

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

POTENCIAL ZETA, SU IMPORTANCIA EN LA DESESTABI-  
LIZACION Y ESTABILIZACION DE SISTEMAS COLOIDALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL  
TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

ADA ALTAGRACIA FLORENTINO CASTILLO



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

Jurado asignado originalmente según el tema

PRESIDENTE	Francisco Garfias Ayala
VOCAL	Francisco Esparza Herrada
SECRETARIO	Enrique Campos López
1er. SUPLENTE	José Juan Morales Román
2o. SUPLENTE	Carlos Castañeda Estrada

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Biblioteca de la Facultad de Química

SUSTENTANTE: Ada Altagracia Florentino Castillo. \_\_\_\_\_

ASESOR DEL TEMA: Dr. Francisco Javier Garfias A. \_\_\_\_\_

SUPERVISOR TECNICO: Dr. Enrique Campos López \_\_\_\_\_

Con gran admiración y cariño a ti Romeo

A mi adorada hija Larissa con esperanza

A mis padres y hermanos con  
inmensa ternura.

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS

Guadalupe Olavarría Patiño

Lorenzo Espinoza Uriarte

Roberto Vazquez Díaz

Ignacio Vazquez Santoyo

Gerardo Vasconcelos Pérez

Alberto Olmedo Muñoz

Carlos Ordóñez González

Andrés Soto Gamiño

José Antonio Quiñonez

Javier Caballero Gutiérrez

Francisco González Pacheco.

Con respeto y gratitud por su gran  
dedicación a la enseñanza al

Dr. Francisco Javier Garfias Ayala

Dr. Enrique Campos López

Quím. Francisco Esparza Herrada



## CONTENIDO

	Págs.	
I	Introducción	1
II.	Conceptos generales sobre coloides	2
II.1	Sistema Coloidal	2
II.2	Propiedades de los coloides	3
II.2.1	Ópticas	3
II.2.2	Cinéticas	3
II.2.3	Eléctricas	4
II.3	Clasificación de los coloides	5
II.3.1	Liofóbicos	5
II.3.2	Liofílicos	6
II.4	Ley de Stokes	6
II.5	Desestabilización de los sistemas coloidales	8
III.-	Coagulación, teoría de la doble capa difusa	11
III.1	Adsorción y estabilidad de los coloides	15
III.2	Influencia de la coagulación en la adsorción	20
III.3	Energía libre de adsorción	23
III.4	Turbidez, olor y sabor	24
III.5	Polielectrolitos	26
III.5.1	Clasificación	27

	Págs.	
IV	Potencial zeta, definiciones	31
IV.1	Influencia del potencial zeta en la estabilidad	31
IV.2	Estabilidad sin aglomeración	34
IV.3	El potencial zeta como técnica en el tratamiento de agua	34
IV.4	El potencial zeta en la coagulación	39
IV.5	El potencial zeta en las suspensiones coloreadas	40
IV.6	Celda medidora del potencial zeta.	42
	Conclusiones	49
	Bibliografía	50

## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

	Págs .
Figura No. 1	12
Figura No. 2	19
Figura No. 3	19
Figura No. 4	30
Figura No. 5	29
Figura No. 6	32
Figura No. 7	29
Figura No. 8	41
Figura No. 9	41
Figura No. 10	41
Figura No. 11	41
Figura No. 12	44
Figura No. 13	44
Figura No. 14	44
Figura No. 15	44
Figura No. 16 y 17	48
Tabla No. 1	17 y 18

## I. INTRODUCCION

La desestabilización de un coloide, fenómeno ampliamente aplicado en la recuperación y tratamiento de aguas industriales es de suma importancia no únicamente por su aplicabilidad, sino inclusive desde el punto de vista físico-químico fundamental. Las teorías desarrolladas (7,9,10,13,14) han mostrado lo complejo de dicho fenómeno y lo promisorio como campo de investigación.

De los agentes que en los últimos años han sido desarrollados y que han encontrado una inmediata aceptación en la desestabilización de los sistemas coloidales, cabe mencionar a los polielectrolitos sintéticos, tales como poliacrilamida, etc.; el mecanismo de acción de tales compuestos involucra desde procesos de difusión a través del seno del sistema hasta la interacción química y física sobre la superficie del coloide.

Como parte importante en el análisis del mecanismo de acción de estos compuestos, se pueden mencionar las variaciones fundamentales que produce en los potenciales electrostáticos de interacción, y potencial zeta, el cual es una medida de la repulsión existente entre las partículas coloidales cargadas y las variaciones que se producen en éste al agregar sustancias que como los polielectrolitos, van a eliminar la repulsión y permitir la aglomeración y su posterior precipitación.

No fue sino hasta hace 10 años cuando se mejoraron los métodos de

medida de dichas interacciones, diseñándose las técnicas instrumentales lo suficientemente precisas para poder estudiar desde un punto de vista cuantitativo el fenómeno de desestabilización. El potencial zeta, equipo diseñado para medir tales fenómenos, ha permitido dilucidar muchos de los problemas encontrados y es utilizado cada vez más profusamente no solamente en investigación a nivel fundamental, sino inclusive en una gama muy extensa de problemas industriales.

Este trabajo presenta una recopilación de los últimos adelantos en cuanto a la aplicación del potencial zeta como método de estudio en la estabilidad de un sistema coloidal.

## II. CONCEPTOS GENERALES SOBRE COLOIDES

### II.1 Sistema coloidal

Se denomina sistema coloidal, a aquel que está constituido por partículas suspendidas en el seno de un líquido; las dimensiones de estos estados de agregación pueden variar de  $0.2\mu$  a  $5m\mu$  (11). Su principal característica es una baja velocidad de difusión y poca influencia, debido a su alto peso molecular, en las propiedades coligativas (presión osmótica, descenso en el punto de congelación, etc.) del sistema. Sus dimensiones son mayores a las moleculares, pero no lo suficientemente grandes para observarse

megascópicamente.

## II.2 Propiedades de los coloides

Las propiedades de los coloides se pueden dividir de una manera general ( 8 ) en: ópticas, cinéticas y eléctricas.

### II.2.1 Ópticas

Los coloides son capaces de dispersar la luz. La luz que viaja a través del vacío, tiene toda su intensidad en la dirección de viaje, sin embargo, cuando la luz atraviesa un medio de partículas discretas, éstas interfieren y originan que parte de la energía sea dispersada angularmente. Dicha dispersión, recibe el nombre de efecto Tyndall, el cual no involucra un cambio en la longitud de onda de la luz.

En soluciones muy diluídas, en donde no existen efectos de interferencia, la intensidad angular dispersada depende únicamente del tamaño de la partícula y de la diferencia en los índices de refracción de la partícula coloidal y del medio ( 8 ).

El efecto Tyndall es sumamente útil en el estudio de los sistemas coloidales.

### II.2.2. Cinéticas

Entre las más importantes se pueden mencionar: difusión, movimiento browniano y sedimentación.

Graham<sup>( 8 )</sup> observó que los coloides se difunden más lentamente que los solutos en verdaderas soluciones, debido principalmente a sus dimensiones.

El movimiento browniano es el resultado mecánico de las innumerables colisiones, entre todas las partículas de un sistema. Cada una de las colisiones produce un cambio tanto en la dirección del movimiento, como en la velocidad. Por medio de este movimiento se puede conocer el coeficiente de difusión; de aquí la conclusión de que el movimiento browniano describe la actividad cinética de las partículas suspendidas en un líquido.

### II.2.3. Eléctricas

Las dispersiones coloidales, poseen propiedades eléctricas, que están íntimamente ligadas a su habilidad de atrapar iones del medio. Dentro de las técnicas más empleadas en el estudio de estas propiedades destacan:

**Electroforesis:** que es la migración de las partículas coloidales - cargadas eléctricamente, al aplicarse un campo eléctrico (las partículas cargadas negativamente viajan al ánodo y las cargadas en forma positiva van al cátodo).

**Electroosmosis:** es el paso del solvente a través de la membrana que forman las partículas insolubles, que están cargadas eléctricamente.

### II.3 Clasificación de los coloides

Existen diferentes clasificaciones de los sistemas coloidales, **sin** embargo atendiendo a los objetivos del presente trabajo, se dividirán en: liofóbicos y liofílicos.

#### II.3.1. Liofóbicos

Son aquellas dispersiones en las cuales no existe atracción entre la fase dispersa y el medio; un ejemplo muy claro de este tipo de dispersión, es la de varios metales y sales en agua. La estabilidad depende de que las partículas se repelen unas a otras.

La capacidad de las partículas dispersas para permanecer en estado coloidal, depende de la concentración de iones; en ausencia de iones un coloide liofóbico no es estable, y el material coagulará.

La presencia de algunos iones positivos y negativos estabiliza al coloide, ya que dichos iones son adsorbibles de manera preferencial, y ceden su carga a las partículas coloidales, si hay exceso de electrolito, las partículas coloidales serán coaguladas por los contraiones.

Los iones positivos precipitan a los coloides negativos y viceversa.



### II.3.2. Liofílicos

Se caracterizan por una gran afinidad entre la fase dispersa y el medio de dispersión; como consecuencia se efectúa una gran solvatación de las partículas coloidales.

### II.4. Ley de Stokes

La ley de Stokes define el movimiento de un sólido, tal como una esfera, en un líquido viscoso. Esta ley está planteada y resuelta, para partículas que se mueven a baja velocidad, y nos indica que a mayor diámetro mayor será la velocidad de asentamiento de la partícula. Esta ley como todas, tiene sus limitaciones y entre ellas se encuentran:

a) La solución debe ser diluida, con el objeto de evitar interacciones entre las partículas coloidales.

b) En general el tamaño de partícula de un coloide es grande comparado con las discontinuidades del agua, pero debe tomarse en cuenta cuando contenga pequeños iones o moléculas.

$$\psi = 6\pi\eta r \quad (1)$$

$\psi$  Factor de fricción

$r$  radio

$\eta$  viscosidad del medio

Por la acción de la gravedad las partículas tienden a sedimentarse, pero dicho efecto es contrarrestado en parte por el movimiento browniano.

En las soluciones coloidales existe un gradiente de concentración que aumenta conforme nos acercamos al fondo, pudiéndose representar esto por medio de la ecuación siguiente:

$$h = \frac{RT}{MNg} \ln \frac{n_0}{n} \quad (\text{ecuación de Perrin}) \quad (2)$$

donde

M peso molecular

g gravedad

T temperatura

R constante de los gases

$n_0$  número de moles a la altura cero

n número de moles a la altura h

N número de Avogadro

En determinadas circunstancias la acción de la gravedad es contrarrestada por la resistencia del medio (coeficiente de fricción), o sea, que las partículas no caen aceleradas sino a velocidad constante, a la cual se le denomina, velocidad terminal; cuando esto ocurre la solución coloidal está en su equilibrio de difusión.

## II.5 Desestabilización de los sistemas coloidales

Un sistema coloidal deja de ser estable, cuando las partículas pasan de su tamaño original a agregados de mayor dimensión siendo entonces visibles, esto puede ocurrir en forma de flóculos (floculación) o como pequeños microcoágulos (coagulación).

El grado de desestabilización de una suspensión coloidal puede evaluarse midiendo la turbidez residual después de la sedimentación de la suspensión.

La desestabilización de una suspensión diluída de arcillas, por ejemplo, depende de la concentración inicial de arcilla y de la dosis de polímero que se ha agregado a la suspensión. La dosis óptima de polímero es aquella en la cual se produce la máxima desestabilización.

El tamaño de partícula es también un parámetro de gran importancia en la desestabilización de los sistemas coloidales.

La agregación de partículas en una dispersión coloidal, puede estudiarse considerando dos etapas:

Transporte de partículas para efectuar contacto entre ellas. El transporte es un proceso físico, esencialmente en sistemas acuosos; este proceso está acompañado por fenómenos como son: difusión browniana, movimiento de fluido y sedimentación; estando controlado por parámetros físicos, de los que destacan: temperatura, gradiente de velocidad y tama-

ño de partícula.

La otra etapa en la desestabilización de partículas, es aquella en la que se promueve un enlace cuando ocurre el contacto. Este es un proceso químico coloidal, y puede ser llevado a cabo por diferentes mecanismos; La Mer<sup>(13)</sup> ha dividido estos mecanismos en dos categorías que son:

a) Procesos que efectúan una reducción de la energía total de interacción, entre la doble capa eléctrica de dos partículas similares.

b) Procesos que agregan partículas coloidales en coágulos de tres dimensiones por la formación de puentes químicos.

La Mer ha designado al primer grupo de procesos como coagulación y al segundo como floculación. Ejemplo de floculación es la desestabilización de una dispersión de arcilla cargada negativamente, por un polielectrolito aniónico. Caso típico de coagulación es la desestabilización de un coloide liofóbico por la adición de un electrolito neutro. Las sales de hierro y aluminio son frecuentemente usadas en la coagulación, su acción no es llevada a cabo por los simples iones acuometálicos --  
 $(\text{FeH}_2\text{O})_6^{+3}$  y  $(\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6)^{+3}$ , sino por los productos hidrolizados, que son entidades complejas altamente cargadas; su formación puede ocurrir no solamente con hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) si no también con otras bases o con grupos io-

nizados de otros coloides.

Black y Riddick han descrito interesantes aspectos de mecanismos de coagulación y han aplicado, en la práctica, nuevas teorías de coagulación.

Las partículas coloidales en aguas sin tratamiento, están sujetas a dos grupos de fuerzas, una que produce la desestabilización o floculación y la otra que produce estabilización o dispersión.

Los factores que contribuyen a la desestabilización son el movimiento browniano y las fuerzas de atracción de Van der Waals.

El movimiento browniano es aquel impartido a los soles suspendidos como consecuencia de sus choques en el medio, siendo esencialmente un efecto térmico que tiende a dirigir las partículas más cerca unas de otras y penetrando los campos de fuerzas que las rodean.

Aunque la naturaleza de las fuerzas de Van der Waals no está perfectamente conocida, se consideran como fuerzas de cohesión molecular, que aumentan en intensidad a medida que las partículas se aproximan unas a otras y que su tamaño es menor.

Los factores opuestos, que producen la estabilización, son la hidratación y la repulsión electrostática, cuya magnitud se le conoce como potencial zeta.

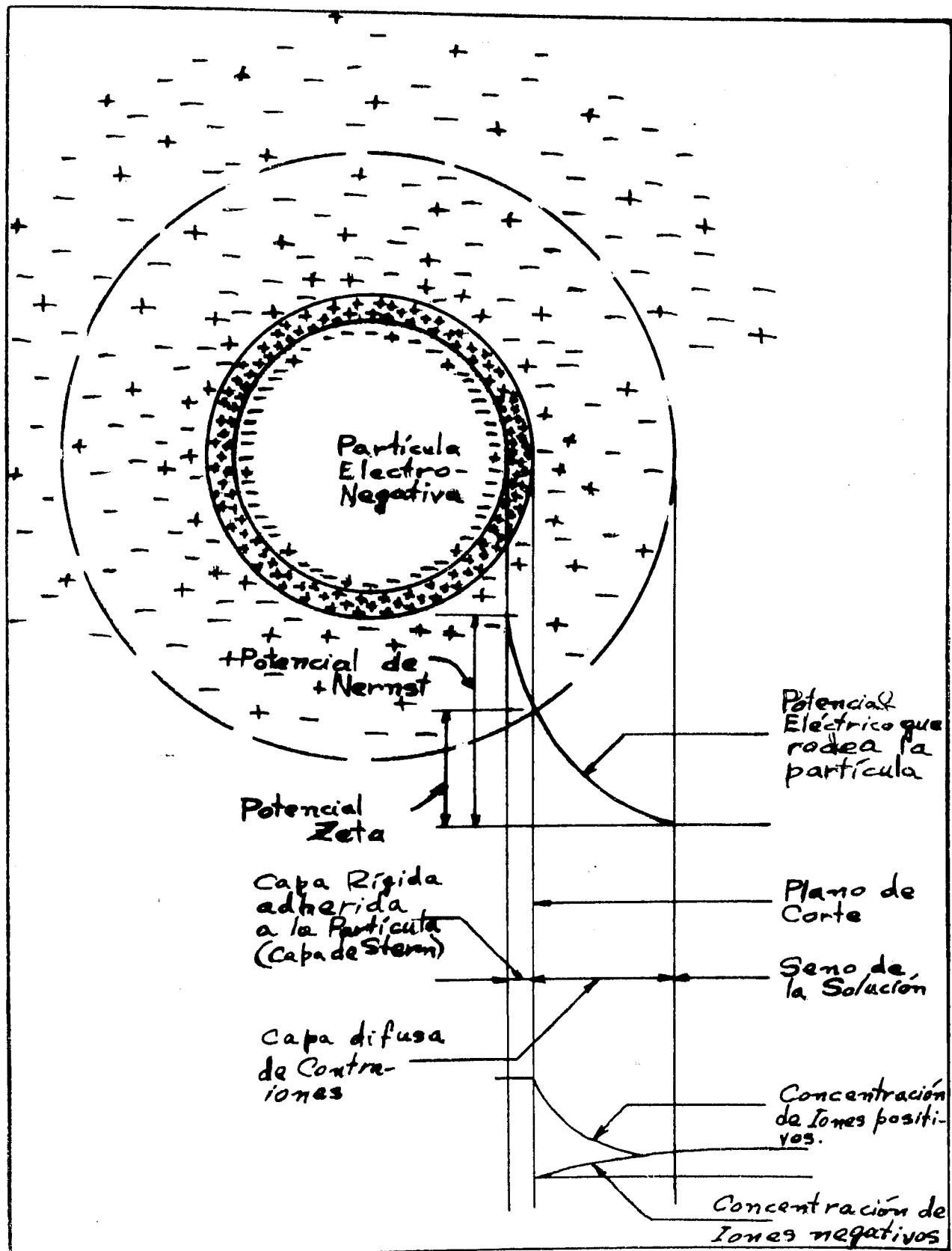
La hidratación es la propiedad que tienen algunas partículas de atraer un número relativamente grande de moléculas de agua a su superficie; tales partículas son llamadas hidrofílicas.

La repulsión electrostática implica la presencia de un campo elétrico en el medio suspensor, la cual se mide a través del potencial zeta, el cual se refiere a la carga de superficie de las partículas coloidales, que origina el que las partículas migren en un campo eléctrico a un polo de carga opuesta. El potencial zeta puede ser el resultado de una adsorción selectiva de iones de la solución, de fuerzas de valencia residual o de ambas y será tratado con detenimiento posteriormente.

### III. COAGULACION, TEORIA DE LA DOBLE CAPA DIFUSA

Gouy y Stern<sup>(2)</sup> han propuesto la teoría de la doble capa difusa, la cual propone la existencia de una capa estacionaria de iones sobre la superficie de la partícula, rodeada por una capa difusa móvil que se extiende en la solución, fig.(1).

Existe una violenta caída de potencial entre la partícula y la capa estacionaria; a este potencial total se le llama potencial de Nernst. A la caída de potencial entre la capa estacionaria y el punto en que la solución es eléctricamente neutra se le denomina potencial zeta; dicha caída de potencial es mucho menor que la primera.



Concepto de Potencial Zeta

El concepto de potencial zeta está incorporado en la teoría de la doble capa de Stern-Gouy<sup>(2)</sup>, ya que esta teoría está basada en las interacciones de tipo eléctricas que existen entre las partículas cargadas y el medio en que están suspendidas.

Por atracción electrostática, los coloides cargados negativamente atraen a su superficie una capa estacionaria de iones positivos, conocida como la capa de Stern. Rodeando esta capa fija, donde la concentración de iones positivos disminuye al alejarse de la superficie de la partícula cargada, existe una capa difusa móvil.

El espesor de la doble capa es una función del contenido iónico de la solución, el cual disminuye al aumentar la concentración de electrolito. Las fuerzas de Van der Waals no son afectadas prácticamente, por los cambios en el contenido iónico.

Al estudiarse un proceso de coagulación deben considerarse las interacciones químicas y las sustancias disueltas, así como el ión metálico coagulante.

Tanto la naturaleza de los productos metálicos hidrolizados, como la carga de las partículas coloidales, pueden ser gobernadas por el pH; en recientes trabajos de investigación<sup>(1)</sup>, se ha demostrado que es posible distinguir entre los efectos de la dosis de coagulante y el pH en



Los procesos de propagación de luz se describen con el caso de una red  
simple estructural, empleando un PE homogéneo. (Fig. 10)

Los lóces metalizados en el interior son sus propios en la estructura.  
El resultado de la absorción producida en los procesos de propagación  
depende de las características de la estructura y del tipo de propagación  
por el medio. La propagación de los lóces metalizados en el interior de-  
pende de la configuración de la estructura.

III. Absorción y estabilidad de los lóces

El momento cuántico-energético  $\vec{h}$  más simple que puede utilizarse  
en la descripción de las interacciones entre las partículas elementales, se  
da en la teoría de las interacciones elementales de la teoría de la física.  
La aplicación de esta teoría produce que la interacción entre los dos  
momentos elementales de la estructura como una configuración elementar  
de absorción de luz por medio de la propagación elementar de los lóces de-  
pende de la estructura.

El momento de campo-energético  $\vec{h}$  para la teoría cuántica asume un e-  
quilibrio entre las interacciones elementales que tienen lóces de campo-  
energético. La propagación perfecta de la estructura y la estructura que depende a  
propagación entre lóces de campo de la estructura depende de la configuración  
de la estructura.

Aplicando este modelo a la desestabilización, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

a) La concentración necesaria de un electrolito neutro para desestabilizar un coloide, depende de la valencia de los iones, de acuerdo a la regla de Schulze-Hardy<sup>(2)</sup>. La concentración crítica de coagulación (ccc), o sea, la concentración mínima de electrolito a la cual la coagulación (desestabilización) se produce, es virtualmente independiente de la concentración de la fase dispersa.

b) Las concentraciones de electrolito, mayores que la concentración crítica de coagulación, no producen reestabilización en la dispersión coloidal.

Con el propósito de comprender mejor los diferentes procesos mediante los cuales se efectúa la desestabilización en función de los fenómenos que la acompañan, se presenta en la tabla siguiente un cuadro sinóptico cualitativo de dichos procesos.

Se ha comprobado por métodos experimentales<sup>(14)</sup> la presencia de fuerzas no coulombicas en la coagulación y reestabilización de coloides, existiendo diferencias notables en las capacidades de coagulación de iones simples ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Al}^{+++}$ ), iones metálicos hidrolizados y iones de gran tamaño como las alquil-amidas y polielectrolitos.

TIPOS DE DESESTABILIZACION Y SUS CARACTERISTICAS (2)

Fenómeno	Teoría Física de la doble capa (coagulación)	Modelo de unión (floculación)	Agregación por Iones Metálicos Hidrolizados
Interacción electrostática	Predominante	Subordinada	Importante
Interacciones químicas y adsorción	Ausente	Predominante	Importante
Potencial zeta para agregación óptima	Casi cero	Generalmente no es cero	No necesariamente cero
Adición de un exceso de agente desestabilizador	No influye	Reestabilización debida a toda la superficie cubierta	Reestabilización usualmente acompañada por inversión de carga; puede estar oscurecida por precipitación de hidróxido
Fracción de superficie cubierta ( $\theta$ ) por desestabilización para agregación óptima	despreciable	$\theta = 0.5$ (16) En general, $0 < \theta < 1$	$0 < \theta < 1$ , no necesariamente = 0.5
Relación entre la dosis óptima de agente desestabilizador y la con. del coloi- de (conc. de superficie coloidal	CCC virtual- mente indepen- diente de la conc. coloidal	Estequiométricamente, una relación lineal entre el flocu- lante y el área superficial	Estequiométrica- mente posible, pero no siempre sucede

Propiedades físicas de los agregados producidos

Denso, gran resistencia al esfuerzo cortante, pero pobre en filtrabilidad por el endurecimiento del aglomerado

Flóculos de estructura tridimensional; baja resistencia al corte y excelente filtrabilidad

Flóculos cuya resistencia al corte y densidad varían ampliamente

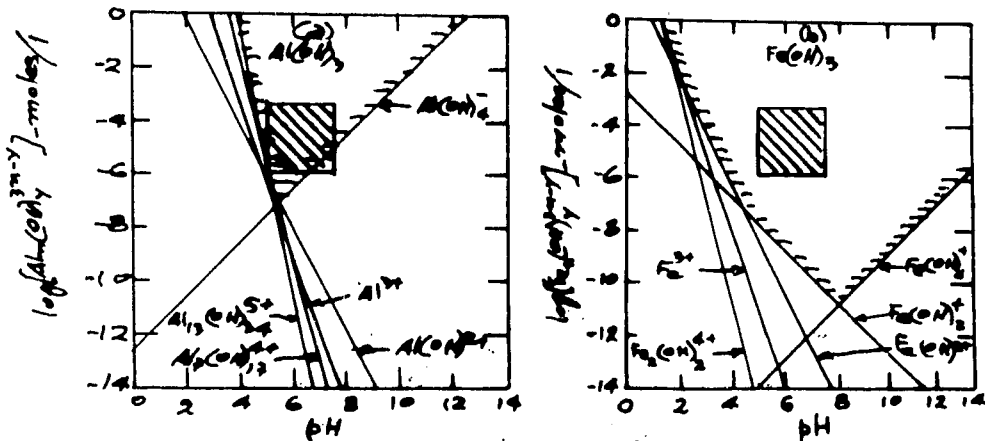


Fig. 2.- Composición de equilibrio de Soluciones en contacto con  $Al(OH)_3$  y  $Fe(OH)_3$  precipitados. Areas rayadas son regiones prácticas para el tratamiento de agua la coagulación sucede con sobresaturación respecto a los hidróxidos.

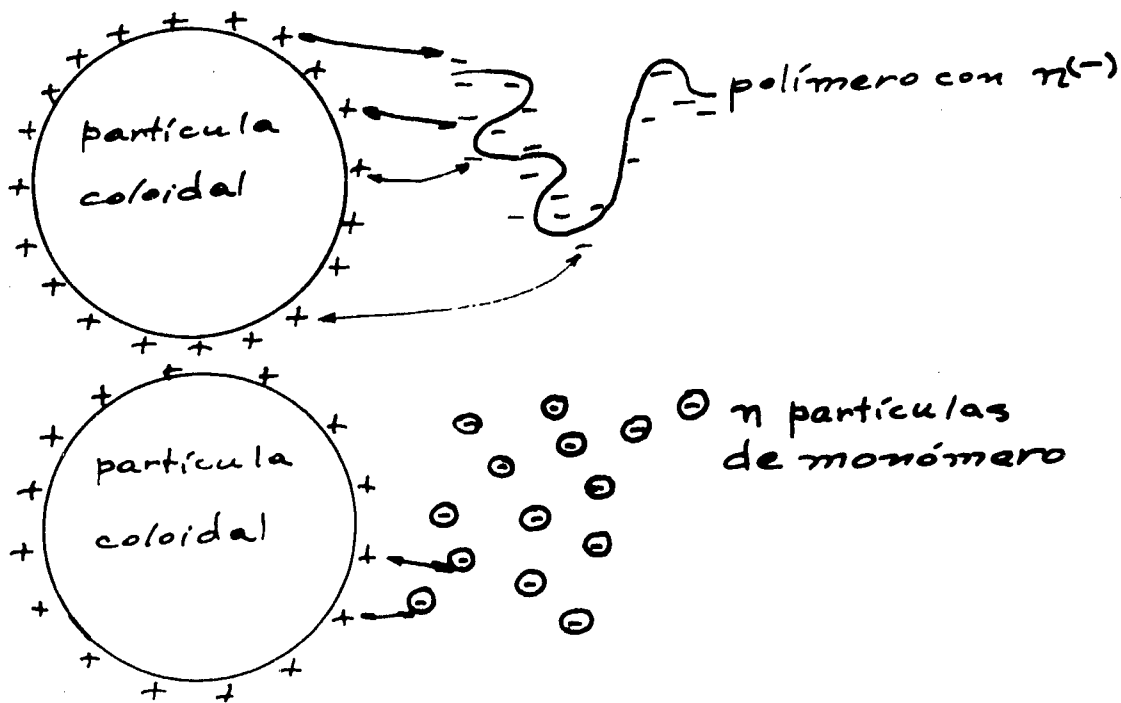


Fig. 3.- Adsorción de polímeros y monómeros.

### III.2 Influencia de la coagulación en la adsorción

Los iones de ser adsorbidos son utilizados para desestabilizar coloides a concentraciones más bajas que las de los iones no adsorbibles. La magnitud con la cual un ión es adsorbible, se refleja en la concentración necesaria para producir la aglomeración deseada. Para especies que tienen igual cantidad de carga de contraiones, la concentración crítica de coagulación disminuye al aumentar los iones adsorbibles, como por ejemplo:  $\text{SO}_3^-$ , y sulfonato de p-tolueno,  $\text{CH}_3 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{SO}_3^-$ , y la adsorción aumenta a medida que las especies adsorbibles son mayores. Fig.(3).

La adsorción de una molécula de soluto sobre la superficie de un sólido, involucra remoción de soluto en la solución, eliminación de solvente de la superficie sólida y ataque del soluto hacia la superficie del sólido.

La energía neta de interacción por adsorción es, por lo tanto, una función compuesta de interacciones entre las superficies de sólido-solvente soluto. La atracción de la superficie por el adsorbato resulta de las interacciones químicas, tales como puente de hidrógeno, reacciones de coordinación, ligaduras covalentes y reacciones de intercambio iónico, además de los efectos electrostáticos comunes.

Para algunos solutos la atracción del sólido puede ser menos im-

portante que la atracción o repulsión específica de la fase acuosa. Los dipolos orgánicos y los iones orgánicos de gran tamaño son acumulados principalmente en la interfase sólido-solución, en primer lugar, ya que están repelidos por la fase acuosa. Cuando los iones orgánicos simples son atraídos hacia la superficie del coloide, permanecen en solución ya que están verdaderamente hidratados. Los iones menos hidratados, como por ejemplo:  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{CuOH}^+$ ; y la mayoría de los aniones, se encuentran en la interfase con mayor frecuencia que los iones fácilmente hidratables como  $\text{Li}^+$  y  $\text{Na}^+$ .

La polimerización de especies con superficie activa produce agentes poliméricos de floculación que tienen mayor tendencia a acumularse en la superficie del coloide que los monómeros correspondientes. Por ejemplo, el poliestireno sulfonado  $(\text{CH}_2 - \text{CH} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{SO})_n^-$  es adsorbido más rápidamente que  $n$  partículas de  $p$ -tolueno,  $n(\text{CH}_3 - \text{CH} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{SO}_3^-)$ .  
Fig.(3). Los polímeros se emplean en bajas concentraciones, en la desestabilización de coloides. Los iones metálicos hidrolizados caen dentro de una categoría intermedia entre iones simples y polielectrolitos.

El modelo de la doble capa, aunque de gran importancia teórica está restringido para coloides liofóbicos y electrolitos simples. Este modelo desprecia el papel que las fuerzas químicas desempeñan en la adsor-

ción, y además considera que las fuerzas electrostáticas de repulsión en tre partículas coloidales similares son afectadas por la presencia de iones adsorbibles.

Las especies adsorbibles que coagulan coloides a bajas concentraciones <sup>(2)</sup>, pueden reestabilizar estas dispersiones a concentraciones más altas, Fig. (4) y tabla (1).

Cuando el agente desestabilizador tiene carga opuesta al coloide, la reestabilización está acompañada por una inversión de carga de las partículas coloidales, sin embargo, la interacción coulombica no permite una atracción de los contraiones en exceso, y de acuerdo con el modelo de Gouy-Chapman <sup>(5)</sup> para la doble capa difusa, no puede ocurrir la inversión de carga, siendo necesario considerar una energía adicional consecuencia de las interacciones químicas.

La influencia de la interacción electrostática en la adsorción de los iones en la interfase, se ha investigado en la superficie de electrodos metálicos <sup>(5)</sup>, ejemplo de lo cual son las reacciones electroquímicas sobre la superficie de mercurio <sup>(5)</sup>, donde el signo y la magnitud de la superficie potencial varían ampliamente.

De manera similar existen reacciones química expontáneas entre iones de igual signo ( $\text{FeOH}^{++} + \text{FeOH}^{++} = \text{Fe}_2(\text{OH})_2 + + + +$ ), y en estos casos la energía de interacción puede ser de naturaleza química más que



de carácter eléctrica.

### III.3 Energía libre de adsorción

Conforme al concepto de Stern <sup>(15)</sup> de que la energía libre estándar de adsorción ( $\bar{\Delta}G^{\circ}$  es el cambio en la energía libre, experimentado durante la adsorción de un mol de sorbato) es la suma de la energía química total de adsorción  $\Delta G^{\circ}$  y la del trabajo electroquímico involucrado en la misma ( $Z F$ ), obteniéndose que:

$$\bar{\Delta}G^{\circ} = \Delta G^{\circ} + Z F \Delta \Psi$$

donde

$Z$  es la carga del ion sorbato

$\Delta \Psi$  Caída de potencial entre la superficie coloidal y el seno de la solución

$F$  es la constante de Faraday

La adsorción ocurre espontáneamente cuando  $\Delta G^{\circ}$  es negativa.

Experimentalmente es bastante difícil separar la energía de adsorción en sus componentes químico y coulombico, sin embargo, muchos ejemplos <sup>(2)</sup> p. 519 demuestran que la contribución electrostática en la adsorción es mucho menor que la química, por lo que la adición de un contraión adsorbible en una dispersión coloidal, puede producir una disminución en la estabilidad

coloidal seguida, a concentraciones mayores, por una inversión de la carga y una reestabilización. Los iones bién hidratados generalmente no se adsorben lo suficiente y permanecen en la parte difusa de la doble capa.

Somasundaran, Healy y Fuerstenau<sup>(2) (23)</sup> han investigado la influencia de la cadena alquílica en la adsorción de los iones de alquil amonio en las superficies de sílice, a un pH comprendido entre 6.5 y 6.9, y consideran que, además de los efectos electrostáticos, la adsorción de surfactante está influenciada por las fuerzas de Van der Waals entre los grupos CH<sub>2</sub> de las moléculas de surfactante que han sido adsorbidas. Por esta razón, debe enfatizarse que la coagulación y reestabilización están influenciadas, en muchos casos, por la adsorción, y las interacciones químicas pueden sobrepasar los efectos electrostáticos al producirse adsorción, coagulación y reestabilización.

#### III.4 Turbidez, olor y sabor

Históricamente se ha considerado a toda materia suspendida en el agua como "turbidez" despreciando el tamaño de partícula.

En las aguas sin tratar, por ejemplo, la turbidez es producida por arcilla, limo, materia orgánica descompuesta, algas, proteínas de las plantas y desperdicios domésticos e industriales.

El olor y el sabor se deben predominantemente a la materia orgánica en descomposición, la cual libera gases de los productos solubles. Los gases pueden ser removidos por aireación vigorosa y una dosis apropiada de carbón activado, mientras que la remoción de los coloides requiere de la reducción del potencial zeta.

La turbidez está compuesta por dos fracciones distintas, ambas electronegativas y son:

a) Una fracción gruesa cuyo tamaño de partícula varía de 1 mm a 1 micra, y

b) Una fracción fina (coloidal) cuyo tamaño de partícula varía de 1 micra a  $10 \text{ \AA}$ .

La fracción gruesa puede ser removida por métodos convencionales de coagulación con sulfato de aluminio o hierro, mientras que no sucede así con la fracción fina, ya que su tamaño coloidal impide la sedimentación y su potencial zeta electronegativo impide la aglomeración. Aunque el coágulo de sulfato de aluminio es también electronegativo, dentro del mismo rango de microvoltaje, existe una repulsión mutua entre las partículas coaguladas y los coloides, y estas fuerzas con que se repelen impiden el contacto permanente a pesar de la agitación.

Los coloides pueden removerse en forma efectiva con sólo dismi-

nuir el potencial zeta, tanto del coloide como del coágulo, a un valor aproximadamente igual a - 5 Mv. Esto se puede hacer simultáneamente, con una dosis apropiada de un coagulante inorgánico y con un polielectrolito orgánico. Este método se usó en la planta de tratamiento de agua de Waterford<sup>(9)</sup>, y hoy en día sigue dando buenos resultados. Después de 3 minutos de la aplicación del sulfato de aluminio se aplicó un surfactante catiónico tenso activo, lográndose controlar el potencial zeta.

Los coloides deben ser considerados tomando en cuenta su pequeño diámetro y su gran superficie específica. La fig. (5) muestra la velocidad de sedimentación de partículas pequeñas de sílice, calculada por medio de la ley de Stokes. La curva muestra que para un coloide con dimensiones de  $1/10$  a  $1 \mu$ . la velocidad de sedimentación es solamente de 0.03 a 3.4 pulg/día, siendo despreciable en tamaños menores.

La ley de Stokes considera el movimiento de partícula con respecto al agua en reposo absoluto, sin embargo, en los casos reales siempre hay corrientes de convección en el líquido resultante de las diferencias en densidad, temperatura o turbulencias mecánicas menores.

### III.5 Polielectrolitos

Los polielectrolitos son sustancias orgánicas sintéticas y natura-

les modificadas, por lo general, polimeros con grandes pesos moleculares (entre 15,000 y varios millones). En lo que se refiere a cargas eléctricas o grupos ionizables, tienen características similares a las de los electrolitos simples.

Estos agentes desestabilizadores se utilizan en la coagulación solos o como co-coagulantes para mejorar el proceso, como ya se mencionó con anterioridad.

### III.5.1 Clasificación

Los polielectrolitos se dividen en: catiónicos, no iónicos y aniónicos.

Los primeros se caracterizan por adsorber las partículas coloidales negativas, por su atracción electrostática; los no iónicos, adsorben y flocculan al producirse una cadena por medio de puentes de hidrógeno entre las superficies sólidas y los grupos polares de los polimeros. En los aniónicos, la repulsión electrostática, tiene un papel importante en la acción de flocculación, con tres posibles mecanismos para la coagulación, que son:

a) Desplazamiento de los grupos aniónicos de las partículas coloidales por grupos aniónicos del polimero, por medio de puentes de hidrógeno.

b) Enlace entre el sólido y el polímero por medio de puentes de hidrógeno.

c) Creación de enlaces electrostáticos entre el coloide y el polímero a través de cationes polivalentes.

Los polielectrolitos generalmente se aplican unos tres minutos después de agregar el coagulante ( 5 ); esto se hace con el propósito de que en este intervalo se inicie la formación de microflóculos, para que después el polímero pueda ligarse a ellos.

Los polielectrolitos son en su mayoría compuestos nitrogenados. La habilidad para funcionar como agregante no está confinada exclusivamente a polímeros solubles en agua, con características de electrolito, ya que se han usado durante muchos años ciertos almidones y otros polisacáridos.

La capacidad de agregación de un polímero cuyo grado de carácter electrolítico puede variarse en un amplio rango ha sido estudiado con detalle, tomando como compuesto el producto obtenido en la fase acuosa de la polimerización redox catalizada de acrilamida ( 9 ).

Los polielectrolitos catiónicos y algunos no iónicos solubles en agua, son flocculantes muy efectivos para muchas suspensiones sólidas en amplios rangos de pH y concentración.

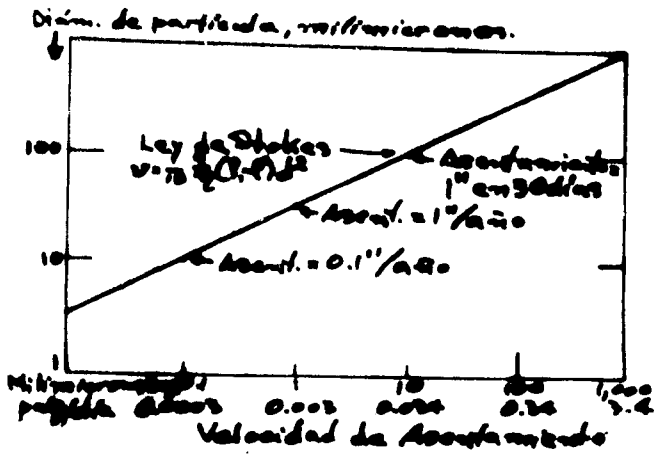


Fig. 5.- La ley de Stokes muestra que los coloides se asientan muy lentamente.

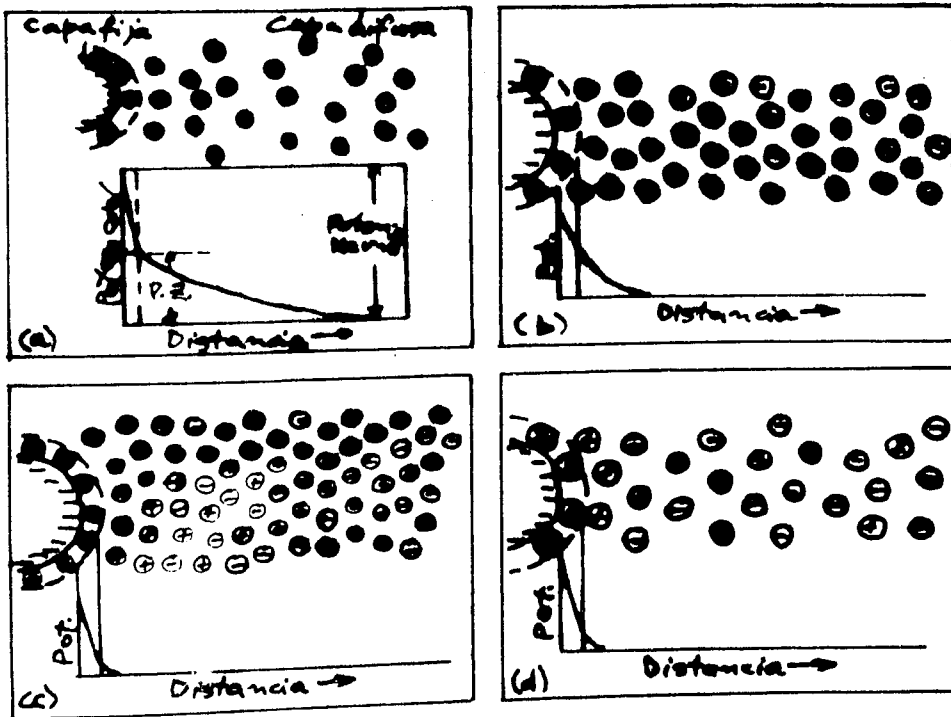
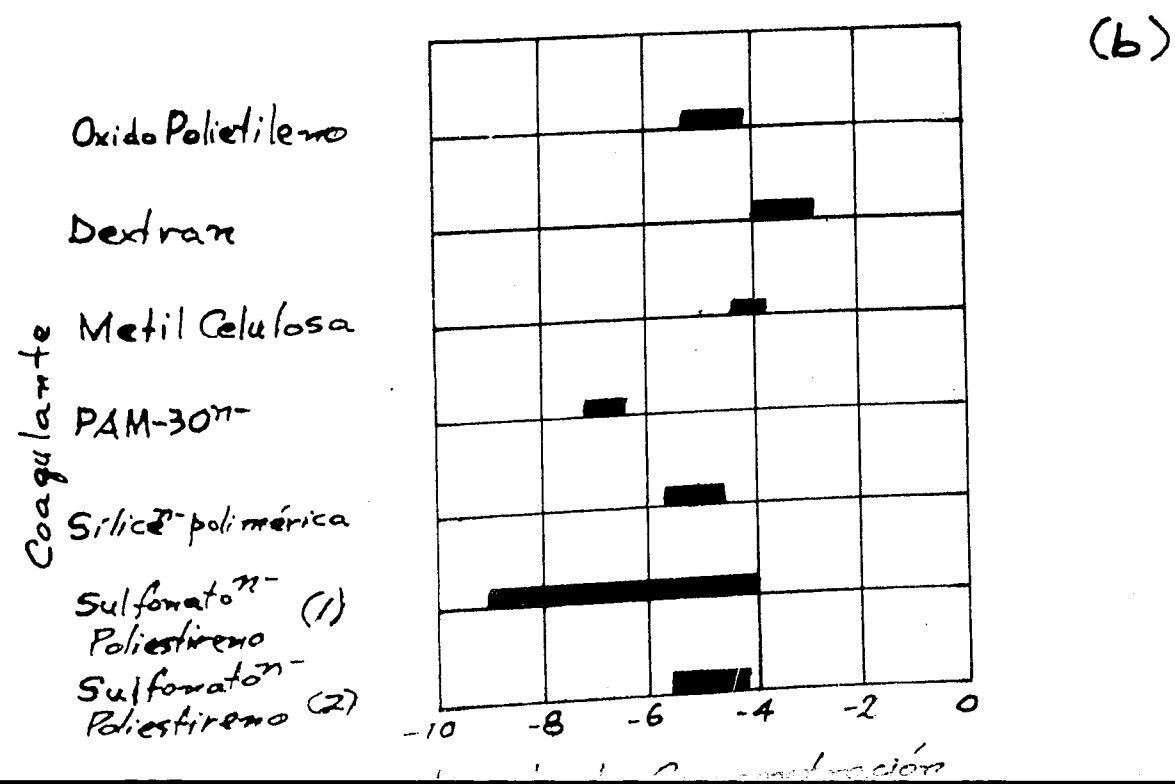
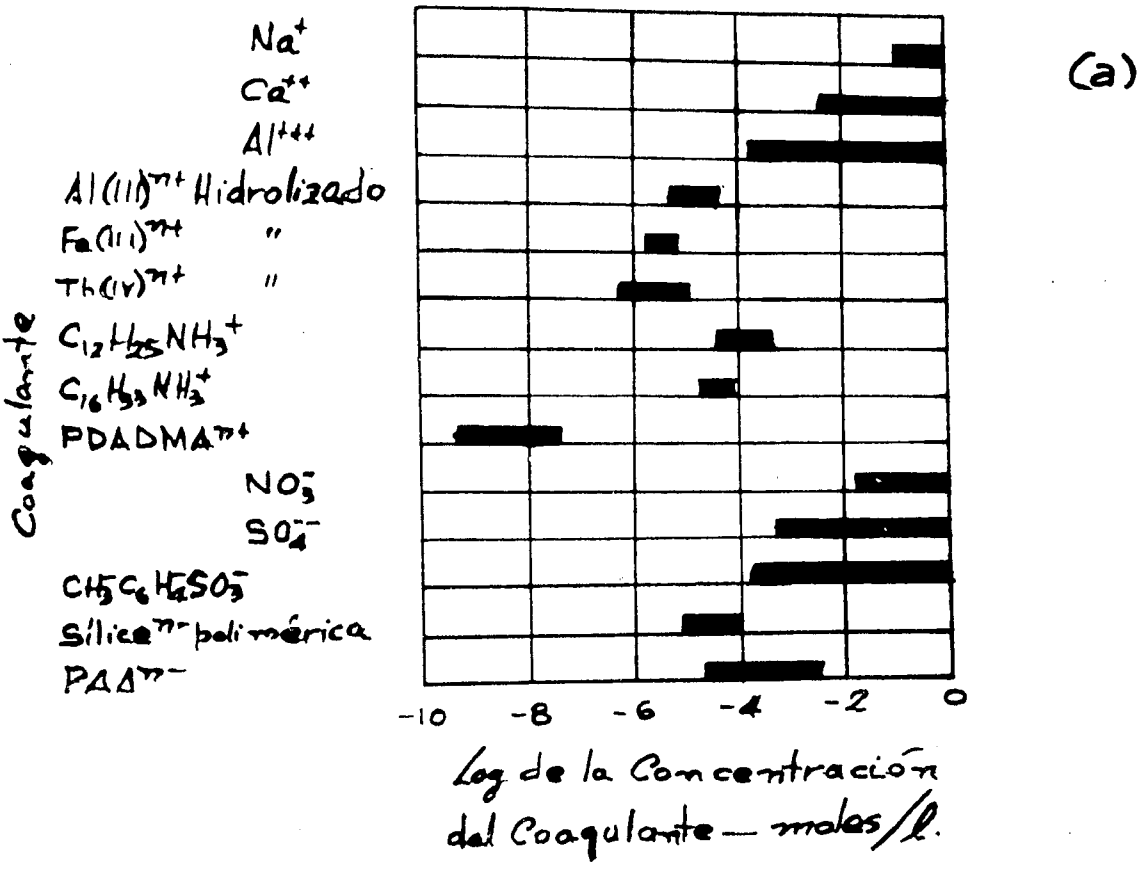


Fig. 7.- Origen del Potencial Zeta y efecto de los Iones de Carga Opuesta.  
 La fig. (a), partícula coloidal negativa con baja conc. de iones monovalentes. En (b) y (c), aumenta la conc. de iones, reduciéndose el Potencial Zeta.  
 En la (d), un ión (+) trivalente ha entrado en la

# Regiones típicas de Desestabilización para algunos Coagulantes Representativos





#### IV. Potencial zeta, definiciones

El potencial zeta es la medida de las cargas electrocinéticas (en milivolts) que rodean una partícula suspendida.

El potencial zeta se refiere a la carga de superficie de las partículas coloidales, el cual origina que las partículas migren en un campo eléctrico a un polo de carga de carga opuesta.

El potencial zeta puede ser el resultado de una adsorción selectiva de iones de la solución, de fuerzas de valencia residual o de ambas.

##### IV.1 Influencia del potencial zeta en la estabilidad

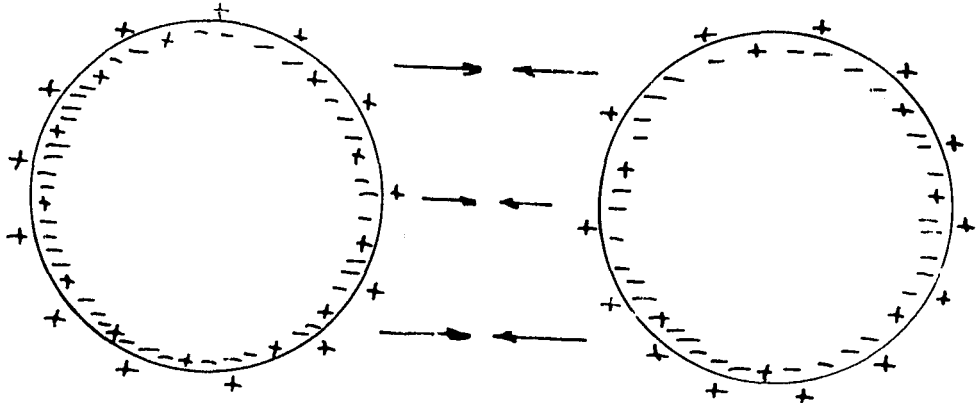
La estabilidad de un sistema coloidal depende de la adsorción de iones o polímeros por la mayor cantidad de líquido.

Existen tres métodos por los cuales se puede estabilizar un coloide, en cada uno de ellos el potencial zeta produce datos con los cuales se puede ajustar correctamente la estabilidad del sistema. Ver fig.(6). Para remover los coloides es necesario disminuir su potencial zeta, esto puede hacerse con un coagulante inorgánico o un polielectrolito orgánico. La reducción de las fuerzas de repulsión trae como consecuencia la aglomeración.

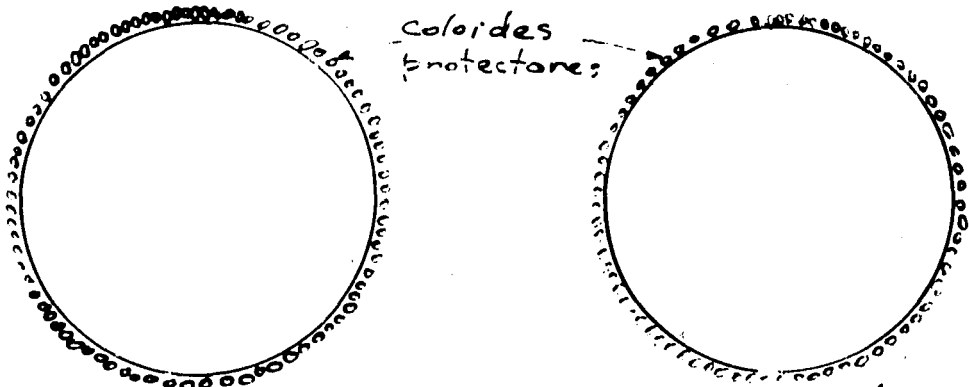
Los coloides tanto orgánicos como inorgánicos son electronega-

Tres métodos para obtener Estabilidad Coloidal.

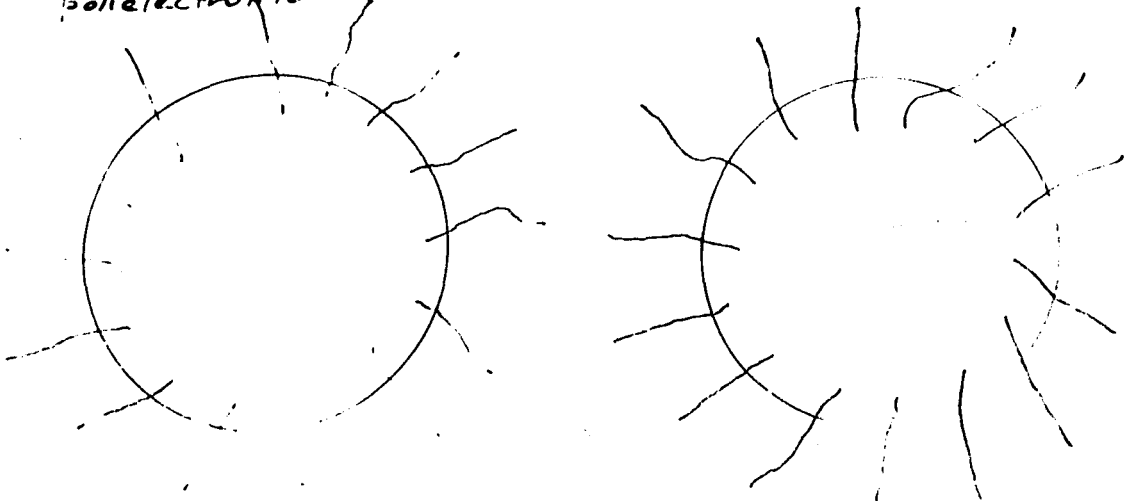
a) Repulsión mutua debida a elevación del Potencial Zeta.



b) Adsorción de un pequeño colóide iofílico en un colóide electronegativo grande.



c) Impedimento estérico debido a la adsorción de un polielectrolito orientado no iónico.



tivos cuando están suspendidos en agua destilada o en agua natural o sea en soluciones acuosas en general de baja concentración iónica y con pH entre 5 y 10. El potencial zeta de tales sistemas generalmente está en un rango de -14 a -30 Mv.; las proteínas caen dentro de este rango pero son menos electronegativas a medida que decrece el pH.

Los valores de potencial zeta menos negativos que -14Mv., usualmente representan un conjunto de aglomeración.

La dispersión y la coagulación comienzan cuando el potencial zeta tiene un valor de -14 a -30 Mv. Los valores más electronegativos que -30 Mv., representan suficientes repulsiones mutuas que dan como resultado la estabilidad. Para obtener mejores resultados en lo que se refiere a estabilidad debe incrementarse el valor del potencial zeta de -45 a -70 Mv.

A cualquier valor electronegativo del potencial zeta desde cero a -15 Mv., se puede mejorar notablemente el grado de aglomeración empleando polímeros de cadena larga para producir enlace mecánico. Cuando el potencial zeta tiene valores más electronegativos que -15 a -25 Mv., los coloides ( de 1 micra de tamaño o menores) en suspensiones diluídas caen para producir aglomeración bajo la aplicación de un polímero aniónico o no iónico de cadena larga.

## IV.2 Estabilidad sin aglomeración

Para asegurar la estabilidad sin aglomeración en una suspensión coloidal, cada coloide debe cumplir los siguientes requisitos:

- a) Adsorción de un electrolito o polielectrolito aniónico sobre el coloide, a fin de crear fuertes repulsiones mutuas.
- b) Adsorción de un coloide hidrofílico hidratado (como protector), ejemplo de esto es la adsorción de gelatina sobre un coloide hidrofóbico. En este caso la afinidad con el agua excede la atracción mutua entre las partículas adyacentes.
- c) Adsorción de un polímero no iónico de cadena suficientemente grande para producir impedimento estérico, que previene que dos partículas se acerquen tanto que se unan. Este método es muy empleado en las emulsiones.

Cuando se desea finalizar la coagulación, el potencial zeta debe volverse más electronegativo con el fin de reducir las repulsiones mutuas.

La coagulación óptima se verifica en un rango de potencial zeta de 3 Mv. La aglomeración masiva se obtiene empleando polímeros de cadena larga para proporcionar enlace mecánico en unión al control del potencial zeta.

IV.3 El potencial zeta como técnica en el tratamiento de agua.

El principio fundamental de electro-osmosis (que es en muchos aspectos el inverso de la electroforesis) fue descubierto hace 150 años. Con el estudio reciente de estos conceptos se ha llegado al diseño de una celda para medir el potencial zeta.

En los primeros experimentos se pudo observar que si una bola de arcilla era sumergida en agua, y se le insertaban dos tubos de vidrio con sus terminales fuera del agua, cuando se hacía pasar un voltaje de corriente directa a través de los electrodos en los tubos, produciría que en uno de los tubos el líquido se elevara sobre la superficie del agua y en el otro fuera comprimido. Si se invierte la polaridad se puede cambiar el orden de elevación o depresión del líquido, por lo que un sólido inmóvil ( en este caso la arcilla) ocasiona un movimiento en el líquido, a esto se le llama electroosmosis.

En la electroforesis un sólido suspendido (tal como partículas de arcilla coloidal) se mueve en un campo de corriente directa con relación al líquido que lo suspende (agua).

La partícula coloidal coloreada es, como todos los coloides del agua sin tratar y las proteínas electronegativa. Se considera que ha adsorbido un exceso de iones negativos en su superficie exterior.

La preferencia de los coloides para adsorber iones negativos en

su superficie, ha sido objeto de investigación. Una explicación simplificada de esto es que hay más iones OH fijos dentro de la estructura del coloide, o que son más aceptados por los coloides que por los iones positivos, los cuales a menudo son mayores que los negativos (tamaño).

Las superficies negativas de los coloides atraen una película que las rodea de iones positivos, los que se pueden originar, tanto en el seno del líquido como en la superficie del mismo coloide. La capa de contraiones es atraída por el coloide electrostáticamente mientras que el movimiento browniano tiende a distribuirlos uniformemente en toda la solución, constituyendo así la llamada doble capa difusa.

Si la carga negativa es muy fuerte algunos contraiones estarán tan fuertemente atraídos que penetrarán en la superficie del coloide como una capa compacta firmemente unida, llamada la capa de Stern. Esta capa neutraliza parcialmente la carga y la atracción electrostática del coloide, de modo que los contraiones que no han penetrado en la superficie de la partícula, pueden estar muy lejos; mientras están en la vecindad inmediata del coloide. Ellos forman la llamada parte difusa de la doble capa.

El potencial zeta es el potencial en la superficie que separa la parte inmóvil de la doble capa de la parte difusa. Es una medida simultánea de la carga de la doble capa difusa (por unidad de superficie del coloi

de) y de su distancia de esta superficie. Por lo tanto, el potencial zeta está relacionado con la fuerza y la distancia con la cual las partículas pueden repelerse y así prevenir la floculación.

Esto está considerablemente simplificado. Verwey<sup>(16)</sup> enfatiza el hecho de que la carga superficial puede reflejar la naturaleza de los iones adsorbidos o la naturaleza de los iones determinantes del potencial (principalmente de la valencia o de la valencia equivalente) situados en la doble capa.

La regla de Schulze-Hardy establece que en la coagulación de sales el poder de floculación (de ahí que controle el potencial zeta) de los iones bivalentes es aproximadamente de 20 a 80 veces el de los iones monovalentes, y que el poder de floculación de los iones trivalentes es de 10 a 100 veces el de los iones bivalentes. Fig. (7). Cuando un líquido que contiene tales partículas se coloca en un campo eléctrico, las partículas negativas son atraídas al electrodo positivo y los contraiones al negativo. Esta atracción aumenta con la carga en la partícula.

La fricción entre la partícula y el líquido que la rodea y que contiene la doble capa difusa retarda el movimiento de la partícula hacia el electrodo correspondiente, mientras mayor sea la extensión de la doble capa menor es la resistencia. Por lo tanto, la velocidad de la partícula en un

campo dado aumenta con la densidad y la extensión de la doble capa, las que como se ha visto son medidas por el potencial zeta.

De esta forma, la velocidad de una partícula coloidal en un campo eléctrico es proporcional a ese campo (volts/cm) y al potencial zeta de la partícula. Con estas consideraciones se podría pensar que la carga total en el coloide es directamente proporcional a su velocidad de movimiento en un campo de corriente directa. Abramson, sin embargo ha demostrado experimentalmente que esto es estrictamente un fenómeno de superficie. Si una partícula de calcita con un potencial zeta de -20 Mv., se cubre con una proteína que tiene un potencial zeta de -12 Mv., ésta viajará en un campo de corriente directa con una velocidad equivalente a un potencial de -12 Mv.

La ecuación fundamental para el potencial zeta de partículas comparables a los coloides del agua sin tratar es:

$$\text{Potencial Zeta} = U V_t \frac{4\pi}{D_t}$$

donde

U es la velocidad electroforética de la partícula  
 $V_t$  y  $D_t$  son la viscosidad y la constante dieléctrica del líquido que suspende respectivamente.



Ya que  $V_e$  y  $D_p$  son constantes para un líquido determinado a temperatura constante, el potencial zeta es directamente proporcional a la velocidad electroforética de la partícula.

Transformando el voltaje de volts electrostáticos a volts prácticos  $U$  se expresa como la velocidad de viaje de la partícula en micrones/seg. por volt/cm. Los micrones/seg. se determinan fácilmente, tomando el tiempo de viaje de una colóide individual entre dos límites conocidos de un micrómetro ocular. Los volts/cm representan fundamentalmente la caída de voltaje (en el líquido suspensor) entre electrodos y la distancia efectiva entre ellos (en cm.)

#### IV.4 El potencial zeta en la coagulación

Es notable que mientras más alta es la contaminación de las aguas, tal como sucede en el Río Hudson, las aguas contienen grandes cantidades de coloides (0.1  $\mu$  de tamaño), la precipitación es apreciable y ocurre en menos de 30 días aproximadamente, esto podría verse como contrario a la ley de Stokes, pero hay pruebas de que la aglomeración se debe a la disminución del potencial zeta de los coloides orgánicos, como consecuencia de la reducción de las fuerzas de repulsión se obtiene la aglomeración y una rápida clarificación.

Es interesante analizar la hipótesis de por qué la coagulación se verifica a un potencial zeta de -14 a -20 Mv.

Asumiendo un flóculo con potencial zeta de -20 Mv., luego de -10 Mv., y finalmente de cero Mv. (agregando siempre alúmina y polielectrolito catiónico). A -20 Mv. Fig. (8), pocos coloides pueden alcanzar al flóculo, ya que ambos son fuertemente electronegativos. A -10 Mv. Fig. (9), las fuerzas de repulsión mutua han disminuído, pero el total de cargas negativas de los coloides es fuerte. Cuando el potencial zeta es cero Fig. (10) todavía los coloides y el flóculo se repelen entre sí, pero ésto puede ser anulado con una buena agitación mecánica y ponerlos en contacto, y es entonces cuando las fuerzas de London-Van der Waals hacen efecto y ejercen atracción mutua.

#### IV.5 El potencial zeta en las suspensiones coloreadas

a) La eliminación de color por coagulación con sulfato de aluminio se efectúa mejor con un potencial zeta neutro<sup>(17)</sup>.

b) La remoción de color por coagulación con sulfato férrico, se efectúa mejor con un potencial zeta ligeramente positivo<sup>(18)</sup>.

c) La remoción de turbiedad, en la mayoría de los casos, se realiza mejor con la regresión del potencial zeta a valores negativos<sup>(19)</sup>.

PZ del coágulo =  
-20mv.

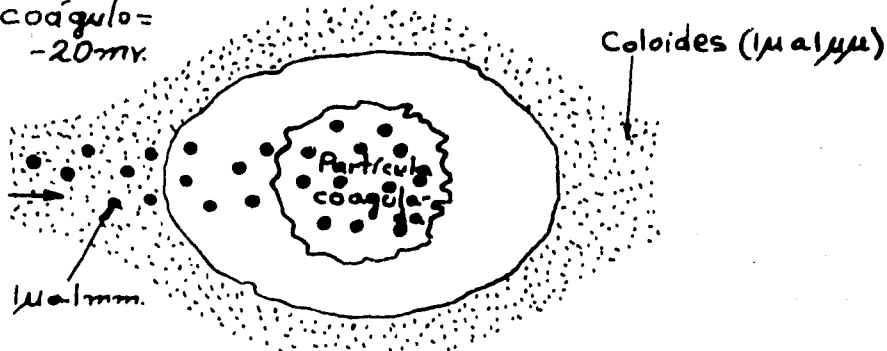


Fig. 8.- A -20mv, algunos coloides alcanzan el coágulo.

PZ = -10mv.

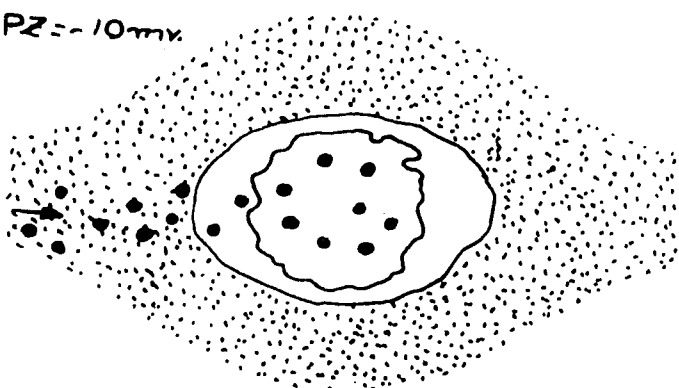


Fig. 9.- A -10mv, los coloides todavía no alcanzan completamente al coágulo.

PZ = 0  $\pm$  5mv.

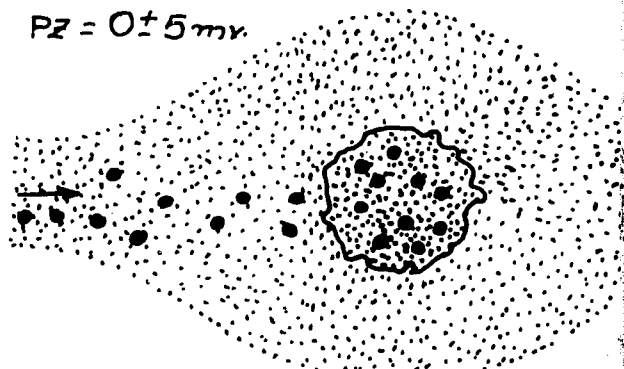


Fig. 10.- A cero mv, los coloides alcanzan el coágulo.

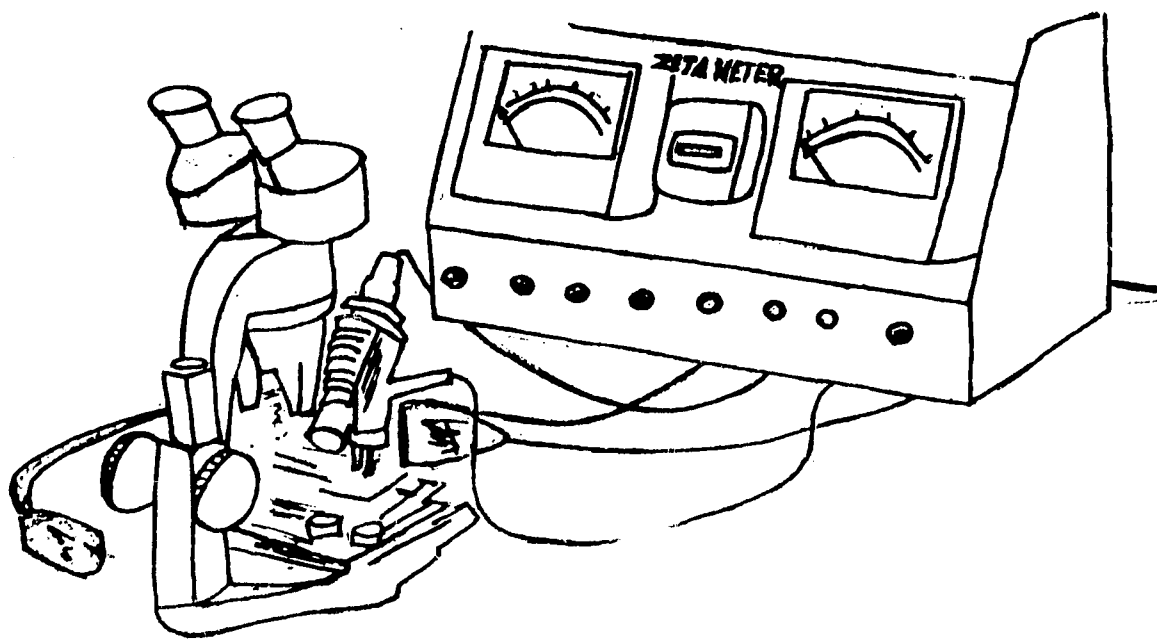


Fig. 11.- Celda medidora del Potencial Zeta. (Zeta Meter).

#### IV.6 Celda medidora del potencial zeta

Anteriormente existían otros aparatos para medir el potencial zeta pero eran difíciles de operar y sobre todo delicados, en la actualidad se encuentra en el mercado la nueva celda que usa un microscopio electrónico. La fig. (11) muestra el equipo que consiste de:

- 1- Un microscopio estereoscópico con micrómetro ocular; oculares 15X WF; objetivos de 2, 4, 6, 8X; y una etapa mecánica especial. (Un microscopio normal de laboratorio no se puede usar en la celda).
- 2- Un iluminador especial, que produce un haz delgado de luz azul-blanca intensa, con un filtro absorbedor de calor.
- 3- Un suministro de corriente directa, continuamente variable de 0 a 500 volts.
- 4- Una celda para electroforesis de plástico claro, equipada con electrodos de platino iridiado.
- 5- Un sostén de la celda que consiste, de un espejo grueso altamente reflector de la luz ( $45^{\circ}$ ), la cual pasa a través del tubo de la celda.
- 6- Un cronómetro eléctrico del tipo interrumpido con lectura acumulativa en segundos y décimas de segundos.

La figura 12, muestra la celda, un bloque de plástico claro con un

pequeño tubo pulido que se encuentra en el centro. El tubo se conecta por medio de puertas selladas a dos cámaras de solución, una de las cuales está sellada con un electrodo de platino iridiado y directamente acoplado y de tipo cerrado, mientras que el otro contiene un electrodo de tipo abierto.

El electrodo cerrado está en una cámara para prevenir cualquier movimiento dentro del tubo de la celda, que no sea el inducido por el voltaje. La otra cámara se deja abierta (o cubierta con una tapa plástica). Este arreglo se emplea para medir la velocidad electroforética de todos los coloides.

Si se van a valorar partículas floculadas, se usan dos electrodos de platino de tipo abierto para permitir el balanceo de la celda. La celda se soporta en el sostén, como se observa en la figura (13), de modo que el haz de luz se refleja hacia arriba a través del tubo de la celda. Esto elimina la luz directa de los lentes del microscopio, y permite que se vean partículas muy pequeñas si éstas pueden reflejar la luz.

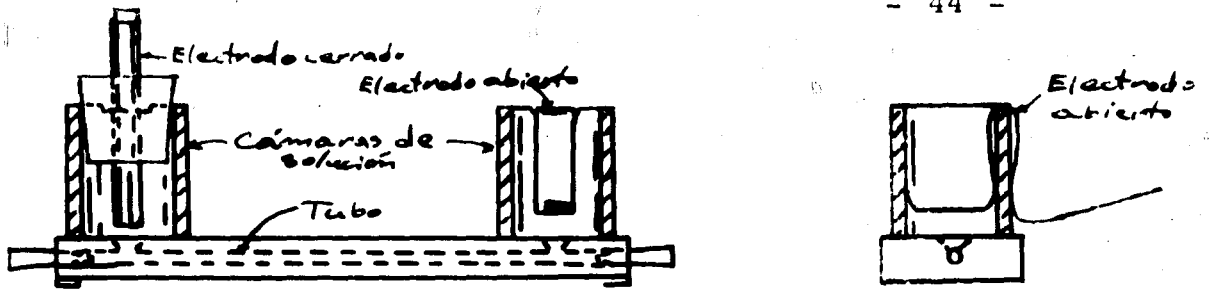


Fig. 12.- Secciones del tubo y las cámaras de solución.

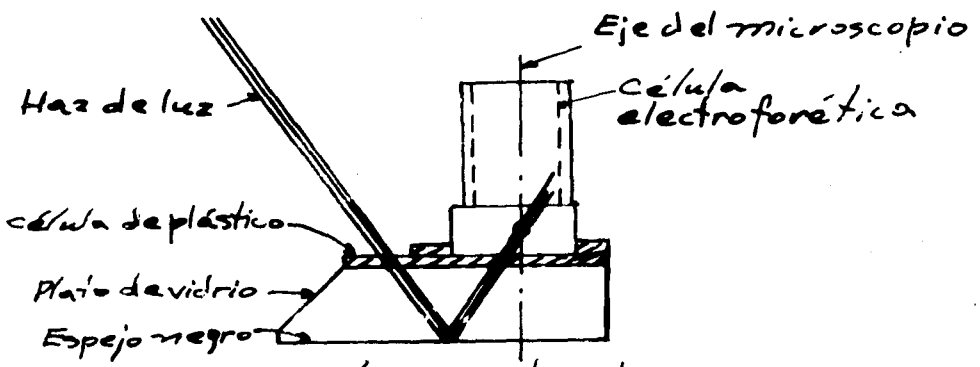


Fig. 13.- Partículas iluminadas por reflexión.

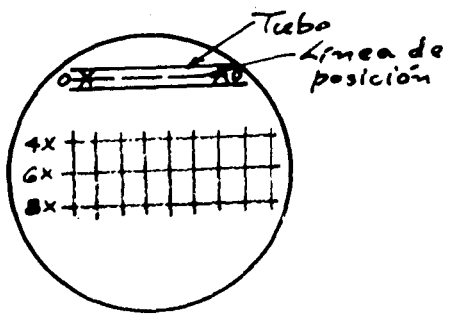


Fig. 14.- Ocular micrométrico.

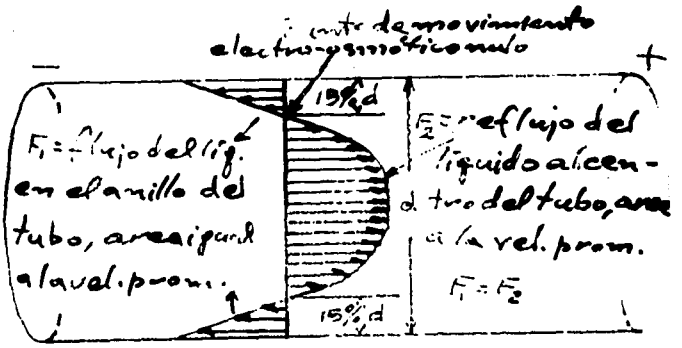


Fig. 15.- Punto de movimiento nulo.

La celda está colocada un poco arriba del espejo para proveer una barrera aislante del aire, y el paso de la luz a través del espejo reduce la transmisión de calor.

Para observar coloides en cualquier líquido cuando la concentración es baja, se quita la celda y se coloca una gota de la suspensión en el espejo debajo del microscopio.

La sangre y el jugo de caña de azúcar crudo deben ser diluidos con agua destilada. Esta técnica es simple pero muy efectiva para apreciar cualitativamente las concentraciones coloidales y puede ser empleada a nivel industrial.

La fig. (14) muestra una sección del tubo como se ve a través del microscopio estereoscópico. El objetivo 2X permite observar todo el ancho del tubo para evaluación de precipitados. Un micrómetro se emplea en el ocular, y la celda está colocada en la línea de ajuste de cero del micrómetro en la pared frontal aparente del tubo. Esta pared se ve en forma de línea al enfocar el microscopio a la profundidad media de la celda. La diferencia entre el diámetro real y el aparente es consecuencia de la refracción.

Si una partícula suspendida se mueve por electroforesis en relación al líquido, se deduce que el líquido debe moverse también con rela-

ción a un sólido fijo (las paredes del tubo de la celda). Para compensar este movimiento del líquido (electroendo-osmosis, que se manifiesta como un flujo a lo largo de las paredes del tubo), es necesario medir la velocidad de viaje de las partículas a una distancia del 15% del diámetro del tubo, a partir de la pared del mismo. En la fig. (15) se presenta esta relación.

El procedimiento para determinar el potencial zeta de las partículas es el siguiente:

- 1- Llenar las cámaras de solución con la suspensión, y luego se incerta el electrodo tapado en una cámara extrayendo todas las burbujas de aire. Inclinar la celda para llenar el tubo del electrodo, e incertar el tapón en este tubo cerrando la celda. Se coloca el electrodo abierto en la otra cámara.
- 2- Colocar la celda en el sostén y ajustar la etapa mecánica de manera que la línea de cero del micrómetro ocular coincida con la pared frontal aparente del tubo, como se muestra en la fig. (15), enfocando el microscopio estereoscópico a la profundidad media de la celda, de tal forma que la línea central sobresalga con el enfoque.
- 3- Conectar los electrodos al suministro de corriente directa ajustándola a un voltaje determinado.



4- Con el cronómetro eléctrico, se mide el tiempo acumulativo (en segundos y décimas) requerido para 10 o 20 partículas situadas muy cerca o en la línea de cómputo del objetivo que se esté utilizando, de tal forma que cada una atraviere una división del micrómetro.

Los datos básicos para determinar el potencial zeta son: voltaje, objetivo utilizado, número de partículas observadas, tiempo total en segundos, y temperatura de la muestra.

Como el objetivo más indicado para la medición del potencial zeta es el 6X, la fig. (16) presenta las curvas para dicho objetivo. Con el tiempo en segundos y el voltaje utilizado se determina la movilidad electroforética en micrones/seg. por volt/cm. Llevando este valor de movilidad a la fig. (17) hasta cortar la línea de temperatura de la muestra se determina el potencial zeta en milivolts.

Fig. 16.-  
Movilidad de la  
partícula en función  
de la velocidad y  
el voltaje.

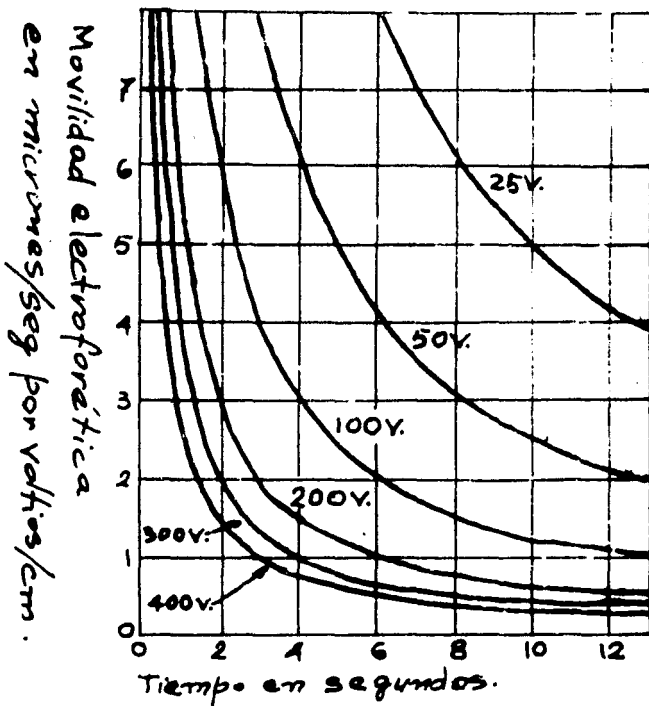
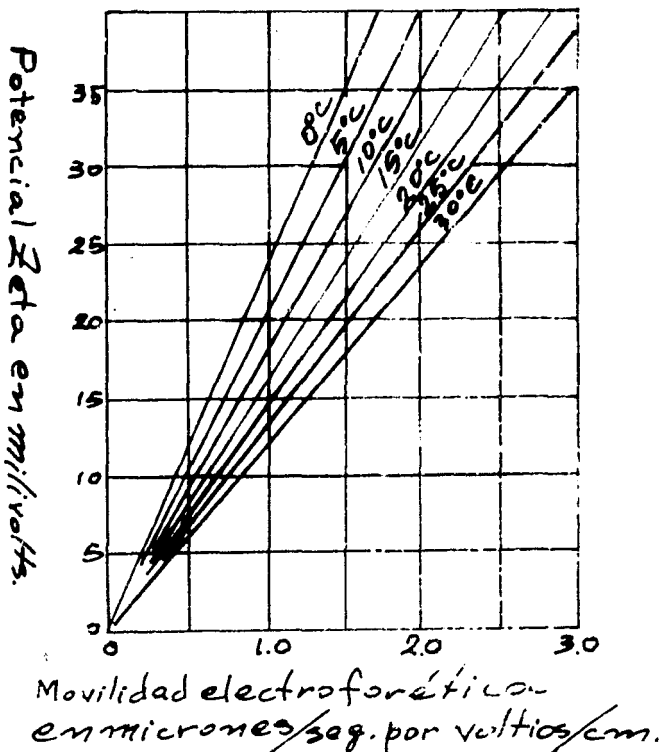


Fig. 17.-  
Potencial Zeta en  
función de la mo-  
vilidad electroforé-  
tica y la tempera-  
tura.



## Conclusiones.-

Las pruebas que demuestran la eficiencia del control del potencial zeta con el fin de estabilizar y desestabilizar sistemas coloidales, son las plantas de tratamiento de aguas en Waterford y el uso del medidor de potencial zeta en los problemas cardiovasculares.

En esta recopilación bibliográfica se señalan las propiedades más importantes de los coloides con el propósito de entender mejor los mecanismos de desestabilización y como actúan sobre los coloides los distintos agentes coagulantes.

En el capítulo que trata sobre el potencial zeta, se describe el aparato medidor con detalles en el manejo y figuras descriptivas del aparato.

Nuestro mayor deseo es que este trabajo monográfico, sea una pauta en lo futuro para trabajos de investigación y de esta manera se demuestre experimentalmente la importancia práctica que tienen tanto la medición del potencial zeta como su control.

## Bibliografía

- 1.- Stumm W. y Morgan, J.J. 1962. Chemical Aspects of Coagulation.  
AWWA, 54:971.
- 2.- Stumm, W. y O'Melia 1968. Stoichiometry of Coagulation. Jour.  
AWWA.
- 3.- A.P. Black. 1960 Basic Mechanisms of Coagulation. Jour., AWWA
- 4.- Pressman, Maurice, 1967. Cationic Polyelectrolytes as Prime Coa-  
gulants in Natural-Water Treatment, Jour. AWWA.
- 5.- Michaels, A.S. 1954. Aggregation of Suspensions by Polyelectrolytes.  
Industrial and Engineering Chemistry.
- 6.- Black, A.P., y Vilaret, Manuel R. 1969. Effect of Particle Size on  
Turbidity Removal. Jour. AWWA.
- 7.- Riddick, Thomas M., Control of Colloid Stability Through Zeta Poten-  
cial, pág. 2, 3, 199 y 358.
- 8.- Maron y Prutton, Principles of Physical Chemistry. Capítulo 21,  
pags. 835a 839.
- 9.- Riddick, Thomas M., Zeta Potencial: New Tool for Water Treatment.  
Chemical Engineering, 1961.
- 10.- Riddick, Thomas M., Zeta Potencial: New Tool for Water Treatment

- 11.- Daniels y Alberty, Physical Chemistry (2a. edición), págs. 573 y 614.
- 12.- Micnaels, A. S. y Morelos, O. 1955. Polyelectrolytes Adsorption by Kaolinite. Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 47, no. 9.
- 13.- La Mer, V.K. 1964. Coagulation Symposium Introduction. J. Colloid Science, 19:291.
- 14.- Black, A.P., Birkner, F.B. y Morgan, J.J. 1965. Destabilization of Dilute Clay Suspensions with Labeled Polymers. Jour. AWWA.
- 15.- Stern, O., 1924. Zur Theorie der Elektrolytischen Doppelschicht Zeitschrift fur Electrochemie, 30:508 .
- 16.- Verwey and Overbeek, 1948. Theory of the Stability of Lyophobic Colloids. Elsevier Pub. Co. Amsterdam.
- 17.- A.P. Black and D.G. Willems, 1961. Electrophoretic Studies of Coagulation for Removal of Organic Color, Jour. AWWA, Vol. 53 no. 5
- 18.- A.P. Black, 1963. Stoichiometry of the Coagulation of Color Causing Organic Compounds with Ferric Sulfate, Jour. AWWA, Vol. 55 No. 10.
- 19.- A.P. Black y S.A. Hannah, 1961. Electrophoretic Studies of Turbidity Removal by Coagulation with Aluminium Sulfate, Jour. AWWA, Vol. 53, no. 4.

- 20.- Mendoza, G. 1971. Estudio de Neutralización y precipitación de Coloides de Color, Instituto de Ingeniería, UNAM. Pub. 284
- 21.- A.P. Black, F. B. Birkner, and J.J. Morgan, 1966. The Effect of Polymer Adsorption on the electrokinetic Stability of Dilute Clay Suspensions. Jour. of Colloid and Interface Science 21, 626-648.
- 22.- W.F. Langelier, et.al., 1952. Flocculation Phenomena in Turbid Water Clarification. Proc. Am. Soc. Civil Eng., Vol. 78
- 23.- P. Somasundaran, T.W. Healy and D.W. Fuerstenau. 1964. Surfactant Adsorption at the Solid-Liquid Interface-Dependence of Mechanism on Chain Length. Jour. of Physical Chemistry, Vol. 68 no. 12.