ya que su comportamiento es de acuerdo a las características particulares del agua que se está ensayando, siendo su manejo más un arte que una ciencia, por lo que deben hacerse pruebas particulares para cada caso y sacar las conclusiones correspondientes sin hacer generalizaciones, debido a la falta de versatilidad de dichas sustancias.

También dichos co-coagulantes deben emplearse en su forma más natural posible, ya que el modificarlos aumenta los costos, lo que le quita una de sus principales ventajas.

Cabe preguntarse si vale la pena utilizar co-coagulantes para resolver problemas de turbiedad y color o antes tratar de resolver éstos por medio de medidas colaterales como mejoramiento en las obras de toma, instalación de filtros caseros, etc., y analizar qué tiene mayor impacto social, el producir poca agua con muy buena calidad o mucha agua con una calidad aceptable, según las normas establecidas.

GLOSARIO DE TERMINOS

Acrilato.- Una sal o éster del ácido acrílico.

Adsorción.- Retención, adhesión o concentración en la superficie de un sólido de sustancias disueltas o dispersas en un fluido.

Algarrobo.- Con este nombre y los de arvejans, arvejo, arveja y otros se conocen varias plantas, en su mayoría legumbres anuales, con tallos débiles, delgados, volubles y algunas veces trepadoras por medio de zarcillos. Las temperaturas frías favorecen su desarrollo.

Arcilla.- Toda mezcla posible de sílice, alúmina y agua con cualquier otra sustancia (calcio, óxido de hierro, etc.).

Bauxita.- Óxido de aluminio hidratado. Es la principal fuente comercial de aluminio.

Beatonita.- Silicato de aluminio hidratado natural, de color variable desde el amarillo claro al pardo oscuro. Se hincha en agua dando un gel viscoso.

Biodegradable.- Es la materia que puede ser destruida por las bacterias impidiendo su acumulación.

Brannerite.- Un mineral complejo, negro y opaco, en el cual el peso de uranio excede al de titanio.

Colágeno.- Sustancia nitrogenada insoluble que el agua hirviendo transforma en soluble con aspecto y propiedades de gelatina.

Color aparente.- Pigmentación debida a la presencia de sólidos en el agua.

Color verdadero.- Pigmentación debida a la presencia de partículas o gotas finamente divididas en suspensión o solución.

Condensador.- Aparato formado de armaduras conductoras separadas por un dieléctrico. La carga eléctrica de una armadura induce sobre la otra armadura a través del dieléctrico una carga de signo contrario a la suya y que retiene por atracción.

Constante dieléctrica.- Para un material dieléctrico dado, es el cociente entre la capacidad de un condensador cuando la región entre sus placas está ocupada por el dieléctrico y la capacidad de ese mismo condensador cuando en la región entre sus placas existe el vacío. Su ecuación de definición es $K = C/C_0$, donde C es la capacidad del condensador con el espacio entre placas ocupado por el dieléctrico, y C_0 la capacidad del condensador vacío.

Copolímero.- Es un polímero que consiste de moléculas que contienen gran número de unidades de dos o más tipos diferentes en secuencia irregular.

Criolita.- Mineral blanco, cristalino, muy fusible. Se emplea en la preparación de aluminio. Está constituido por aluminofluoruro de sodio ($Al F Na_3$).

Dolomita.- Carbonato doble de magnesio y calcio.

Electrolito.- Compuesto (ácido, base o sal) que, en solución se descompone en iones convirtiéndose en un conductor de la corriente eléctrica.

Endosperma.- Tejido nutricio que acompaña al embrión de las semillas.

Esquistos.- Roca resultante del endurecimiento de los depósitos arcillosos por diagénesis (alteraciones físicas y químicas sufridas por un sedimento desde su depósito hasta la consolidación posterior).

Lignina.- Sustancia amorfa que, unida a la celulosa, constituye el tejido leñoso. Se obtiene tratando la pulpa de madera con agua de cal y anhídrido

sulfuroso.

Número de Avogadro.- Es el número de moléculas por mol de cualquier gas. Ha sido determinado por varios métodos, tales como la medición del movimiento browniano, el calor radiante, la carga electrónica y el recuento de partículas alfa, y el mejor valor actual es 6.0229×10^{23} moléculas /gmol.

Punto isoeléctrico.- Valor del pH del medio dispersante de una suspensión coloidal en el que las partículas coloidales no se mueven bajo la acción de un campo eléctrico, es decir, cuando dichas partículas son inertes electroforéticamente.

Robina.- Acacia falsa; de Robin, nombre del botánico que la llevó a Europa. Es una planta espinosa, de madera dura.

Soda ash.- Nombre dado al carbonato de sodio comercial, el cual se obtenía antiguamente de las cenizas de varias plantas salsolescas (saisola soda y otras variedades ricas en carbonato de calcio). Actualmente se obtiene a partir del cloruro de sodio por el proceso Solvay.

Tara.- Arbusto con hojas pinadas que se usa en tintorería.

Temperatura de gelatinización.- Es la temperatura a la cual el agua penetra en los gránulos de almidón, los hidrata y los hincha produciendo una masa viscosa. La temperatura de gelatinización varía (60 - 75°C) con el tipo de almidón. Al seguir elevándose la temperatura la hinchazón prosigue, la masa se hace más espesa y el almidón queda cocido. A temperaturas menores que la de gelatinización la estructura del almidón es rígida e insoluble.

Tierra fuller.- Materia fina granular, tal como la arcilla, que tiene

un alto poder de adsorción. Consiste principalmente de silicatos hidratados de aluminio.

Trona.- Es el sesquicarbonato sódico natural, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Se encuentra en diversos lugares y se forma por evaporación del agua de algunos lagos, cuyas sales abundan en carbonato sódico.

Velocidad de turgencia.- Rapidez con que se hincha o distiende un cuerpo.

Xantato.- Una sal soluble del ácido xántico, usualmente de potasio o sodio, usada como colector en la flotación de minerales.

REFERENCIAS

1. Arboleda, J.
"Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua."
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente;
Lima, Perú.
Serie Técnica 13, 1975, pp. 35-45
2. Beardsley, J. A.
"Use of Polymers in Municipal Water Treatment."
Jour. AMWA, 65: 85 (En. 1973).
3. Black, A. P.
"Basic Mechanisms of Coagulation."
Jour. AMWA, 52: 492 (Ab. 1960).
4. Burke J. T., y DeJani, M. T.
"Organic Polymers in the Treatment of Industrial Wastes."
Malco Chemical Co.
Industrial Waste Conference, 1966, Parte I.
Purdue, University; pp. 303-313.
5. Cohen, J. M., Rourke, G. A. y Woodward, R. L.
"Natural and Synthetic Polyelectrolytes as Coagulant Aids."
Jour. AMWA, 50: 463 (Ab. 1958).
6. Gardner, G. R. y Ray, K. B.
"Flocculation and Clarification of Slimes with Organic Flocculants."
Am. Inst. Mining Met. Eng. Tech. Publ. No. 1052 (1939).
7. Gutcho, S.
"Waste Treatment with Polyelectrolytes."
Noyes Data Corporation, 1972, pp. 146-184.

8. Hudson, H. E.
"Flocculation and Flocculation Aids."
Jour. AWWA, 49: 242 (Mar. 1957).
9. Ives, K. J.
"Electrokinetic Phenomena of Planktonic Algae."
Proc. Soc. for Water Treatment and Examination
5: 41 (1956).
10. Johnson, C. E.
"Polyelectrolytes as Coagulants and Coagulation Aids."
Ind. Eng. Chem., 48, 1080 (1956).
11. La Mer, V. K. y Healy, T. W.
"Adsorption-Flocculation Reactions of Macromolecules at the Solid-Liquid Interface."
Reviews of Pure and Applied Chemistry, 13, 1963, pág. 112
12. La Mer, V. K. y Smellie, R. H.
"Flocculation, Subsidence and Filtration of Phosphate Slimes."
Jour. Coll. Sci., 11: 704 (1956).
13. Mendoza, G. y Elias, B.
"Aplicación de Polímeros Naturales en la Coagulación de las Aguas."
Proyecto No. 7078
Instituto de Ingeniería, UNAM, pp. 5-10.
14. Methods of Analysis of the Analytical Chemist
Secciones 14.031, 14.032 y 3.096.
15. O'Melia, Ch. R.
"The Coagulation Process: Theoretical Concepts Useful in Design."
ASCE, 1969.

16. Schaffer, R. B.
"Polyelectrolytes in Industrial Waste Treatment."
Industrial Waste Conference, 1963
Purdue, University, pp. 449-459.
17. Schulz, C.R. y Okun, D. A.
"Surface Water Treatment for Communities in Developing Countries."
John Wiley and Sons, 1964, pp. 58-70.
18. Schulz, C. R. y Okun, D. A.
"Treating Surface Water for Communities in Developing Countries."
Jour. AWWA, 75: 210 (En. 1983).
- ... TAPPI Standards
1960 T 419 m-18, 43(5).
20. Toscano, L.
"Cuantificación y Obtención de Almidón a partir del Bagazo de Cañagüera."
Tesis Profesional (Investigación Tecnológica).
Universidad de Sonora, 1978, pp. 19-37.