



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

Análisis de Distribución de Metales
Pesados en Sistemas Acuáticos
Naturales

T E S I S

Estela Martínez Hernández

QUIMICO

1 9 8 2



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

CONTENIDO.

- I. INTRODUCCION.
 - II. SISTEMA CONTAMINANTE.
 - III. COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES.
 - IV. DISTRIBUCION DE LOS CONTAMINANTES.
 - V. ANALISIS DE CONTAMINANTES.
 - VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.
- BIBLIOGRAFIA.

1. INTRODUCCION

La presencia de metales pesados en la naturaleza en concentraciones traza se debe principalmente al aporte de rocas y minerales intemperizados. En los sistemas biológicos estas concentraciones traza actúan como reguladores de las actividades enzimáticas y metabólicas de los organismos.

Estos niveles naturales se han incrementado por actividades -- del hombre y por los aportes debidos al desarrollo urbano y - técnico y a actividades industriales específicas.

La detección de metales pesados en organismos acuáticos y en el hombre mismo señalan que existe un equilibrio frágil entre las cantidades de metales necesarios en los procesos metabólicos y las dosis tóxicas. Este equilibrio no depende solo de las - cantidades disponibles en la litosfera e hidrosfera sino principalmente de la actividad microbiana que los hace accesibles

a los sistemas biológicos en forma de complejos organometálicos.

La ingestión y acumulación de estos elementos en organismos acuáticos llegan al hombre afectando su salud así como a los usos a que se destine el agua.

No obstante que se han detectado altos niveles de metales pesados en componentes abióticos y bióticos de los sistemas acuáticos, poco se conoce de los aspectos ambientales y bioquímicos que regulan las concentraciones de estos elementos, así como su distribución espacial y temporal, transformación y translocación de metales pesados en las diferentes interfases de los ecosistemas acuáticos.

PROBLEMATICA.

El desarrollo industrial del país se ha incrementado en los últimos años generando un aporte de contaminantes metálicos, determinando un aumento en los niveles naturales de los ecosistemas, en detrimento de su conservación y del hombre mismo.

El hombre como usuario potencial, al tener acceso a los compuestos metálicos bien por ingestión de organismos concentrados, que utiliza en su dieta (moluscos, crustáceos, peces o vegetales), como por los usos a que se destinan las aguas, se ve seriamente afectado.

Los efectos nocivos de los metales pesados en el hombre se han observado en Japón, E. U. y otros países industrializados, donde se han detectados efectos en la salud como mutagénesis, teratogénesis, además de que se les atribuye propiedades cancerígenas. En México se han reportado casos de Arsenismo con carácter endémico, principalmente en la región Lagunera encontrándose en la población altos contenidos de As en piel y componentes ectodérmicos, así como se ha observado en Cd. Juárez, Chih., cuya población presenta altos contenidos de Pb en la sangre.

Otros elementos de alto riesgo para la salud se consideran el Cd y Hg, de amplia distribución tanto en zonas industriales como agrícolas. Gran parte de los compuestos metálicos se consideran muy tóxicos para la salud.

El conocimiento de los efectos de los metales pesados en los ecosistemas, su distribución, acumulación y translocación al hombre así como su protección y conservación constituyen la problemática generada por el desarrollo industrial del país.

METODOLOGIA

Para solucionar el problema de contaminación es indispensable desarrollar un proyecto cuyo objetivo general sea el diseño e implantación de un sistema de control de la contaminación de cuencas hidrológicas.

Para alcanzar este objetivo es conveniente que el proyecto sea dividido en dos etapas: estudio y diagnóstico del sistema de contaminación de una cuenca.

PRIMERA ETAPA

El objetivo de esta etapa consiste en analizar el sistema de contaminación de una cuenca hidrológica y diagnosticar su estado actual. A fin de lograr este objetivo, el estudio que se realice constará de dos fases: a) conceptualización del sistema de contaminación, y b) especificación de dicho sistema.

En la primera fase se definirá el sistema de contaminación y se determinarán sus componentes así como las interconexiones que existen entre los mismos. En la segunda fase se realizarán estudios de campo a fin de especificar concretamente el sistema conceptualizado.

FASE DE CONCEPTUALIZACION

Dentro de esta fase, para el presente estudio se tomarán en cuenta 2 factores principales: contaminante y transporte. El primer factor es el que produce el material contaminante y el segundo se encarga de transportar ese material.

FASE DE ESPECIFICACION

Esta fase consiste en analizar concretamente las partes de --

que consta el sistema de contaminación. Para conseguir esto será necesario seleccionar una cuenca hidrológica y realizar estudios de campo en la misma. *¿ Cuantas*

Así por ejemplo, para especificar el factor contaminante deberán inventariarse los organismos que lo integran (empresas, industriales, yacimientos, poblados, campos agrícolas, etc) conocer los procesos mediante los cuales se produce el material contaminante, qué tipos de material contaminante se producen, cantidad y características de este material, etc.

En lo que se refiere al factor transporte, su especificación -- proporcionará datos tales como la identificación de los medios- (ríos, tierra, lluvia, corrientes subterráneas, drenajes, etc.), localización de éstos, origen y destino del material contaminante.

II SISTEMA CONTAMINANTE

Conceptualización del modelo del Sistema Contaminante por metales Pesados.

La conceptualización del sistema contaminante consiste en definirlo y mencionar los componentes que lo integran las inter conexiones que existen entre sí y describir los mecanismos -- que los modifican.

La contaminación del recurso hidráulico por metales pesados - es originada por dos fuentes, natural y artificial.

FUENTES NATURALES

La existencia y amplia distribución de yacimientos minerales

en el país, así como la interacción agua - mineral, originada por el contacto con corrientes de agua o escurrimiento e infiltraciones por lluvias, representa un origen importante de incorporación de metales pesados al recurso hidráulico, definiéndose tal origen como una fuente natural de contaminación.

Para la identificación de las fuentes naturales potencialmente contaminadoras por metales pesados, se recurrió a la génesis de los yacimientos minerales, ya que su incidencia a lo largo de la República Mexicana, demuestra la existencia de una íntima relación entre los movimientos diastróficos y los procesos metalogénéticos.

La existencia de algunos casos de contaminación de cuerpos de agua, como el registrado en la Región Lagunera, de contaminación por arsénico, demuestran la importancia que este tipo de fuente de contaminación puede tener, sobre todo en lugares en donde las características del terreno y las condiciones de interacción agua - mineral sean propicias.

A continuación se hace una descripción de los mecanismos involucrados en la contaminación natural del agua por metales pesados.

1. La fuente natural de contaminación se ha dividido en -

rocas y suelos para responder a la necesidad de explicación del mecanismo, mediante el cual, el contaminante es incorporado al recurso hidráulico.

2. Las rocas al verse sujetas al fenómeno de intemperismo, sufren una serie de transformaciones mecánicas, químicas, biológicas, etc., mediante las cuales, los componentes minerales que las forman quedan expuestos al ambiente, de tal manera, que al efectuarse el contacto con el agua, podrán incorporarse a la misma.

De esta forma se define el principal mecanismo natural de aporte de metales pesados a las corrientes de agua.

Como resultado de tal acción, y, de la interacción agua - mineral, se distinguen dos formas del contaminante que se incorpora al sistema de transporte; la parte soluble definida por los elementos clasificados como activos, los cuáles pueden ser fácilmente transportados, y la parte insoluble, la cual viajará siempre sujeta a condiciones de tipo hidráulico.

3. Como resultado del intemperismo, el residuo insolu-

ble formado, pasará finalmente a constituir los suelos. Estos presentarán composiciones variables, existiendo zonas características con composiciones específicas.

Por este medio, podrán ser incorporados al sistema de transporte, sólidos insolubles y sólidos disueltos al ocurrir la interacción suelo - agua, sobre todo en regiones de vegetación escasa, la contribución por este medio es muy significativa.

4. El material producto del intemperismo, así como los suelos que entren en contacto con el agua, están en condiciones, en su parte soluble, de incorporarse al sistema de transporte. La incorporación, en estas condiciones, estará determinada básicamente por el potencial de oxidación del o los elementos involucrados. Además, otros factores juegan un papel muy importante, tales son: las condiciones alcalinas o ácidas de los fluidos asociados, presencia de condiciones oxidantes o reductoras, temperatura, etc.
5. Por lo que respecta a la parte insoluble del producto de intemperismo y suelos, ésta se incorporará al sistema de transporte básicamente por mecanismos físicos.

La inclusión de varios metales pesados entre los elé

mentos químicos más abundantes en la litósfera, así como la existencia de zonas ricas en minerales, permiten considerar el arrastre provocado por escurrimientos pluviales y las infiltraciones hasta corrientes subterráneas, como mecanismos importantes en la incorporación de metales pesados al recurso hidráulico.

6. Cuando las condiciones hidráulicas del sistema de transporte sean propicias, parte del material incorporado al mismo ^{se} sedimentará, tal acción será acelerada por la formación de complejos insolubles, densificación de partículas, etc.

El sedimento representa una condición inestable, en la que la existencia de un equilibrio dinámico, y el flujo de materia derivado de situaciones físicas propias de la corriente de agua, determinan una redistribución del material sedimentado.

La formación de nuevos compuestos, la variación en las condiciones fisicoquímicas de la corriente, etc. definirán la redisolución de parte del sedimento y su

nueva incorporación al sistema de transporte.

Algunos procedimientos utilizados en los tramos navegables de algunos ríos, como lo es el dragado, se constituirán, en algunos casos, en una nueva fuente de incorporación al sistema contaminante, cuando la presencia de escurrimientos pluviales y el consiguiente arrastre de los lodos así dispuestos sea factible. Los Estados de la República Mexicana que presentan contaminación por presencia de yacimientos minerales, son:

Yacimientos de arsénico: Coahuila y México.

Yacimientos de cromo: Baja California, Guerrero y Puebla.

Yacimientos de Mercurio: Chihuahua, Durango, Zacatecas, Nayarit, Jalisco, Aguascalientes, Michoacán, Guanajuato, San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo, México, Morelos y Guerrero.

Yacimientos de zinc: Baja California Norte, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas,

Sinaloa, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Nayarit, Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, Michoacán, México, Hidalgo, Puebla, Morelos, Guerrero y Oaxaca.

Yacimientos de cobres: Baja California Sur, Sonora, Chiuhuahua, Coahuila, Nuevo León, - Tamaulipas, Sinaloa, Durango, - Zacatecas, Aguascalientes, Nayarit, Jalisco, Colima, Guanajuato, San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo, Veracruz, Puebla, Morelos, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

Fuentes Artificiales

Las fuentes artificiales de contaminación del agua -- por metales pesados son originadas como resultado de las actividades del hombre, entre las que se pueden mencionar:

- Las diferentes actividades industriales de producción de bienes.
- Las distintas actividades cotidianas que involucran los usos múltiples del agua, las -

relacionadas con el uso de vehículos automotores para su desplazamiento y las relacionadas con la producción de desechos sólidos, etc.

A continuación se mencionan los mecanismos, por medio de los cuales, los contaminantes llegan a los cuerpos de agua.

1. Proceso Industrial.

El proceso industrial genera tres tipos de residuos: líquidos, sólidos y gaseosos.

Los sectores industriales de acabados metálicos, alimentos enlatados, azúcar, bebidas no alcohólicas, cerveza, curtiduría, celulosa y papel, hierro y acero, minería metálica, petróleo, química y textil, utilizan en sus procesos, cantidades considerables de agua y después de ser utilizada es desechada conteniendo metales pesados.

Si a los residuos líquidos industriales no se les aplica un tratamiento biológico o físicoquímico etc. y son descargados directamente a los cuerpos de agua, su contaminación es directa y representa un punto de entrada bien definido al sistema de transporte.

Los residuos líquidos industriales pueden recibir un tratamiento con el fin de remover las sustancias con-

taminantes antes de ser arrojadas a los cuerpos de agua.

Entre los sistemas de tratamiento están los biológicos como el proceso de lodos activados, lagunas aeradas, cilindros biológicos rotatorios, etc., y los tratamientos físicoquímicos como filtración, flotación, adsorción, precipitación, oxidación, tratamiento electroquímico, etc. Dependiendo del tipo de desecho líquido existen combinaciones de los sistemas de tratamiento biológico y físicoquímico.

Al tratar los residuos líquidos industriales se producen 2 corrientes.

- A. El efluente del sistema de tratamiento con una menor cantidad de contaminantes que se dispone en los cuerpos de agua y
 - B. La producción de "lodos", con características variables, según el sistema de tratamiento usado (biológico o físicoquímico, etc, siendo factible considerarlos como residuos sólidos.
2. Los residuos sólidos industriales se generan por el-

uso de materia prima relacionado con el proceso utilizado para la obtención de productos terminados.

A los residuos sólidos industriales se les aplica tratamiento dependiendo del tipo de desecho generado. Entre los cuales se tiene, la oxidación, reducción, tratamiento térmico, acondicionamiento, sistemas de recuperación, digestión aerobia y anaerobia, etc.

Los residuos sólidos industriales que no reciben tratamiento junto con los que si reciben son dispuestos de acuerdo a sus características. Existen varios métodos de disposición de residuos sólidos. Por la acción de agentes externos, en la mayoría de los casos, una proporción de los metales pesados contenidos en ellos, llegan al cuerpo de agua. Entre éstos se tiene:

- A. Disposición directa al cuerpo de agua.

- B. Disposición del residuo a cielo abierto y como relleno sanitario, aunado al efecto de lluvia, se forman dos clases de corrientes contaminadas (lixiviados) - por metales pesados, una superficial que llega al cuerpo de agua y la otra subterránea que se filtra a través del residuo, alcanzando a los acuíferos.

Los residuos sólidos tratados que se utilizan como fertilizantes o acondicionadores de tierra provienen principalmente del tratamiento de residuos líquidos domésticos (lodos) y al llover, se forman corrientes superficiales contaminadas por metales pesados que llegan a los cuerpos de agua.

Si los residuos sólidos tratados y no tratados que contienen metales pesados son incinerados, éstos son emitidos a la atmósfera, considerándose como residuos de combustión.

3. Los residuos de combustión son producidos por aquellos sectores industriales que usan como materia prima sustancias combustibles.

Los metales pesados presentes en la atmósfera provienen tanto de la incineración de los residuos sólidos como del uso de materia prima combustible por los sectores industriales, siguen los mismos mecanismos por medio del cual llegan a los cuerpos de agua y son:

- A. Algunas partículas que contienen metales pesados son depositadas en la tierra y otras, en determinadas cir_

cunstancias, son transportadas por el viento a los cuerpos de agua.

- B. Por efecto de la lluvia son atrapados los metales pesados presentes en la atmósfera, formando corrientes superficiales contaminadas y que a su vez disuelven o arrastran los metales pesados depositadas en la tierra (suelo, calles, etc.) en su trayectoria hacia los cuerpos de agua y cuando los sistemas de colección son combinados, a las plantas de tratamiento de residuos líquidos.

II. Centros de población.

Los centros de población generan dos tipos de residuos: líquidos y sólidos

1. El hombre utiliza el agua en diferentes formas al satisfacer sus necesidades, entre ellas, la ingestión directa, preparación de alimentos y la higiene física y, que después de usarla, es desechada.

Si los residuos líquidos domésticos no reciben tratamiento y son descargados directamente a los cuerpos de agua su contaminación es directa a la vez que son una fuente de sólidos suspendidos que juegan un papel importante en el proceso de adsorción de metales pesados.

Entre los sistemas de tratamiento están, los biológicos, como el proceso de lodos activados, zanjas de oxidación, filtros rociadores, estabilización por contacto, cilindros rotatorios biológicos, etc., y los tratamientos físicoquímicos como filtración, precipitación, oxidación química, flotación, desorción, adsorción, etc.

Al ser tratados los residuos líquidos domésticos se producen dos corrientes.

- A. El efluente del sistema de tratamiento que es descargado al cuerpo de agua y
 - B. La producción de "lodos" con características variables, de acuerdo al sistema de tratamiento aplicado (biológico o físicoquímico). Estos "lodos" son considerados como residuos sólidos.
2. Los residuos sólidos domésticos son generados por el consumo de productos elaborados que son necesarios en la vida del hombre como los alimenticios y los necesarios para el mantenimiento de la vivienda.

Los tipos de tratamiento que se aplican a los residuos sólidos domésticos depende de las características del residuo, entre ellos se tiene, composteo, tratamiento térmico, oxidación, acondicionamiento para posterior disposición y en el caso particular de los-

lodos provenientes de la planta de tratamiento de los residuos líquidos se tienen además: digestión aerobia, digestión anaerobia, filtración al vacío, filtración-prensa, secado térmico, oxidación húmeda, etc.

Tanto los residuos sólidos domésticos que reciben tratamiento como los que no se tratan son dispuestos según sus características. El mecanismo que siguen estos residuos está descrito en el punto I-2-b.

III. Transporte urbano.

El transporte urbano genera un tipo de residuo:

1. Gaseoso.

El hombre, al utilizar unidades automotrices para su desplazamiento en la ciudad, emite residuos de combustión que contienen sustancias nocivas tales como metales pesados.

Aquellas partículas con metales pesados que se emiten hacia la atmósfera y las que se depositan en las calles y que provienen de las unidades automotrices que utiliza el hombre para su desplazamiento y siguen mecanismos similares a los descritos en el punto I-3-b,

- A. Al llover, el agua "atrapa" partículas con metales pesados presentes en la atmósfera, formándose corrientes superficiales contaminadas y disolviendo o arrastrando a los metales pesados depositados en las calles. Estas corrientes superficiales son recolectadas en el sistema de alcantarillado y llegan a la planta de tratamiento de residuos líquidos domésticos.
- B. Por efecto del viento las partículas con metales pesados son transportados de la ciudad hacia el campo y al llover son disueltos o arrastrados por las corrientes superficiales formadas, conduciéndolas hasta el cuerpo de agua.

Sectores Industriales Contaminantes.

El sector industrial de Acabados Metálicos.

La industria de acabados metálicos es de importancia básica ya que su área de influencia comprende a la mayor parte de las industrias que utilizan el metal para sus operaciones productivas, el principal proceso involucrado es el revestimiento de metales, con la finalidad de proteger a la pieza de corrosión o para mejorar sus propiedades.

Los procedimientos más importantes para llevar a cabo

un recubrimiento metálico son:

a) Depósito electrolítico y

b) Inmersión en caliente. *de este*

Los establecimientos relacionados con la industria -- de acabados metálicos se encuentran concentrados en -- el Distrito Federal (66%), Jalisco, Nuevo León y el -- Estado de México (20%); Baja California y Veracruz -- (5%).

2. El sector de la Industria Alimenticia es uno de los -- sectores más importantes del país. El objetivo de la -- elaboración de los productos alimenticios es conser-- var alimentos y preparar productos alimenticios de di -- versas clases. Los procesos seleccionados por su im-- portancia en cuanto a usos del agua son: elaboración -- de legumbres enlatadas, preparación de mermelada, en -- latado de frutas, de productos de tomate y de chile.

Las empresas de este sector están localizadas princi-- palmente en el Distrito Federal, Guanajuato, Edo. de -- México, Michoacán y Sinaloa.

De los once metales pesados que aporta el sector - - (plomo, cobre, zinc, manganeso, níquel, boro, bario, -- cadmio, selenio, fierro y cromo VI), solo se estudió -- el fierro debido principalmente a la insuficiencia de

datos de los elementos restantes.

La aportación de contaminantes en el Distrito Federal es de 26.3% del total sectorial, le sigue Guanajuato con 25.1%, Edo. de México con 11.9%, Michoacán con 10.4% y Sinaloa con 8.6%.

3. El Sector de la Industria Azucarera.

Actualmente el sector de la industria azucarera es uno de los sectores cuya producción permite al país ser autosuficiente, dando margen para la exportación.

Los principales centros de producción azucarera se localizan por orden decreciente de producción, en Veracruz, Jalisco, Sinaloa, Tamaulipas, Morelos y Oaxaca.

La mayor aportación estatal de contaminantes la arroja Veracruz con 1942 toneladas por año de fierro y 122 toneladas por año de zinc. La aportación de contaminantes correspondientes a las entidades de Veracruz, Jalisco, Sinaloa, Tamaulipas, Morelos y Oaxaca constituye el 80% del total.

Las entidades afectadas por metales pesados son Vera-

cruz con 40% de la aportación total sectorial, Jalisco con 12%, Sinaloa con 12%, Tamaulipas con 8%, Morelos con 6.5% y Oaxaca con 5%.

4. El sector Industrial de Celulosa y Papel.

La industria de la celulosa y papel ha mostrado tendencias de crecimiento constantes en los últimos 10 años, excepto en 1971. La tasa de crecimiento medio anual en la producción para éste período fué de 7.8%.

La capacidad de producción es insuficiente para satisfacer las demandas del mercado nacional. La producción solo cubre el 80% del consumo aparente lo demás se importa.

La mayor aportación estatal de fierro del sector se localiza en el Estado de México, con 166 toneladas por año.

Las aportaciones de fierro del Estado de México, Distrito Federal, Nuevo León, Jalisco, Chihuahua, Veracruz y Oaxaca constituye el 96% del total sectorial.

De los ocho metales pesados que se encontró aporta el sector (plomo, cobre, zinc, fierro, manganeso, níquel,

²₀
cromo VI y mercurio) solo se estudió el fierro. La información de los 7 restantes es insuficiente para cuantificar el problema que ocasionan. La aportación de contaminantes del Estado de México es de 44% del total aportado por el sector, le sigue el Distrito Federal con 15%, Nuevo León con 9%, Jalisco con 8%, Chihuahua con 8%, Veracruz con 7% y Oaxaca con 6%.

5. El sector Industrial de la Curtiduría.

El objetivo principal de la industria de la curtiduría es convertir la piel del animal en un producto final que tiene diversos usos, de tipo industrial, domésticos, etc.

La mayor parte de las pieles utilizadas por el sector son de producción nacional así como el 100% de las empresas son del tipo de iniciativa privada.

La industria de la curtiduría se puede caracterizar de acuerdo con tres operaciones básicas que son: de pi lado, curtido y acabado.

El volúmen de producción se concentra en el Distrito Federal, Guanajuato, Jalisco y Nuevo León.

La mayor aportación del cromo III y su distribución estatal corresponde a las empresas ubicadas en el Distrito Federal con 12.9 ton/año, le sigue las del estado de Guanajuato con 8.2 ton/año.

La de contaminantes en el Distrito Federal, Guanajuato, Jalisco, Nuevo León corresponde al 86% del total sectorial.

De los dos metales pesados que se encontró aporta el sector (cromo III y fierro) solo se estudió el cromo III. El fierro no se estudió, debido a la insuficiencia de información.

La aportación de cromo III en el Distrito Federal es de 38% del total sectorial, le sigue Guanajuato con 24%, Jalisco con 16% y Nuevo León con 3%.

6. Sector de la Industria del Acero y Hierro.

El sector de la industria siderúrgica es uno de los sectores industriales, que al mantenerse una tasa media de crecimiento dentro de 25 años la producción aumentará un 250%.

Las mayores aportaciones estatales de fierro corresponden a Coahuila con 135 ton/año y a Nuevo León con 109 ton/año.

Las principales fuentes de aportación de contaminantes del sector son cinco empresas y que se encuentran en 4 entidades contribuyendo con el 88% de la aportación total sectorial. La concentración promedio de descarga de fierro es de 5 mg/l.

De los 8 metales pesados que se encontró que aporta al sector (cromo VI, plomo, cobre, zinc, manganeso, níquel, fierro y boro), solo se estudió al fierro, debido principalmente a la insuficiencia de datos.

La aportación de fierro en el Estado de Coahuila corresponde al 40% del total sectorial le sigue Nuevo León con 33%, Veracruz con 8% y Puebla con 7%.

El sector de la Industria Minera Metálica.

Tanto la industria extractiva como la de transformación que son básicas para el desarrollo económico de las naciones, fincan la mayor parte de su importancia en la materia prima mineral.

México cuenta por ahora con suficiente materia prima mineral y energía para su industria en la etapa actual de desarrollo. El país dispone de ampliar reservas potenciales de minerales y combustibles para mantener un incremento -

en su producción industrial compatible con el crecimiento demográfico.

La industria minero metálica se encuentra distribuida en todo el país, los principales centros de producción son - Chihuahua, Colima, Jalisco y Coahuila.

Las mayores aportaciones del sector corresponden al estado de Chihuahua con 1.86 ton/año de fierro, 1318 ton/año de plomo y 1.85 ton/año de zinc.

La aportación de fierro en las entidades de Chihuahua, Colima, Jalisco y Coahuila constituye el 95% del total sectorial y la aportación de plomo en Chihuahua, Jalisco, -- Coahuila e Hidalgo constituyen el 89% del total sectorial. La aportación de zinc en los estados de Chihuahua, Coahuila, Hidalgo y Durango constituye el 90% del total sectorial. Las concentraciones promedio son de 1.0 mg/l, - - - 704 mg/l, 1.0 mg/l para el fierro, plomo y zinc respectivamente.

De los 13 metales pesados que aporta el sector (cobre, manganeso, níquel, boro, cadmio, selenio, cromo, plata, mercurio, cianuro, fierro, zinc y plomo), solo se estudiaron - fierro plomo y zinc, los 10 restantes no se estudiaron debido a la insuficiencia de información.

La aportación de fierro en el Estado de Chihuahua es de un 37% del total sectorial, le sigue Colima con 27%, Jalisco con 23% y Coahuila con 9%. La aportación de plomo en el Estado de Chihuahua es de 44%, le sigue Jalisco con 28% Coahuila con 11% e Hidalgo con 6%. La aportación de zinc en el Estado de Chihuahua es de un 62%, le sigue Coahuila con 15%, Hidalgo con 8% y Durango con 5%

6. El sector de la Industria del Petróleo.

La industria del petróleo se ha caracterizado a últimas fechas por lo prometedor de su futuro, el hallazgo de nuevos mantos petrolíferos en el sureste del país, la coloca en una posición envidiable dentro de los mercados internacionales de combustibles.

La capacidad de refinación de crudo instalada se ha desarrollado paralelamente al avance del país. En años recientes entraron en operación tres refinerías, entre ellas, la más grande de América Latina, en Tula, Hgo.

La industria petrolera nacional cuenta con 6 centros de refinación, 2 en el Estado de Veracruz, 2 en Tamaulipas, 1 en Guanajuato y 1 en el Distrito Federal.

De los 13 metales pesados que aporta el sector (cobre, zinc, fierro, manganeso, níquel, cromo VI, cianuro, plomo,

boro, bario, cadmio, arsénico y plata), solo se estudiaron 6 que son: cobre, zinc, fierro, manganeso, níquel y cromo VI. Los 7 restantes no se estudiaron debido a la insuficiencia de datos.

La aportación de contaminante en el Estado de Veracruz es de un 31% del total sectorial, le sigue Tamaulipas con 29%, Guanajuato con 24% y el Distrito Federal con 16%.

9. El sector de la Industria Química.

La industria química, ha sido considerada como uno de los sectores aceleradores de la economía al registrar tradicionalmente tasas de crecimiento superiores a cualquier otra industria.

La aportación de contaminantes en el Distrito Federal y área de influencia del Estado de México; San Luis Potosí, Veracruz, Guanajuato, Tamaulipas, Coahuila y Nuevo León constituyen el 93% de la aportación total del sector en el país.

Los 13 metales pesados que aporta el sector son (cromo VI, zinc, fierro, plomo, cadmio, plata, boro, cobre, mercurio, manganeso, selenio, níquel y bario).

La aportación de contaminantes en la zona de San Luis Potosí, Guanajuato y Veracruz es de un 61%, le sigue el Dis

| SECTOR INDUSTRIAL | Pb, mg/L | | | Cu, mg/L | | | Zn, mg/L | | | Fe, mg/L | | |
|-------------------|----------|-------|--------|----------|-------|--------|----------|--------|--------|----------|-------|--------|
| | Min. | Max. | Prom. | Min. | Max. | Prom. | Min. | Max. | Prom. | Min. | Max. | Prom. |
| Acabados Metales. | 0.0002 | 20.5 | 1.130 | 0.010 | 1.010 | 59.014 | 0.010 | 400 | 28.910 | 0.010 | 29.40 | 3.569 |
| Alimentos | 0.03 | 67.38 | 12.17 | 0.001 | 1000 | 166.8 | 0.0001 | 11.75 | 2.07 | 0.01 | 6.12 | 1.58 |
| Azucarero | | | | 0.130 | 3.100 | 1.175 | 0.023 | 14.800 | 3.614 | 0.160 | 180 | 13.370 |
| Celulosa y Papel | | | | | | | 0.30 | 93.03 | 27.49 | 0.01 | 410 | 35.6 |
| Curtiduria | | | | | | | | | | 23.6 | 23.6 | 23.6 |
| Hierro y Acero | 0.010 | 2.120 | 0.439 | 0.250 | 0.310 | 0.280 | | | | 0.030 | 1583 | 99.867 |
| Minero Metalico | 0.026 | 423 | 19.97 | | | | 0.06 | 70.6 | 7.96 | 0.07 | 80.0 | 6.14 |
| Petrolero | 0.028 | 0.029 | 0.0289 | 0.0079 | 2.55 | 0.546 | 0.0386 | 0.47 | 0.1497 | 0.0302 | 2.799 | 1.052 |
| Quimico | 0.002 | 77.0 | 3.06 | 0.01 | 542.0 | 17.38 | 0.01 | 67.0 | 5.845 | 0.028 | 1500 | 77.96 |
| Textil | 0.18 | 0.20 | 0.19 | 0.01 | 1.20 | 0.37 | 0.06 | 1.13 | 0.51 | 0.06 | 8.00 | 0.81 |

TABLA 1

CONCENTRACIONES MINIMA, MAXIMA Y PROMEDIO DE METALES PESADOS, CIANURO Y ARSENICO EN LAS DESCARGAS DE 10 SECTORES INDUSTRIALES, SEGUN INFORMACION RECABADA DEL REGISTRO DE DESCARGAS EN LA S.A.R.H.

trito Federal y su área de influencia del Estado de México con 17% y Tamaulipas, Coahuila y Nuevo León con 14%.

10. El sector de la Industria Textil.

Este sector industrial está en constante evolución, día a día surgen nuevos productos químicos, procesos, maquinarias y técnicas ya que la demanda del consumidor varía con respecto al tipo de tela, color, etc.

De los metales pesados que se encontró aporta el sector (cobre, cromo VI, zinc, boro, manganeso, bario, cadmio, níquel, fierro y plomo), solo se estudió el fierro, los 9 restantes no se estudiaron debido a la insuficiencia de datos.

La aportación de fierro en el Estado de Puebla corresponde a un 27% del total sectorial, le sigue Veracruz y Morelos con 16%, Estado de México con 15%, Distrito Federal con 12%, Jalisco con 5%, Coahuila con 5%, Hidalgo con 5% y Guanajuato con 5%.

Obtención de la Información.

La información se obtuvo del Registro de Descargas de la S.A.R.H. en el Departamento de Normas y Vigilancia de la Dirección General Protección y Ordenación Ecológica.

En la tabla I se encuentran las concentraciones máxima y mínima de metales pesados en las descargas de 10 sectores industriales.

De los 15 contaminantes se seleccionaron solamente 9 metales pesados tomando en cuenta su grado de mayor toxicidad y son: Hg, Cu, Zn, Pb, Fe, Ni, Cd, Cr y As.

III Comportamiento de los contaminantes.

Transporte.

Conceptuación.

La elaboración de un modelo conceptual del sistema de transporte, involucra el conocimiento tanto de los diferentes mecanismos por los cuales el elemento traza logra su acceso al agua, como de los que provocan su remoción o transformación por procesos físico-químicos, biológicos, hidráulicos, etc.

En el modelo que se presenta se considera la factibilidad técnica y la metodología necesaria para su implementación matemática (especificación) y calibración con fines predictivos.

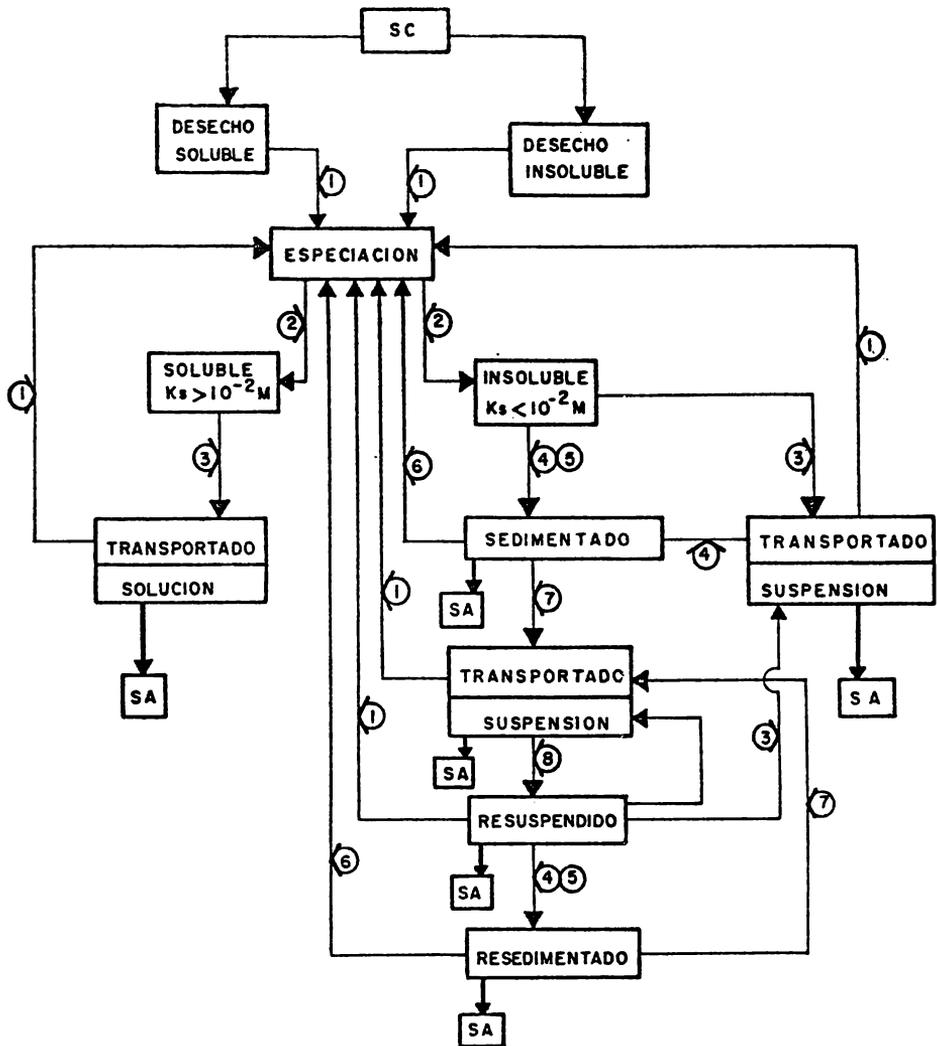
Partiendo de las respuestas del modelo conceptual del sistema contaminante, se tendrán tres fuentes de contaminación.

- a) líquidas, provenientes de los desechos líquidos industria--
les y municipales y los producidos por la disolución de los
yacimientos minerales localizados a lo largo del cauce o -
dentro de la zona de inundación del cuerpo receptor.

- u) sólidos, provenientes de los desechos sólidos de la indus--
tria y los productos de tratamiento de las aguas residuales
domésticas (lodos activados, p. ej.) que al disponerse en -
rellenos sanitarios, por efecto de lluvia, las corrientes -
superficiales y subterráneas infiltradas a través de estos -
rellenos, arrastran cantidades considerables de metales - -
traza.

- c) Atmosféricos - partículas y gases productos de la combus--
tión de ciertos materiales (carbón, gasolina, diesel, etc.)
en los procesos industriales y de vehículos automotores, -
que al escapar por los dispositivos de desalojo de gases, -
en contacto con el agua de lluvia son arrastrados a los - -
cuerpos de agua. Otra forma de acceso es la sedimentación -
de estas partículas que arrastran en su trayectoria, concen--
traciones traza de metales pesados.

En la fig. 1 se muestra el modelo conceptual del sistema de -
transporte. Los mecanismos que intervienen en el desarrollo de
este modelo son, en algunas ocasiones, bastante conocidos y en
otras se requieren trabajos de campo o de laboratorio para su



□ Componente del ST (estado físico químico del compuesto o etapa del proceso de distribución).

○ Mecanismo que provoca una alteración o cambio.

→ Fuente de acceso, puntual o no-puntual, al ST proveniente del sistema contaminante (SC)

→ SA Fuente de acceso al sistema afectado (SA)

Fig 1 Modelo conceptual del sistema de transporte (ST) para metales pesados (MP).

modelación matemática. A continuación se hará una breve descripción de estos mecanismos y en los siguientes incisos se aplicarán estos conceptos para conocer el comportamiento de los metales pesados en estudio:

Partiendo de un desecho líquido, los compuestos de metales pesados por sus propiedades fisicoquímicas pueden estar en forma soluble o insoluble. En contacto con el agua del cuerpo receptor, las propiedades pueden modificarse principalmente por:

1. Valores de las constantes de solubilidad y su variación de pH y potencial redox (E) y afecto de otras especies iónicas; la solubilidad (K_s) del compuesto que está en función del pH, potencial redox (E), potencial redox de referencia (E_0), tiempo de reacción (t) y concentración de otras especies químicas, X_1, \dots, X_n .

El compuesto resultante de esta especiación puede estar en forma soluble o insoluble dependiendo de

2. Cambios en el pH; potencial redox (E); temperatura, (T); propiedades fisicoquímicas, concentración y afectos de antagonis

mo de las especies presentes; espontaneidad y velocidad de las reacciones.

Una forma global de clasificar a los compuestos en solubles e insolubles es mediante el valor de la constante de solubilidad

Si $K_s > 10^{-5}$ M , es soluble

Si $K_s < 10^{-5}$ M , es insoluble

los compuestos solubles serán transportados en la masa de agua y en su distribución espacial y temporal influirán los siguientes factores hidrodinámicos.

3. Movimiento global del agua (flujos de mareas, flujo de agua dulce); efectos de velocidades; efectos de dispersión (efecto combinado de los gradientes de flujo cortante y difusión turbulenta), si en el transcurso del tiempo o si a lo largo del cauce de la corriente se presentan cambios en sus características físicoquímicas, se producirán cambios en el compuesto-transportado dando lugar a una especiación del compuesto, estos cambios FQ dados en 2.

Los compuestos insolubles son aquellos cuya constante de solubilidad es aproximadamente 10^{-5} M. Pertenecen a esta clasificación las formas particulares de los compuestos de desecho o producto de la especiación. Su remoción de la fase sólida por el proceso de la sedimentación está gobernada por los factores siguientes.

4. Velocidad a la cual un elemento es transformado a una forma insoluble y sedimentable; precipitación, coprecipitación, intercambio iónico, actividad biológica, tamaño de partícula, adsorción y absorción del material por otras partículas en suspensión, densidad y viscosidad de las partículas y del medio líquido.
5. Tamaño del agregado producto del proceso de floculación que influirá, junto con la densidad, en la velocidad de sedimentación; velocidad global de la corriente; concentración de la masa de sedimentos.

Los compuestos insolubles que no se sedimentan viajarán con la corriente hasta alcanzar su punto de equilibrio o por efectos de cambios FQ descritos por 1 resultarán en la formación de otros compuestos. Los factores que influyen en el transporte de esta suspensión son

6. Procesos de floculación (crecimiento de sistemas coloidales por adherencia de partículas en colisión), y los factores descritos en 3.

En el momento en que a este material en suspensión se le modifican las características FQ e hidráulicas dadas por 4 y 5 respectivamente, se producirá la sedimentación.

El compuesto sedimentado puede sufrir alteraciones en su compo-

sición FQ si las condiciones para tal cambio son las adecuadas, produciéndose un nuevo compuesto, los factores que influyen son:

7. Procesos bioquímicos, velocidad y capacidad de biotransformación por microorganismos en condiciones aeróbicas o anaeróbicas a compuestos órgano metálicos.

El material del lecho del cuerpo receptor, materia sedimentada, por procesos hidráulicos se puede remover y transportar bajo ciertas condiciones como son:

8. Velocidades críticas; fuerzas que actúan sobre la partícula al inicio del movimiento, tipo de partículas del sedimento y tipo de flujo a su alrededor, peso específico del agua y de la partícula; coeficiente de fricción que depende de los gradientes de fondo y de la pendiente de las partículas; tirante de la corriente en la cual se mueve el sedimento; velocidad de la corriente.

Durante el transporte del sedimento, hay una resuspensión del material y junto con él de los compuestos químicos, si se presentan cambios FQ como los descritos por 1, se formarán nuevos com-

puestos. Parte del material resuspendido será transportado por la corriente como suspensión.

8. Velocidades de la corriente

Otra parte del material resuspendido obedecerá las leyes de transporte dadas por 3 y que se refieren principalmente a las partículas de baja densidad y diámetros pequeños.

El material resuspendido, con las características descritas por 4 y 5, resedimentarán y si las condiciones ambientales dadas en 6 se presentan, habrá la formación de nuevos compuestos; en caso contrario se tendrá un transporte de este material según lo anotado en 7.

El Sistema Afectado (SA), tiene sus fuentes de acceso del material soluble y en suspensión arrastrado por la corriente, del sedimentado de la corriente y del producido por el fondo del lecho en el proceso del transporte del sedimento.

La influencia de estos mecanismos en los metales pasados en estudio se detalla en los siguientes incisos.

2. Aspectos Físicoquímicos del Comportamiento de Metales Pesados y sus especies en Aguas Naturales.

La composición química observada en aguas naturales es el resultado de una variedad de reacciones químicas y procesos físicoquímicos. En las aguas naturales se llevan al cabo reacciones ácido-base, procesos gas solución, precipitación y disolución de fases sólidas, reacciones de coordinación de iones metálicos y ligandos, reacciones de óxido-reducción y procesos de adsorción y desorción en las interfases.

El presente análisis teórico utiliza varias relaciones termodinámicas, para la predicción teórica de los fenómenos de precipitación y disolución de las principales especies de metales pesados que son vertidos en las corrientes naturales.

A. Diagramas E - pH (ref. 19)

Los diagramas E-pH son una representación gráfica usada para describir las relaciones de estabilidad de la distribución de varias formas solubles e insolubles de compuestos.

Las relaciones E-pH son las más usadas comunmente, puesto que son las propiedades características más importantes de las - - aguas naturales.

B. Compuestos de Cordinación o Complejos

Los compuestos de cordinación o complejos tienen particular importancia en la química de los elementos de transición, pero de desempeñan también un papel significativo en la química de todos los elementos electropositivos (cationes).

Casi todos los iones metálicos pueden actuar como ácidos de Lewis aceptando pares electrónicos de las bases de Lewis para formar iones complejos. (ref. 1),

Los cationes se pueden clasificar según su habilidad para formar complejos como sigue: (ref. II).

- a) Cationes con configuración de gas noble, como son los metales alcalinos y alcalinoterreos. La tendencia de éstos cationes a formar complejos es muy limitada y sólo se ligan fuertemente con el agua, por lo cual los iones en solución acuosa se encuentran fuertemente hidratados.

- b) Cationes con subcapas "d" completas (18 $^-$). En este grupo se tienen los cationes Cu, Ag, Au, así como Zn^{2+} , Cd^{2+} , y Hg^{2+} . Estos cationes forman complejos compartiendo un par de electrones con el ligando y los complejos son más estables cuando más noble es el elemento.
- c) Metales de transición con subcapas incompletas. En este grupo se tienen los cationes Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} . La tendencia a formar complejos es resultado de la atracción electrostática así como de la cesión de un par de electrones y depende de la carga del ión, de su tamaño y potencial de ionización del elemento. (ref. II).

También los ligandos pueden ser clasificados de acuerdo a su capacidad para provocar la separación de los orbitales d. (ref.4).

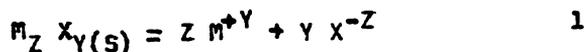
C. Comportamiento de Metales Pesados en condiciones anaeróbicas.

Los primeros investigadores condujeron a 3 importantes observaciones sobre los efectos de cationes en procesos anaeróbicos: toxicidad, estimulación y antagonismo. En general los cationes pueden producir toxicidad en un organismo a cierto nivel, siendo -

tes más importantes en el sistema como son carbonatos, sulfatos y cloruros, que pueden alterar el comportamiento de las especies a concentraciones elevadas, se implementó una ecuación que nos proporciona una serie de datos teóricos para observar el comportamiento de las especies químicas más importantes de los metales pesados que se presentan en el sistema acuático (tales, como carbonatos, sulfatos, sulfuros, cloruros, etc.) a diferentes condiciones de pH, E (potencial) y concentraciones de CO_3 , SO_4 y Cl^- .

Aspectos Teóricos

Sea el sistema reaccionante:



La constante de equilibrio de la reacción es igual al producto de solubilidad K_S :

$$(M^{+Y})^Z (X^{-Z}) = K_S \quad 2$$

$$(Z S)^Z (Y S)^Y = K_S \quad 3$$

$$S = \frac{K_S}{Z^Z Y^Y} \quad 4$$

donde S, solubilidad (concentración de saturación)

La ecuación del potencial químico de Nerst es

$$E = E^{\circ} + \frac{0.06}{n} \log KS \quad 5$$

donde

E, potencial químico

E°, potencial estándar

Calculando KS y tomando en cuenta que la influencia del pH y el efecto salino modifican los valores de solubilidad, la formación de compuestos con: Cl^{-} , SO_4^{-2} y CO_3^{-2} pueden retardar la precipitación del material insoluble (ref. 5), tomando en cuenta tales aniones en forma de p CO_3 , p Cl y p CO_3 , se tiene que:

$$E = E^{\circ} - \frac{0.06}{n} \log K_S - 0.06 \text{ pH} - 0.06 \text{ pCl} - 0.06 \text{ pSO}_4 - 0.06 \text{ pCO}_3 \quad 6$$

de donde:

$$K_S = \text{Antilog} \left[\frac{E - E^{\circ} (n)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right] \quad 7$$

Con K_S así calculada y sustituyéndola en la ecuación 4, la ecuación final es de la forma:

$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{E - E^{\circ} (n)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right)}{Z^Z \cdot Y^Y} \right]^{1/Z+Y} \quad 8$$

donde:

E potencial químico

E° potencial estándar

n número de electrones involucrados

$$pH = -\log a_H$$

$$pCl = -\log a_{Cl^-}$$

$$pCO_3 = -\log a_{CO_3}$$

$$pSO_4 = -\log a_{SO_4}$$

Los valores de E° (potencial estándar) fueron tomadas de referencias bibliográficas (12 y 16), considerando sus energías libres de formación, para E se estableció un rango de valores más comunes que se presentan en aguas naturales, para pH se procedió de-

igual forma tomándose valores de 6 a 10, los valores de pCl , pCO_3 y pSO_4 fueron los valores promedios obtenidos de la red nacional de monitoreo (ref. 6), como concentraciones representativas encontradas en ríos, siendo:

río: pCl 2.68 , pCO_3 3.74 , pSO_4 2.34

De los valores de solubilidad calculados teóricamente con la ecuación, deben tomarse en cuenta solo los valores menores a 10^{-1} , ya que la ecuación se cumple solo para soluciones diluidas. Los valores mayores de $n \times 10^{-1}$ solo pueden dar un criterio de un aumento de solubilidad, pero sin tomar en cuenta las posibles concentraciones de saturación.

Las aproximaciones requeridas por la teoría, limitan su validez solo a soluciones diluidas. En la práctica las desviaciones respecto a la ley límite se hacen notorias en el rango de concentraciones de 0.005 a 0.01 molar. Se han desarrollado ecuaciones más precisas que extienden la teoría a concentraciones un poco más altas. Sin embargo, hasta el momento no hay ninguna ecuación teórica satisfactoria que pueda predecir el comportamiento en soluciones de concentraciones mayores a 0.01 M (ref. 3).

La solubilidad de rocas, minerales y sales inorgánicas en aguas naturales depende del radio iónico, valencia, polarización, tipo de enlaces químicos y de otras propiedades de los elementos involucrados.

Sin embargo la solubilidad esta estrechamente controlada por factores externos, tales como la temperatura, presión, concentración, efecto salino, potencial y pH de las aguas (ref.20).

Disolución y Precipitación (ref. 24).

Los minerales y compuestos de metales pesados que se disuelven o reaccionan con el agua, bajo diferentes condiciones fisicoquímicas, son precipitados y acumulados en el fondo de océanos, ríos y lagos. Las reacciones de disolución y precipitación aportan al agua constituyentes que modifican las propiedades químicas del sistema.

Las reacciones de disolución o precipitación son generalmente reacciones más lentas que las reacciones entre especies disueltas, pero es difícil generalizar sobre el grado de precipitación

y disolución. Hay una falta de datos importantes geoquímicamente con respecto a estos procesos, sólido-solución.

Frecuentemente la fase sólida formada incipientemente es meta estable con respecto a una fase sólida más estable termodinámicamente.

Principio de retardación de Reacción (ref. 20).

En sistemas naturales, las proporciones estequiométricas exactas de reactivos son raras. Generalmente hay un exceso o una deficiencia de alguno de los reactivos. Tal desequilibrio es debido en gran parte a la diferencia de abundancia y a las diferentes solubilidades de estas especies. Por lo tanto, el problema de concentración de reactivo es de suma importancia en la precipitación y disolución de los compuestos.

Como especifica la ley de acción de masas, un proceso puede rendir diferentes resultados dependiendo de las concentraciones iniciales de las sustancias reaccionantes. Dos casos generales son:

A. El reactivo dado está en exceso en relación a las cantidades de otros reactivos, siendo allí más que suficiente según para una posible reacción.

B. El reactivo dado está en cantidad insuficiente.

En vista de la composición iónica del agua natural, se pueden - distinguir 2 tipos de deficiencias iónicas, una deficiencia de aniones y otra de cationes, la primera es particularmente común, el contenido de PO_4^{3-} , VO_4^{3-} , AsO_4^{3-} y otros aniones se encuentran en menor cantidad que el correspondiente número de cationes - - aprovechables para la formación de compuestos insolubles. La diferencia catiónica es encontrada ocasionalmente en ciertos me- - dios ambientales.

Por estas deficiencias, no todas las reacciones teóricamente posibles pueden llevarse al cabo realmente.

La precipitación en el medio ambiente está caracterizada por - agua conteniendo una concentración activa de aniones tales como S^{2-} , PO_4^{3-} o algunos otros aniones con los que puedan formarse compuestos insolubles con los cationes a la vez que el agua lleva en solución los cationes Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , etc.

Las solubilidades de las diferentes sustancias varían dentro de amplios límites, la siguiente relación indica la solubilidad en agua de los compuestos inorgánicos comunes (ref.1).

- a. Los nitratos, nitritos, cloratos y acetatos son solubles; el nitrito de plata es relativamente poco soluble.

- b. Los óxidos e hidróxidos metálicos son insolubles, excepto - los de metales alcalinos(sodio, potasio y también amonio) y el de bario; los óxidos e hidróxidos de estroncio y calcio - son relativamente poco solubles.

- c. Los sulfuros son insolubles, excepto los alcalinos, alcali-
notérreos (calcio, estroncio, bario) y magnésico.

- d. Los cloruros, bromuros y yoduros son solubles, excepto los -
de plata, mercurio (I) y plomo; el yoduro de mercurio (II) -
es también insoluble.

- e. Los fluoruros son insolubles, excepto los alcalinos y los de
plata, bismuto, hierro (III) y estaño.

- f. Los sulfatos son solubles excepto los de plomo, bario y es--
troncio, los sulfatos de calcio y plata son relativamente po
co solubles.

- g. Los cromatos son insolubles excepto los alcalinos y los de -
calcio, magnesio y zinc.

TABLA 2 SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS METALICOS

| Cation | CO_3^{2-} | | S^{2-} | | SO_4^{2-} | | Cl^- | | PO_4^{3-} | |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | 10^{-4} moles/litro | $6 \cdot 10^{-3}$ g/litro | 10^{-10} moles/litro | $3.2 \cdot 10^{-9}$ g/litro | 10^{-2} moles/litro | $9.6 \cdot 10^{-1}$ g/litro | 10 moles/litro | 3.5 g/litro | 10^{-9} moles/litro | $9.5 \cdot 10^{-7}$ g/litro |
| Ag ⁺ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3.21 \cdot 10^{-2}$ | $7 \cdot 10^{-21}$ | $7.5 \cdot 10^{-19}$ | $3 \cdot 10^{-2}$ | 3.21 | $2.8 \cdot 10^{-9}$ | $2.9 \cdot 10^{-7}$ | — | — |
| Cu ⁺ | — | — | $3 \cdot 10^{-20}$ | $1.9 \cdot 10^{-18}$ | — | — | $1.8 \cdot 10^{-7}$ | $1.8 \cdot 10^{-5}$ | — | — |
| Tl ⁺ | — | — | $1.1 \cdot 10^{-7}$ | $2.2 \cdot 10^{-5}$ | — | — | $1.9 \cdot 10^{-3}$ | $3.9 \cdot 10^{-1}$ | — | — |
| BIO ⁺ | — | — | $1.3 \cdot 10^{-21}$ | $2.9 \cdot 10^{-19}$ | — | — | — | — | — | — |
| Cu ²⁺ | $2.5 \cdot 10^{-6}$ | $1.6 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-27}$ | $5 \cdot 10^{-25}$ | — | — | — | — | — | — |
| Be ²⁺ | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Ca ²⁺ | $4.8 \cdot 10^{-5}$ | $1.9 \cdot 10^{-3}$ | — | — | — | — | — | — | $2 \cdot 10^{-5}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ |
| Zn ²⁺ | $6.0 \cdot 10^{-7}$ | $3.9 \cdot 10^{-5}$ | $4.5 \cdot 10^{-14}$ | $2.9 \cdot 10^{-12}$ | — | — | — | — | — | — |
| Sr ²⁺ | $7 \cdot 10^{-6}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | — | — | $7.6 \cdot 10^{-5}$ | $6.6 \cdot 10^{-3}$ | — | — | $5 \cdot 10^{-5}$ | $4.3 \cdot 10^{-3}$ |
| Cd ²⁺ | $5.2 \cdot 10^{-8}$ | $5.8 \cdot 10^{-6}$ | $1.0 \cdot 10^{-18}$ | $1.1 \cdot 10^{-16}$ | — | — | — | — | — | — |
| Ba ²⁺ | $1.6 \cdot 10^{-5}$ | $2.2 \cdot 10^{-3}$ | — | — | $1 \cdot 10^{-8}$ | $1.4 \cdot 10^{-6}$ | — | — | $2 \cdot 10^{-7}$ | $2.7 \cdot 10^{-5}$ |
| Hg ²⁺ | — | — | $1.6 \cdot 10^{-44}$ | $3.2 \cdot 10^{-42}$ | — | — | — | — | — | — |
| Hg ₂ ²⁺ | $9 \cdot 10^{-13}$ | $3.6 \cdot 10^{-10}$ | $1 \cdot 10^{-25}$ | $4 \cdot 10^{-23}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-2}$ | $1.1 \cdot 10^{-16}$ | $4.4 \cdot 10^{-14}$ | — | — |
| Sn ²⁺ | $1 \cdot 10^{-16}$ | $1.2 \cdot 10^{-14}$ | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Pb ²⁺ | $1.5 \cdot 10^{-9}$ | $3.1 \cdot 10^{-7}$ | $7 \cdot 10^{-19}$ | $1.4 \cdot 10^{-16}$ | $1.3 \cdot 10^{-6}$ | $2.7 \cdot 10^{-4}$ | — | — | $1 \cdot 10^{-12}$ | $2 \cdot 10^{-10}$ |
| Fe ²⁺ | $2.1 \cdot 10^{-7}$ | $1.2 \cdot 10^{-5}$ | $4 \cdot 10^{-9}$ | $2.2 \cdot 10^{-7}$ | — | — | — | — | — | — |
| Co ²⁺ | $8 \cdot 10^{-9}$ | $4.7 \cdot 10^{-7}$ | $5 \cdot 10^{-12}$ | $2.9 \cdot 10^{-10}$ | — | — | — | — | — | — |
| Ni ²⁺ | $1.4 \cdot 10^{-3}$ | $8.1 \cdot 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-11}$ | $1.7 \cdot 10^{-9}$ | — | — | — | — | — | — |

NOTA: Concentraciones máximas de iones metálicos en moles/litro y g/litro. Todos los datos son para 25°C y 1 ATM.

TABLA 3 SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS QUÍMICOS EN AGUA DESTILADA A 20°C Y 1 ATM (Ref. 30)

| Compuesto | Solubilidad | Compuesto. | Solubilidad. | Compuesto | Solubilidad. |
|--|------------------------|---|------------------------|--|----------------------|
| Facilmente soluble - > 2g/litro | | | | | |
| SbCl ₃ | 9315 | NaCl | 360 | Na ₂ SO ₄ | 194 |
| ZnCl ₂ | 3680 | BaCl ₂ | 357 | SnSO ₄ | 190 |
| UO ₂ Cl ₂ | 3200 | KCl | 340 | AlK(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O | 114 |
| SnCl ₄ | 2698 (15) | HgCl ₂ | 66 | K ₂ SO ₄ | 111.1 |
| CsCl | 1865 | PbCl ₂ | 9.9 | Ce ₂ (SO ₄) ₃ | 101 |
| CdCl ₂ | 1350 | TlCl | 3.0 | Tl ₂ SO ₄ | 49 |
| FeCl ₂ | 919 | Fe ₂ (SO ₄) ₃ · 9H ₂ O | 4400 | Th(SO ₄) ₂ · 9H ₂ O | 16 |
| RbCl | 912 | Ce ₂ SO ₄ | 1786 | Rb ₂ CO ₃ | 4500 |
| LiCl | 785 | CaSO ₄ | 770 | Cs ₂ CO ₃ | 2607 |
| CuCl ₂ | 745 | MnSO ₄ | 440 | K ₂ CO ₃ | 1117 |
| MnCl ₂ | 740 | ZnSO ₄ | 544 | Na ₂ CO ₃ | 215 |
| CuCl | 730 | BeSO ₄ · 4H ₂ O | 425 | Tl ₂ CO ₃ | 42 |
| AuCl ₃ | 680 | NiSO ₄ | 380 | AgNO ₃ | 2180 |
| FeCl ₃ | 644 | MgSO ₄ | 360 | Na ₂ WO ₄ | 724 |
| NiCl ₂ | 642 | CoSO ₄ | 344 | NaF | 42 |
| MgCl ₂ | 545 | Li ₂ SO ₄ | 342 | Na ₂ B ₄ O ₇ | 26 |
| SrCl ₂ | 530 | FeSO ₄ · 7H ₂ O | 265 | LiF | 3.0 |
| CoCl ₂ | 530 | CuSO ₄ | 207 | | |
| NH ₄ Cl | 375 | | | | |
| Difícilmente soluble - 2 a 0.1 g/litro | | | | | |
| CaSO ₄ | 2.0 | ZnCO ₃ | 0.2 | PbF ₂ | 0.65 |
| Hg ₂ SO ₄ | 0.6 | Fe(HCO ₃) ₂ | 0.43 | Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · 2H ₂ O | 0.2 |
| SrSO ₄ | 0.114 | | | SiO ₂ | 0.16 |
| CaCO ₃ · MgCO ₃ | 0.21 | | | | |
| Muy difícilmente soluble - 0.1 a 0.001 g/lt. | | | | | |
| PbSO ₄ | 0.041 | Mn(OH) ₂ | 1.7 · 10 ⁻² | Al ₂ O ₃ | 1 · 10 ⁻³ |
| BaSO ₄ | 2.3 · 10 ⁻³ | Mg(OH) ₂ | 9 · 10 ⁻³ | AgBr | 1 · 10 ⁻⁴ |
| Hg ₂ Cl ₂ | 2 · 10 ⁻³ | Zn(OH) ₂ | 6.1 · 10 ⁻³ | CeF ₃ | 0.016 |
| AgCl | 1.5 · 10 ⁻³ | Ni(OH) ₂ | 5.6 · 10 ⁻³ | | |
| MnCO ₃ | 0.065 | Co(OH) ₂ | 5.5 · 10 ⁻³ | | |
| Ag ₂ CO ₃ | 0.032 | Al(OH) ₃ | 1 · 10 ⁻³ | | |
| FeCO ₃ | 1-3 · 10 ⁻⁵ | Fe(OH) ₂ | 7.5 · 10 ⁻⁴ | | |
| BaCO ₃ | 0.022 | Fe(OH) ₃ | 5 · 10 ⁻⁴ | | |
| CaCO ₃ | 1.6 · 10 ⁻² | MgO | 6.2 · 10 ⁻³ | | |
| PbCO ₃ | 1.1 · 10 ⁻³ | HgO | 0.05 | | |
| SrCO ₃ | 0.011 | ZnO | 1.6 · 10 ⁻³ | | |
| Prácticamente Insoluble - menos de 0.0001 g/lt. | | | | | |
| FeS ₂ | — | Ag ₂ S | — | | |
| PbS | — | TiO ₂ | — | | |
| ZnS | — | AgI | 3 · 10 ⁻⁶ | | |
| CuS | — | PbCrO ₄ | 4.3 · 10 ⁻⁵ | | |
| Cu ₂ S | — | Cu | — | | |
| HgS | — | Au | — | | |

h. Los carbonatos, sulfitos, fosfatos, arsenitos, boratos y oxalatos son insolubles, excepto los de metales alcalinos (las sales insolubles de estos aniones son solubles en ácidos).

En las tablas 2, 3 y 4 se muestran las solubilidades de diferentes compuestos metálicos en agua pura y condiciones estándar (ref 26).

Aplicación de conceptos a los metales pesados en estudio.

Mercurio.

Bajo condiciones normales de temperatura y presión que ocurren en aguas de ríos, lagos y aguas saturadas de sedimentos de mercurio puede estar presente en uno o más de sus 3 estados de oxidación. El estado más reducido, es el metal (Hg^0), el cual es un líquido a temperatura ordinaria y tiene tendencia a vaporizar.

Las otras 2 formas son iónica, el más reducido de los 2 iones es el ión mercurioso Hg_2^{2+} , donde la valencia promedio es 1.

En condiciones oxidantes, especialmente a bajo pH, la forma estable es la del ión mercuríco Hg^{+2} . La concentración de

Hg_2^{2+} es alrededor de 166 veces mayor que la de Hg^{2+} , siendo el potencial positivo del paso $2\text{Hg} \rightleftharpoons \text{Hg}_2^{2+}$ más bajo que el del $\text{Hg} \rightleftharpoons \text{Hg}^{2+}$. Entre las sales mercurosas que poseen un alto carácter iónico, y que por lo tanto se disocian en solución acuosa se encuentran el sulfato ($\text{Hg}_2 \text{SO}_4$) y el carbonato ($\text{Hg}_2 \text{CO}_3$) que son poco solubles en agua; el cloruro $\text{Hg}_2 \text{Cl}_2$ que es el más común. El sulfuro mercuroso (Hg S) precipita en medio acuoso como un compuesto negro altamente insoluble. El hidróxido mercuríco ($\text{Hg}(\text{OH})_2$) es una base extremadamente débil y es algo soluble en agua (10^{-3} a 10^{-4} moles/lit) el valor depende del tamaño de partícula (ref. 4).

Con respecto al equilibrio entre Hg^{++} y los iones haluros (ref. 7) en solución acuosa el Hg Cl_2 no se disocia simplemente en iones Hg^{++} y Cl^- , sino que forma una serie de complejos cuyas concentraciones relativas dependen de la concentración del ion Cl^- (cloruro) y del pH. Las siguientes especies son las más importantes: Hg^{++} , Hg Cl^+ , Hg Cl_2 , Hg Cl_3^- y Hg Cl_4^{--} . Las disociaciones fundamentales y sus constantes se encuentran en la tabla 5.

La distribución entre las diferentes especies de complejos para 3 diferentes situaciones (baja, moderada y alta concentración de Cl^-) se muestra en la tabla 6.

TABLA 5

Constantes de Disociación para Complejos de Cloruro Mercurico.

| Equilibrio | Definición de K | K | pK | Definición de β | β | p β |
|--|--|--------------------|------|---|------------------------|-----------|
| $Hg^{++} + Cl^- \rightleftharpoons HgCl^+$ | $K_1 = \frac{(Hg^{++})(Cl^-)}{(HgCl^+)}$ | 1.82×10^7 | 6.74 | $\beta_1 = \frac{(Hg^{++})(Cl^-)}{(HgCl^+)}$ | 1.82×10^{-7} | 6.74 |
| $HgCl^+ + Cl^- \rightleftharpoons HgCl_2$ | $K_2 = \frac{(HgCl^+)(Cl^-)}{(HgCl_2)}$ | 3.31×10^7 | 6.48 | $\beta_2 = \frac{(Hg^{++})(Cl^-)^2}{(HgCl_2)}$ | 6.03×10^{-14} | 13.22 |
| $HgCl_2 + Cl^- \rightleftharpoons HgCl_3^-$ | $K_3 = \frac{(HgCl_2)(Cl^-)}{(HgCl_3^-)}$ | 1.41×10^1 | 0.85 | $\beta_3 = \frac{(Hg^{++})(Cl^-)^3}{(HgCl_3^-)}$ | 8.51×10^{-15} | 14.07 |
| $HgCl_3^- + Cl^- \rightleftharpoons HgCl_4^{2-}$ | $K_4 = \frac{(HgCl_3^-)(Cl^-)}{(HgCl_4^{2-})}$ | 1.00×10^1 | 1.00 | $\beta_4 = \frac{(Hg^{++})(Cl^-)^4}{(HgCl_4^{2-})}$ | 8.51×10^{-16} | 15.07 |

Las constantes acumulativas son, por supuesto dadas por: $\beta_1 = K_1$, $\beta_2 = K_1 K_2$, $\beta_3 = K_1 K_2 K_3$ y $\beta_4 = K_1 K_2 K_3 K_4$.

TABLA 6

Distribución de Complejos de Cloruro Mercurico como fracciones del Mercurio Total en medios de diferentes concentraciones de Cl⁻.

| Fracción | [Cl ⁻]=1 mM | Medio | |
|---|-------------------------|---|--|
| | | Krebs-Ringer [Cl ⁻]=126 mM | Agua de Mar [Cl ⁻]=515 mM |
| [Hg ⁺⁺]/[Hg _T] | 6.03X10 ⁻⁸ | 1.26X10 ⁻¹² | 9.8X10 ⁻¹⁵ |
| [HgCl ⁺]/[Hg _T] | 3.31X10 ⁻⁴ | 8.68X10 ⁻⁷ | 2.8X10 ⁻⁸ |
| [HgCl ₂]/[Hg _T] | 0.9925 | 0.331 | 0.0423 |
| [HgCl ₃ ⁻]/[Hg _T] | 7.09X10 ⁻³ | 0.296 | 0.196 |
| [HgCl ₄ ²⁻]/[Hg _T] | 7.09X10 ⁻⁵ | | |

Iones complejos de mercurio con amoníaco son mencionados en la literatura como $\text{Hg}(\text{NH}_3)_4^{+2} \rightleftharpoons \text{Hg}^{+2} + 4\text{NH}_3$ acuoso con una constante de equilibrio $10^{-19.28}$. Este complejo no es una forma predominante del mercurio a menos que la solución contenga más de 100 ppm de NH_4^+ , un nivel raramente alcanzado en aguas naturales (ref. 14).

Compuestos Organomercúricos (ref 4).

Los dialquilos y diarilos son líquidos tóxicos no polares y volátiles o sólidos de bajo punto de fusión. Todos estos compuestos son algo inestables térmicamente y sensibles a la acción del aire. Los compuestos R_2Hg ($\text{R} = \text{CH}_3-$, $\text{CH}_3\text{-CH}_2-$, etc.), poseen una reactividad muy pequeña frente al oxígeno, agua, hidrógeno activo y grupos orgánicos funcionales en general.

El dimetil-mercurio $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$ está reportado con energía libre de formación de 35.5 KCal y como un compuesto no estable en la región de pH-E de aguas naturales. (ref. 14).

El ión metil-mercúrico, es citado como la forma más importante encontrada en peces y varios otros productos alimenticios de origen animal. Ha sido identificado en cultivos de bacterias generadoras de metano a los cuales ha sido adicionado el ion mercúrico. Examinando cuidadosamente los cálculos de estabilidad para Hg CH_3^+ , se observó que dichos valo

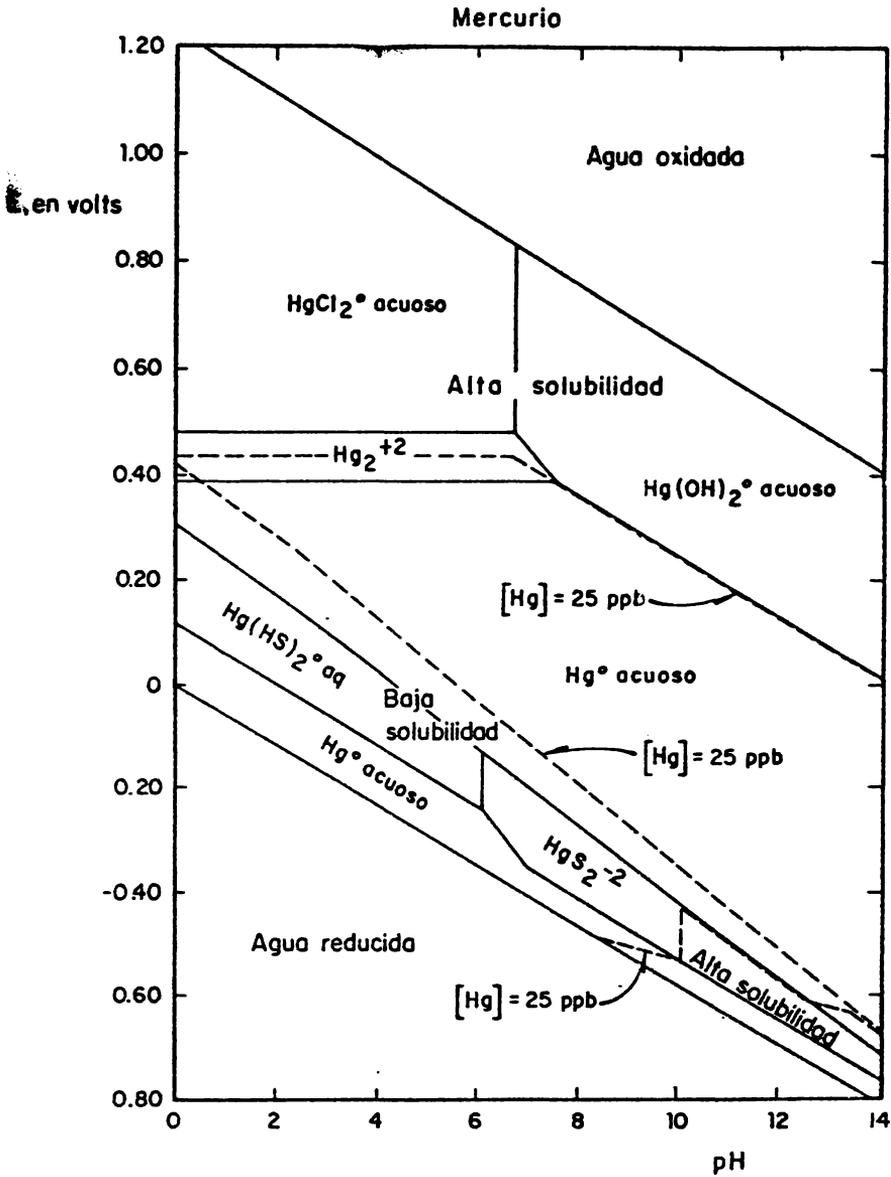


Fig 2 Campo de estabilidad para especies acuosas de mercurio a 25°C y 1 atmósfera de presión, conteniendo agua con 36 ppm de Cl^- y azufre total 96 ppm como sulfato

res no pueden ser encontrados a las condiciones que predominan en las aguas naturales, por lo que se encuentra en estudio la estabilidad y existencia de dichos compuestos en los medios naturales. (ref. 14).

Discusión del Diagrama E- pH

Las principales formas de la química inorgánica acuosa del mercurio, bajo condiciones de equilibrio son claramente indicadas en la figura 2 sobre muchas de las áreas de condiciones moderadamente oxidantes arriba de pH_5 , las especies predominantes del mercurio en solución es el mercurio no disociado. La solubilidad de este material es cercanamente constante sobre el área total donde el metal líquido es estable y es relativamente bajo, aproximadamente 25 ppb. como Hg^0 .

Esto representa el probable límite superior de equilibrio del mercurio en la superficie de corrientes y lagos que son bajos en cloruros.

Condiciones reductoras suaves, como son las que existen probablemente en muchos lagos y sedimentos de ríos, pueden causar que el mercurio sea precipitado como sulfuro (HgS). Este compuesto tiene una extremadamente baja solubilidad. En campos de $\text{Hg}(\text{HS})_2$ acuoso y Hg S_2^{-2} cerca de pH neutro, el equi

librio de solubilidad de mercurio puede ser tan bajo como - 0.002 ppb. En condiciones fuertemente reductoras, sin embargo, puede incrementarse algo la solubilidad, por la conversión del ión mercuríco a metal libre.

En soluciones que son altas en cloruros la solubilidad del mercurio en agua oxigenada puede ser grandemente incrementada por la formación de el complejo descargado Hg Cl_2 o complejos aniónicos tales como Hg Cl_4^{-2} . El área de dominancia muestra que para complejos clorados, el área puede ser ampliada si la concentración de cloruros es incrementada arriba de 10^{-3} molar.

La existencia de cloruro mercuríco (Hg Cl_2) y HgS , dependen de la presencia especies de cloro y azufre en el sistema.

Para las siguientes especies de Hg se calculó su solubilidad a 25 C con concentraciones salinas de río con la ecuación 8.

| ESPECIE | E (Volts). | AG Kcal. |
|---------------------------|------------|----------|
| Hg | 0.851 | -39.38 |
| $\text{Hg}_2 \text{Cl}_2$ | 0.2682 | -50.35 |
| $\text{Hg}(\text{OH})_2$ | 0.0984 | -65.70 |
| HgS | 1.09 | -11.67 |
| $\text{Hg}_2 \text{SO}_4$ | 0.6154 | -141.0 |
| $\text{Hg}_2 \text{CO}_3$ | 0.44 | -105.8 |

Siendo las ecuaciones utilizadas para cada especie.



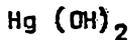
$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]$$



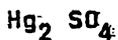
$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)^{1/4}}{16} \right]$$



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)^{1/2} \right]$$



$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)^{1/3}}{4} \right]$$



$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)^{1/3}}{1} \right]$$

TABLA 7 SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS DE Hg.

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE Hg++ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 6.5390E-03 | 7.5226E-03 | 8.7519E-03 | 1.0948E-02 | 1.1537E-02 |
| 0.5 | 3.0939E-06 | 3.5408E-06 | 4.0654E-06 | 4.6677E-06 | 5.3592E-06 |
| 0.4 | 1.4325E-09 | 1.6448E-09 | 1.8884E-09 | 2.1682E-09 | 2.4894E-09 |
| 0.3 | 6.6543E-13 | 7.6401E-13 | 8.7726E-13 | 1.0072E-12 | 1.1564E-12 |
| 0.2 | 3.0910E-16 | 3.5490E-16 | 4.0747E-16 | 4.6784E-16 | 5.3716E-16 |
| 0.1 | 1.4358E-19 | 1.6485E-19 | 1.8928E-19 | 2.1732E-19 | 2.4952E-19 |
| 0.0 | 6.6696E-23 | 7.6577E-23 | 8.7923E-23 | 1.0095E-22 | 1.1590E-22 |
| -0.1 | 3.0981E-26 | 3.5571E-26 | 4.0841E-26 | 4.6892E-26 | 5.3839E-26 |
| -0.2 | 1.4391E-29 | 1.6523E-29 | 1.8971E-29 | 2.1782E-29 | 2.4952E-29 |
| -0.3 | 6.6850E-33 | 7.6754E-33 | 8.8125E-33 | 1.0118E-32 | 1.1617E-32 |
| -0.4 | 3.1053E-36 | 3.5653E-36 | 4.0936E-36 | 4.7000E-36 | 5.3964E-36 |
| -0.5 | 1.4425E-39 | 1.6562E-39 | 1.9015E-39 | 2.1832E-39 | 2.5067E-39 |
| -0.6 | 6.7004E-43 | 7.6931E-43 | 8.8329E-43 | 1.0141E-42 | 1.1644E-42 |

E(0)= 0.851 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 1 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE Hg EN Hg2Cl2 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 1.9429E+08 | 2.0112E+08 | 2.0819E+08 | 2.1550E+08 | 2.2308E+08 |
| 0.5 | 2.8524E+07 | 2.9526E+07 | 3.0564E+07 | 3.1638E+07 | 3.2749E+07 |
| 0.4 | 4.1875E+06 | 4.3347E+06 | 4.4870E+06 | 4.6447E+06 | 4.8079E+06 |
| 0.3 | 6.1476E+05 | 6.3636E+05 | 6.5873E+05 | 6.8137E+05 | 7.0544E+05 |
| 0.2 | 9.0251E+04 | 9.3423E+04 | 9.6706E+04 | 1.0010E+05 | 1.0362E+05 |
| 0.1 | 1.3250E+04 | 1.3715E+04 | 1.4197E+04 | 1.4696E+04 | 1.5213E+04 |
| 0.0 | 1.9452E+03 | 2.0135E+03 | 2.0843E+03 | 2.1575E+03 | 2.2333E+03 |
| -0.1 | 2.8556E+02 | 2.9560E+02 | 3.0599E+02 | 3.1674E+02 | 3.2787E+02 |
| -0.2 | 4.1923E+01 | 4.3396E+01 | 4.4922E+01 | 4.6500E+01 | 4.8134E+01 |
| -0.3 | 6.1547E+00 | 6.3710E+00 | 6.5948E+00 | 6.8266E+00 | 7.0665E+00 |
| -0.4 | 9.0355E-01 | 9.3531E-01 | 9.6818E-01 | 1.0022E+00 | 1.0374E+00 |
| -0.5 | 1.3265E-01 | 1.3731E-01 | 1.4214E-01 | 1.4713E-01 | 1.5230E-01 |
| -0.6 | 1.9474E-02 | 2.0158E-02 | 2.0867E-02 | 2.1600E-02 | 2.2359E-02 |

E(0)= 0.2682 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.25 DIVIDENDO= 16

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE Hg EN Hg₂CO₃ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 2.9874E+87 | 3.1281E+87 | 3.2755E+87 | 3.4299E+87 | 3.5915E+87 |
| 0.5 | 2.3142E+86 | 2.4232E+86 | 2.5374E+86 | 2.6570E+86 | 2.7822E+86 |
| 0.4 | 1.7927E+85 | 1.8772E+85 | 1.9656E+85 | 2.0583E+85 | 2.1533E+85 |
| 0.3 | 1.3837E+84 | 1.4542E+84 | 1.5227E+84 | 1.5945E+84 | 1.6696E+84 |
| 0.2 | 1.0753E+83 | 1.1265E+83 | 1.1796E+83 | 1.2352E+83 | 1.2934E+83 |
| 0.1 | 9.3338E+81 | 9.7265E+81 | 9.1377E+81 | 9.5683E+81 | 1.0019E+82 |
| 0.0 | 6.4559E+80 | 6.7601E+80 | 7.0786E+80 | 7.4122E+80 | 7.7615E+80 |
| -0.1 | 5.0011E-01 | 5.2368E-01 | 5.4833E-01 | 5.7419E-01 | 6.0125E-01 |
| -0.2 | 3.8741E-02 | 4.0567E-02 | 4.2479E-02 | 4.4481E-02 | 4.6577E-02 |
| -0.3 | 3.0011E-03 | 3.1426E-03 | 3.2907E-03 | 3.4457E-03 | 3.6081E-03 |
| -0.4 | 2.3249E-04 | 2.4344E-04 | 2.5491E-04 | 2.6693E-04 | 2.7951E-04 |
| -0.5 | 1.8010E-05 | 1.8859E-05 | 1.9747E-05 | 2.0678E-05 | 2.1652E-05 |
| -0.6 | 1.3951E-06 | 1.4609E-06 | 1.5297E-06 | 1.6018E-06 | 1.6773E-06 |

E(0)= 0.44 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.3333 DIVIDENDO= 4

.(CONTINUACION)

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE HG EN Hg_2SO_4 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 3.3292E+05 | 3.4861E+05 | 3.6504E+05 | 3.8224E+05 | 4.0035E+05 |
| 0.5 | 2.5790E+04 | 2.7006E+04 | 2.8278E+04 | 2.9611E+04 | 3.1006E+04 |
| 0.4 | 1.9979E+03 | 2.0920E+03 | 2.1906E+03 | 2.2938E+03 | 2.4019E+03 |
| 0.3 | 1.5477E+02 | 1.6206E+02 | 1.6970E+02 | 1.7769E+02 | 1.8607E+02 |
| 0.2 | 1.1989E+01 | 1.2554E+01 | 1.3146E+01 | 1.3765E+01 | 1.4414E+01 |
| 0.1 | 9.2875E-01 | 9.7252E-01 | 1.0183E+00 | 1.0663E+00 | 1.1166E+00 |
| 0.0 | 7.1347E-02 | 7.5337E-02 | 7.8807E-02 | 8.2800E-02 | 8.7317E-02 |
| -0.1 | 5.5734E-03 | 5.8361E-03 | 6.1111E-03 | 6.3991E-03 | 6.7006E-03 |
| -0.2 | 4.3175E-04 | 4.5210E-04 | 4.7340E-04 | 4.9571E-04 | 5.1907E-04 |
| -0.3 | 3.3446E-05 | 3.5022E-05 | 3.6672E-05 | 3.8401E-05 | 4.0210E-05 |
| -0.4 | 2.5909E-06 | 2.7130E-06 | 2.8409E-06 | 2.9747E-06 | 3.1149E-06 |
| -0.5 | 2.0071E-07 | 2.1017E-07 | 2.2007E-07 | 2.3044E-07 | 2.4130E-07 |
| -0.6 | 1.5548E-08 | 1.6281E-08 | 1.7048E-08 | 1.7851E-08 | 1.8693E-08 |

E(0)= 0.6158 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.3333 DIVIDENDO= 4

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE HG EN HGS EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 3.7956E-03 | 4.0671E-03 | 4.3579E-03 | 4.6690E-03 | 5.0016E-03 |
| 0.5 | 8.1805E-05 | 8.7656E-05 | 9.3925E-05 | 1.0064E-04 | 1.0784E-04 |
| 0.4 | 1.7631E-06 | 1.8892E-06 | 2.0243E-06 | 2.1691E-06 | 2.3242E-06 |
| 0.3 | 3.9000E-08 | 4.0717E-08 | 4.3630E-08 | 4.6750E-08 | 5.0093E-08 |
| 0.2 | 8.1839E-10 | 8.7577E-10 | 9.4033E-10 | 1.0076E-09 | 1.0796E-09 |
| 0.1 | 1.7651E-11 | 1.8914E-11 | 2.0267E-11 | 2.1716E-11 | 2.3269E-11 |
| 0.0 | 3.8044E-13 | 4.0764E-13 | 4.3680E-13 | 4.6804E-13 | 5.0151E-13 |
| -0.1 | 8.1994E-15 | 8.7858E-15 | 9.4141E-15 | 1.0087E-14 | 1.0809E-14 |
| -0.2 | 1.7672E-16 | 1.8936E-16 | 2.0290E-16 | 2.1741E-16 | 2.3296E-16 |
| -0.3 | 3.8087E-18 | 4.0811E-18 | 4.3730E-18 | 4.6858E-18 | 5.0209E-18 |
| -0.4 | 8.2088E-20 | 8.7959E-20 | 9.4250E-20 | 1.0099E-19 | 1.0821E-19 |
| -0.5 | 1.7692E-21 | 1.8957E-21 | 2.0313E-21 | 2.1766E-21 | 2.3323E-21 |
| -0.6 | 3.8131E-23 | 4.0858E-23 | 4.3781E-23 | 4.6912E-23 | 5.0267E-23 |

E(0)= 1.09 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE HG EN $Hg(OH)_2$ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 9.2459E+10 | 9.6812E+10 | 1.0137E+11 | 1.0614E+11 | 1.1114E+11 |
| 0.5 | 7.1790E+09 | 7.5170E+09 | 7.8709E+09 | 8.2414E+09 | 8.6294E+09 |
| 0.4 | 5.5741E+08 | 5.8365E+08 | 6.1113E+08 | 6.3990E+08 | 6.7006E+08 |
| 0.3 | 4.3280E+07 | 4.5217E+07 | 4.7451E+07 | 4.9855E+07 | 5.2434E+07 |
| 0.2 | 3.3604E+06 | 3.5186E+06 | 3.6843E+06 | 3.8578E+06 | 4.0394E+06 |
| 0.1 | 2.6092E+05 | 2.7320E+05 | 2.8607E+05 | 2.9953E+05 | 3.1364E+05 |
| 0.0 | 2.0259E+04 | 2.1213E+04 | 2.2211E+04 | 2.3257E+04 | 2.4352E+04 |
| -0.1 | 1.5730E+03 | 1.6471E+03 | 1.7246E+03 | 1.8058E+03 | 1.8908E+03 |
| -0.2 | 1.2213E+02 | 1.2788E+02 | 1.3391E+02 | 1.4021E+02 | 1.4681E+02 |
| -0.3 | 9.4831E+00 | 9.9296E+00 | 1.0397E+01 | 1.0887E+01 | 1.1399E+01 |
| -0.4 | 7.3631E-01 | 7.7099E-01 | 8.0727E-01 | 8.4528E-01 | 8.8508E-01 |
| -0.5 | 5.7170E-02 | 5.9862E-02 | 6.2680E-02 | 6.5631E-02 | 6.8711E-02 |
| -0.6 | 4.4380E-03 | 4.6480E-03 | 4.8669E-03 | 5.0959E-03 | 5.3358E-03 |

E(0)= 0.0994 CL= 2.78 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.333 DIVIDENDO= 4

$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right)}{4} \right]^{1/3} \text{Hg}_2 \text{CO}_3$$

Los valores obtenidos a partir de estas ecuaciones presentan en la sc. 7 en la que se observa el aumento de solubilidad - con el incremento de pH y disminución de la misma a condiciones de potenciales bajos. (Tabla 7).

Cobre:

El cobre se halla muy ampliamente distribuido en la naturaleza, donde se le encuentra como tal, (Cu^0), al estado libre - o en sulfuros (Cu_2S , CuS), cloruros (Cu Cl , Cu Cl_2 , Cu Cl_4^{2-} , etc.) y carbonatos (Cu CO_3 , $\text{Cu (OH)}_2 \text{CO}_3$), etc.). Al aire se oxida superficialmente, a veces se obtiene una capa verde de hidroxocarbonato ($\text{Cu (OH)}_2 \text{CO}_3$) y de hidroxosulfato ($\text{Cu (OH)}_2 \text{SO}_4$). Es atacada por los halógenos, pero en ausencia de aire no lo afectan. Es soluble en soluciones ácidas, siempre en presencia de oxígeno (ref. 4).

El estado dipositivo (Cu^{2+}) es el estado más importante del

cobre. La mayoría de los compuestos cuprosos son oxidados - con facilidad a compuestos cúpricos, pero la oxidación ulterior a Cu (III) es difícil. Existe una química bien definida de las soluciones acuosas del Cu^{2+} y se conoce un gran número de sales de diversos aniones, muchas de las cuales son solubles en agua; a continuación se mencionan las características más notables de las especies más importantes.

El hidróxido cúprico $\text{Cu}(\text{OH})_2$ es un precipitado azul voluminoso que se forma en soluciones cúpricas al adicionar hidróxido alcalino, y tiene una constante de solubilidad de 5.0×10^{-20} . El cloruro cúprico CuCl_2 se disuelve fácilmente en agua, las sales hidratadas son cristalizables, también es soluble en solventes orgánicos polares tales como acetona, Alcoholo piridina. Otra de las sales más comunes es el sulfato cúprico CuSO_4 , también muy soluble en agua aproximadamente 2072 g/lit (ref. 20).

A valores de pH y concentraciones de bicarbonato de la mayoría de las aguas naturales, el ión cúprico Cu^{+2} reacciona -- con el bicarbonato HCO_3^- y con el hidróxido OH^- para dar hidroxocarbonato $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$, el cual es precipitado rápidamente de soluciones en las cuales el cobre se halla presente en concentraciones mayores de 0.5 mg/lit (ref. 22).

Especies de Cu^{2+} y carbonato que más probablemente pueden ser producidas en aguas naturales (ref 25) en forma sólida.

| | | |
|--|-----|-----------------------|
| $\text{Cu}(\text{OH})_2$ | Kps | 5.0×10^{-20} |
| CuCO_3 | Kps | 1.6×10^{-10} |
| $\text{Cu}(\text{OH})_2 \text{CO}_3$ (malaquita) | Kps | 1.0×10^{-34} |
| $\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ (azurita). | Kps | 1.6×10^{-46} |

En la siguiente figura 3 se da el porcentaje de formación de cada especie en función del pH y el pH al cual pueden precipitar algunas especies de Cu II y carbonato (ref. 25).

La mayoría de las sales cúpricas, se disuelven fácilmente en agua para dar aquo iones representándose como $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+2}$, pero de estas 6 moléculas de agua 2 están más alejadas del átomo metálico que las otras cuatro y la presencia de ligandos en estas soluciones acuosas lleva a la formación de complejos, por desplazamiento sucesivo de moléculas de agua. Con NH_3 , por ejemplo, se forman las especies $[\text{Cu}(\text{NH}_3)(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$ $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ dependiendo de las -- concentraciones que se encuentren presentes de otros ligandos (ref. 4).

Los complejos con iones haluros se forman también en solución acuosa, existiendo en el medio exceso de iones Cl^- , Br^- , formándose complejos del tipo $[\text{CuCl}_4]^{2-}$ (ref. 4).

Los ligantes que coordinan a través del oxígeno forman un gran número de complejos cúpricos que frecuentemente son muy complicados. La conocida solución azul que se forma cuando se añade tartrato a soluciones de Cu^{2+} (solución de Fehling) se debe a una reacción que está lejos de estar dilucidada, pero parece claro que deben formarse complejos que no se ha podido determinar su estructura. Diversos compuestos orgánicos como oxalato, glicerina, y numerosos tio compuestos (con azufre) forman también compuestos cúpricos (ref. 4).

La presencia de vida en sistemas acuáticos, inevitablemente proporcionan compuestos orgánicos capaces de acomplejar iones metálicos. La naturaleza y concentraciones de estos compuestos, tales como ácidos húmico y fúlvico que son derivados de la descomposición de la vegetación y de un vasto contenido de compuestos de nitrógeno derivados de productos de excreción de los organismos, son excesivamente difíciles de determinar (ref. 25). Uno de tales compuestos, ácido nitriloacético (NTA) forma un complejo con el cobre el cual tiene una constante de estabilidad similar a un gran número de complejos formados con ligantes que se encuentran natural

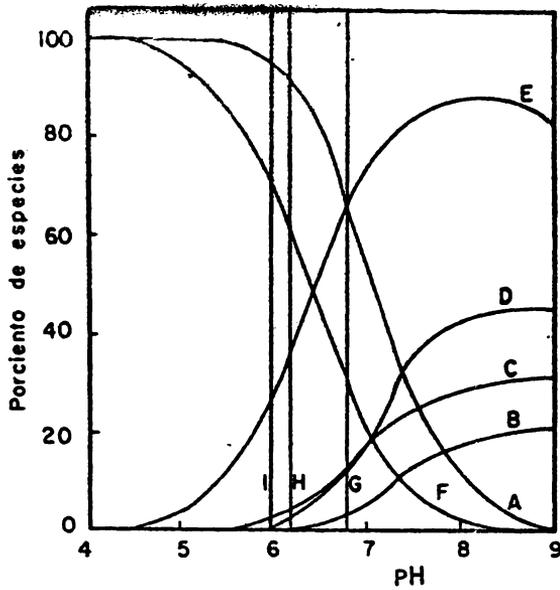
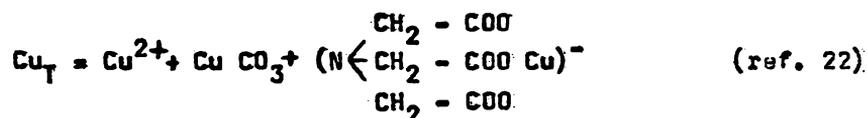


Fig 3 Especiación de Cu(II) y carbonato total de cobre 2 PPM

ments puede ser considerado termodinámicamente representativo - de estos complejos (ref. 22).

El ión cúprico reacciona con bicarbonato y NTA en soluciones ligeramente alcalinas como sigue:



En la figura 3 las líneas representan a cada especie en la forma siguiente:

- (A) Cu^{+2}
- (B) $\text{Cu}(\text{OH})_2^{2+}$
- (C) CuOH^+
- (D) CuCO_3
- (E) HCO_3
- (F) H_2CO_3
- (G) pH al cual $\text{Cu}(\text{OH})_2$ podrá precipitar
- (H) pH al cual $\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ podrá precipitar
- (I) pH al cual $\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ podrá precipitar

El óxido y sulfuro cuproso (Cu_2O y CuS) son sólidos que constituyen los compuestos más estables del cobre.

Finalmente, conviene hacer notar que el ión cúprico de los complejos desempeña un papel de gran importancia y en este sentido entre los metales de transición solo lo aventaja el hierro.

El ión cúprico actúa como catalizador en numerosos procesos de oxidación, en muchos sistemas intervienen ciclos de oxidación-reducción $\text{Cu}^{\text{I}} \rightarrow \text{Cu}^{\text{II}}$. También encontramos al cobre en varias enzimas como la fenolasa y, como Cu^{I} en la hemocianina. Estas 2 metal proteínas transportan oxígeno como lo hace la hemoglobina, es posible que estos procesos involucren oxo especies como Cu O_2^+ o Cu O_2 Cu^{2+} .

En la figure 4, se muestran las relaciones de algunos compuestos del cobre. El diagrama señala el campo de estabilidad de la malaquita ($\text{Cu}_2 (\text{OH})_2 \text{CO}_3$) que puede extenderse todavía más y reducir el campo de la cuprita (Cu_2O). Aún en presencia de grandes cantidades de azufre el cobre nativo (Cu^0) tiene un amplio campo de estabilidad.

COBRE

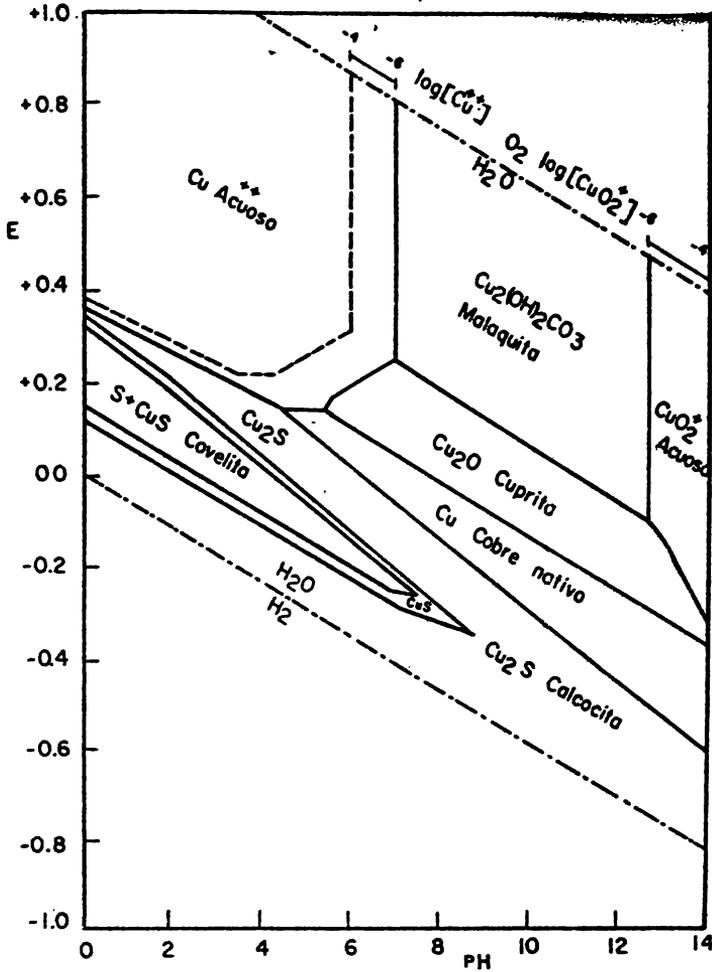


Fig 4 Relaciones de estabilidad entre algunos compuestos de cobre en el sistema Cu-H₂O-O₂-S-CO₂ a 25°C y 1 atmósfera total de presión $PCO_2 \times 10^{-3.5}$, especies de azufre total disuelto = 10^{-1}

Los sulfuros (Cu_2S , CuS) se proyectan intensamente dentro del rango ácido bajo condiciones reductoras. También se muestra en el diagrama el porqué la calcocita (Cu_2S) precipita a partir de aguas ácidas cupríferas, cuando éstas, encuentran sulfuros bajo condiciones reductoras y señala que la calcocita no puede ser oxidada produciendo azufre nativo, el azufre no coexiste con la calcocita (ref 10).

Se calcularon solubilidades para las siguientes especies de 8.

| | E_0 |
|------------------------|-------|
| Cu^{++} | 0.337 |
| Cu Cl_2 | 0.455 |
| Cu CO_3 | 0.053 |
| Cu S | 0.760 |
| $\text{Cu}_2 \text{S}$ | 0.950 |
| $\text{Cu}_2 \text{O}$ | 0.358 |

Siendo las ecuaciones para cada especie:

$$S \left[\begin{array}{c} \text{Cu}^{++} \\ \text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) \cdot (2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \\ \text{Cu Cl}_2 \end{array} \right]$$

$$S \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)}{4} \right]^{1/3}$$



$$S \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/2}$$



$$S \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/2}$$



$$S \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)}{4} \right]^{1/3}$$



$$S \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)}{4} \right]^{1/3}$$

TABLA 8 SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS Cu.

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CU+ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|-------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 2.8473E+14 | 3.2692E+14 | 3.7535E+14 | 4.3096E+14 | 4.9491E+14 |
| 0.5 | 1.3226E+11 | 1.5185E+11 | 1.7436E+11 | 2.0019E+11 | 2.2925E+11 |
| 0.4 | 6.1458E+07 | 7.0540E+07 | 8.0991E+07 | 9.2990E+07 | 1.0677E+08 |
| 0.3 | 2.8539E+04 | -3.2767E+04 | 3.7622E+04 | 4.3195E+04 | 4.9555E+04 |
| 0.2 | 1.3257E+01 | 1.5221E+01 | 1.7476E+01 | 2.0065E+01 | 2.3038E+01 |
| 0.1 | 6.1530E-03 | 7.0703E-03 | 8.1178E-03 | 9.3205E-03 | 1.0721E-02 |
| 0.0 | 2.8605E-06 | 3.2843E-06 | 3.7708E-06 | 4.3295E-06 | 4.9729E-06 |
| -0.1 | 1.3287E-09 | 1.5256E-09 | 1.7516E-09 | 2.0111E-09 | 2.3091E-09 |
| -0.2 | 6.1722E-13 | 7.0866E-13 | 8.1365E-13 | 9.3419E-13 | 1.0726E-12 |
| -0.3 | 2.8671E-16 | 3.2918E-16 | 3.7795E-16 | 4.3395E-16 | 4.9824E-16 |
| -0.4 | 1.3318E-19 | 1.5291E-19 | 1.7556E-19 | 2.0158E-19 | 2.3144E-19 |
| -0.5 | 6.1864E-23 | 7.1029E-23 | 8.1552E-23 | 9.3635E-23 | 1.0751E-22 |
| -0.6 | 2.8737E-26 | 3.2994E-26 | 3.7882E-26 | 4.3495E-26 | 4.9909E-26 |

E(0)= 0.337 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 1 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CU EN CUCL2 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 3.1007E+06 | 3.2453E+06 | 3.3967E+06 | 3.5551E+06 | 3.7218E+06 |
| 0.5 | 2.4636E+05 | 2.5785E+05 | 2.6988E+05 | 2.8247E+05 | 2.9564E+05 |
| 0.4 | 1.9574E+04 | 2.0487E+04 | 2.1443E+04 | 2.2443E+04 | 2.3490E+04 |
| 0.3 | 1.5552E+03 | 1.6277E+03 | 1.7037E+03 | 1.7831E+03 | 1.8663E+03 |
| 0.2 | 1.2357E+02 | 1.2933E+02 | 1.3536E+02 | 1.4168E+02 | 1.4828E+02 |
| 0.1 | 9.8176E+00 | 1.0276E+01 | 1.0755E+01 | 1.1257E+01 | 1.1782E+01 |
| 0.0 | 7.8004E-01 | 8.1642E-01 | 8.5451E-01 | 8.9427E-01 | 9.3569E-01 |
| -0.1 | 6.1976E-02 | 6.4867E-02 | 6.7893E-02 | 7.1060E-02 | 7.4375E-02 |
| -0.2 | 4.9242E-03 | 5.1539E-03 | 5.3943E-03 | 5.6459E-03 | 5.9093E-03 |
| -0.3 | 3.9124E-04 | 4.0949E-04 | 4.2859E-04 | 4.4859E-04 | 4.6951E-04 |
| -0.4 | 3.1085E-05 | 3.2535E-05 | 3.4053E-05 | 3.5641E-05 | 3.7304E-05 |
| -0.5 | 2.4698E-06 | 2.5850E-06 | 2.7056E-06 | 2.8318E-06 | 2.9639E-06 |
| -0.6 | 1.9623E-07 | 2.0539E-07 | 2.1497E-07 | 2.2500E-07 | 2.3549E-07 |

E(0)= 0.455 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.33 DIVIDENDO= 4

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CU EN CUC03 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 2.2993E+14 | 2.4638E+14 | 2.6400E+14 | 2.8288E+14 | 3.0311E+14 |
| 0.5 | 4.9557E+12 | 5.3101E+12 | 5.6899E+12 | 6.0968E+12 | 6.5328E+12 |
| 0.4 | 1.0681E+11 | 1.1445E+11 | 1.2263E+11 | 1.3140E+11 | 1.4080E+11 |
| 0.3 | 2.3020E+09 | 2.4666E+09 | 2.6430E+09 | 2.8321E+09 | 3.0346E+09 |
| 0.2 | 4.9614E+07 | 5.3162E+07 | 5.6964E+07 | 6.1038E+07 | 6.5404E+07 |
| 0.1 | 1.0693E+06 | 1.1458E+06 | 1.2277E+06 | 1.3155E+06 | 1.4096E+06 |
| 0.0 | 2.3046E+04 | 2.4695E+04 | 2.6461E+04 | 2.8353E+04 | 3.0381E+04 |
| -0.1 | 4.9671E+02 | 5.3223E+02 | 5.7030E+02 | 6.1109E+02 | 6.5479E+02 |
| -0.2 | 1.0705E+01 | 1.1471E+01 | 1.2291E+01 | 1.3170E+01 | 1.4112E+01 |
| -0.3 | 2.3073E-01 | 2.4723E-01 | 2.6491E-01 | 2.8386E-01 | 3.0416E-01 |
| -0.4 | 4.9728E-03 | 5.3285E-03 | 5.7096E-03 | 6.1179E-03 | 6.5554E-03 |
| -0.5 | 1.0718E-04 | 1.1484E-04 | 1.2306E-04 | 1.3186E-04 | 1.4129E-04 |
| -0.6 | 2.3099E-06 | 2.4752E-06 | 2.6522E-06 | 2.8419E-06 | 3.0451E-06 |

E(0)= 0.053 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

(CONTINUACION)

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CU EN CU2 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 3.7971E+02 | 4.0686E+02 | 4.3596E+02 | 4.6714E+02 | 5.0055E+02 |
| 0.5 | 9.1837E+00 | 8.7689E+00 | 9.3961E+00 | 1.0068E+01 | 1.0788E+01 |
| 0.4 | 1.7638E-01 | 1.8899E-01 | 2.0251E-01 | 2.1699E-01 | 2.3251E-01 |
| 0.3 | 3.8014E-03 | 4.0733E-03 | 4.3646E-03 | 4.6768E-03 | 5.0113E-03 |
| 0.2 | 8.3931E-05 | 9.7798E-05 | 9.4069E-05 | 1.0992E-04 | 1.2051E-04 |
| 0.1 | 1.7658E-06 | 1.8921E-06 | 2.0274E-06 | 2.1724E-06 | 2.3278E-06 |
| 0.0 | 3.8058E-08 | 4.0780E-08 | 4.3697E-08 | 4.6822E-08 | 5.0170E-08 |
| -0.1 | 8.2025E-10 | 8.7892E-10 | 9.4178E-10 | 1.0091E-09 | 1.0813E-09 |
| -0.2 | 1.7679E-11 | 1.8943E-11 | 2.0298E-11 | 2.1749E-11 | 2.3365E-11 |
| -0.3 | 3.8102E-13 | 4.0827E-13 | 4.3747E-13 | 4.6876E-13 | 5.0228E-13 |
| -0.4 | 8.2120E-15 | 8.7993E-15 | 9.4286E-15 | 1.0103E-14 | 1.0825E-14 |
| -0.5 | 1.7699E-16 | 1.8965E-16 | 2.0321E-16 | 2.1774E-16 | 2.3392E-16 |
| -0.6 | 3.8146E-18 | 4.0874E-18 | 4.3797E-18 | 4.6930E-18 | 5.0266E-18 |

E(0)= 0.76 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CU EN CU22 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 2.2286E+01 | 2.3325E+01 | 2.4414E+01 | 2.5552E+01 | 2.6744E+01 |
| 0.5 | 1.7707E+00 | 1.8533E+00 | 1.9397E+00 | 2.0302E+00 | 2.1249E+00 |
| 0.4 | 1.4069E-01 | 1.4725E-01 | 1.5412E-01 | 1.6131E-01 | 1.6883E-01 |
| 0.3 | 1.1178E-02 | 1.1699E-02 | 1.2245E-02 | 1.2816E-02 | 1.3414E-02 |
| 0.2 | 8.8812E-04 | 9.2954E-04 | 9.7290E-04 | 1.0183E-03 | 1.0658E-03 |
| 0.1 | 7.0564E-05 | 7.3855E-05 | 7.7300E-05 | 8.0906E-05 | 8.4680E-05 |
| 0.0 | 5.8065E-06 | 5.8689E-06 | 5.1417E-06 | 6.4282E-06 | 6.7281E-06 |
| -0.1 | 4.4545E-07 | 4.6623E-07 | 4.8798E-07 | 5.1074E-07 | 5.3456E-07 |
| -0.2 | 3.5392E-08 | 3.7043E-08 | 3.8771E-08 | 4.0580E-08 | 4.2473E-08 |
| -0.3 | 2.8120E-09 | 2.9432E-09 | 3.0805E-09 | 3.2242E-09 | 3.3746E-09 |
| -0.4 | 2.2342E-10 | 2.3385E-10 | 2.4475E-10 | 2.5617E-10 | 2.6812E-10 |
| -0.5 | 1.7752E-11 | 1.8580E-11 | 1.9446E-11 | 2.0354E-11 | 2.1303E-11 |
| -0.6 | 1.4104E-12 | 1.4762E-12 | 1.5451E-12 | 1.6172E-12 | 1.6926E-12 |

E(0)= 0.95 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.33 DIVIDENDO= 4

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CU EN CU20 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 7.2340E+07 | 7.5715E+07 | 7.9246E+07 | 8.2943E+07 | 8.6812E+07 |
| 0.5 | 5.7476E+06 | 6.0157E+06 | 6.2964E+06 | 6.5901E+06 | 6.8975E+06 |
| 0.4 | 4.5667E+05 | 4.7797E+05 | 5.0026E+05 | 5.2360E+05 | 5.4802E+05 |
| 0.3 | 3.6284E+04 | 3.7978E+04 | 3.9747E+04 | 4.1602E+04 | 4.3542E+04 |
| 0.2 | 2.8828E+03 | 3.0173E+03 | 3.1581E+03 | 3.3054E+03 | 3.4595E+03 |
| 0.1 | 2.2905E+02 | 2.3978E+02 | 2.5092E+02 | 2.6252E+02 | 2.7467E+02 |
| 0.0 | 1.8199E+01 | 1.9048E+01 | 1.9936E+01 | 2.0866E+01 | 2.1839E+01 |
| -0.1 | 1.4459E+00 | 1.5134E+00 | 1.5840E+00 | 1.6579E+00 | 1.7352E+00 |
| -0.2 | 1.1488E-01 | 1.2024E-01 | 1.2585E-01 | 1.3172E-01 | 1.3787E-01 |
| -0.3 | 9.1279E-03 | 9.5536E-03 | 9.9993E-03 | 1.0466E-02 | 1.0954E-02 |
| -0.4 | 7.2524E-04 | 7.5907E-04 | 7.9447E-04 | 8.3153E-04 | 8.7032E-04 |
| -0.5 | 5.7622E-05 | 6.0310E-05 | 6.3123E-05 | 6.6068E-05 | 6.9150E-05 |
| -0.6 | 4.5732E-06 | 4.7918E-06 | 5.0153E-06 | 5.2493E-06 | 5.4941E-06 |

E(0)= 0.358 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.33 DIVIDENDO= 4

Los valores obtenidos a partir de estas ecuaciones se encuentran en la tabla 8, en las que se observa el aumento de solubilidad con el incremento de pH y disminución de la misma a condiciones de potencial bajo.

Zinc

El zinc forma parte de numerosos minerales entre los cuales se encuentran la blenda de zinc ($Zn S$), la smithsonita o calamina ($Zn CO_3$), la willemita ($Zn_2 Si O_4$) y la zincita, ($Zn O$).

La química del zinc es similar a la del cadmio siendo metales muy electropositivos. El zinc reacciona con ácidos no oxidantes con liberación de hidrógeno y la formación del ión divalente (Zn^{2+}). El zinc se disuelve en bases fuertes, debido a su tendencia a formar iones zincatos, los que generalmente se presentan como ($Zn O_2^{2-}$) (ref. 4).

El hidróxido de zinc ($Zn (OH)_2$) precipita de las soluciones de sus sales por la presencia de bases alcalinas, su producto de solubilidad es de 10^{-11} . El sulfuro de zinc ($Zn S$) es un sólido cristalino insoluble en agua y se forma fácilmente debido a la afinidad del zinc por el azufre (ref. 4).

De los haluros del zinc el fluoruro ($Zn F_2$) es el menos soluble en agua, el incremento de solubilidad de los otros haluros Zn -

TABLA 9 PROPIEDADES DE HALUROS DE Zn

| | Solubilidad en Agua Moles/lt. | Punto de Fusión °C | Punto de Ebullición °C |
|--------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Zn F ₂ | 1.57 (20 °) | 872 | 1502 |
| Zn Cl ₂ | 31.8 (25 °) | 275 | 756 |
| Zn Br ₂ | 20.9 (25 °) | 294 | 697 |
| Zn I ₂ | 13 (25 °C) | 446 | (sublima) |

TABLA 10 CONSTANTES DE FORMACION DE HALO
COMPLEJOS DE Zn (A 25 °C)

| Halogeno | Log K ₁ | Log K ₂ | Log K ₃ | Log K ₄ |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Zn F | 0.75 | No obs. | No obs. | No obs. |
| Zn Cl | -1.0 a + 1.0 |
| Z Br | - 0.60 | - 0.37 | - 0.73 | - 0.44 |
| Zn I | - 2.93 | 1.95 | - 1.07 | - 0.59 |

TABLA 11 SOLUBILIDAD DEL CARBONATO DE Zinc
(MgZn/lt) BAJO VARIAS CONDICIONES DE pH
Y DUREZA TOTAL

| Dureza mg/lt como Ca CO ₃ | pH | | |
|--|------|------|------|
| | 6 | 7 | 8 |
| 50 | 13.1 | 13.1 | 1.31 |
| 100 | 65.3 | 6.53 | 0.65 |
| 200 | 32.6 | 3.26 | 0.33 |
| 500 | 13.1 | 1.31 | 0.31 |

Cl_2 , Zn Br_2 , Zn I_2 , se debe en parte a la formación de halocomplejos en solución. En la tabla 9 se mencionan algunas de las propiedades de los haluros del zinc.

Las cuatro especies escalonadas de complejación con Cl^- , Br^- y I^- cuyas constantes se encuentran en la tabla 10 son poco estables.

El ión Zn^{2+} forma generalmente enlaces más fuertes con flúor, F^- y oxígeno, mientras que el cadmio Cd^{2+} forma enlaces fuertes con ligandos como Cl , S o P .

En una solución de cloruro de zinc (Zn Cl_2) en agua las especies presentes, en función de la concentración, son: $\text{Zn (H}_2\text{O)}_6^{2+}$, Zn Cl^+ (acuoso), Zn Cl_2 (acuoso) y $\text{Zn Cl}_4 (\text{H}_2\text{O})_2^{-2}$ no habiéndose encontrado pruebas de la formación de Zn Cl_3 o Zn Cl_4^{2-} (Ref. 4).

La solubilidad del (Zn Cl_2) cloruro de zinc en agua es tan grande que pueden alcanzarse relaciones molares $\text{H}_2\text{O} - \text{Zn Cl}_2$ aun menores que 2:1, su solubilidad en agua destilada es de 3680 g/lit. Los haluros del zinc son bastante solubles en alcohol, acetona y otros solventes polares similares.

Las sales de los oxo-ácidos tales como nitratos, sulfatos, sulfitos, son solubles en agua.

El zinc es un contaminante común de las aguas dulces superficiales en muchas áreas industriales. En aguas dulces naturales la solubilidad del zinc, Zn^{2+} es esencialmente controlada por la solubilidad del carbonato de zinc ($ZnCO_3$), ésta es una función de la concentración del ión carbonato y es dependiente de valores de pH y la concentración del ión bicarbonato en la solución. La solubilidad del carbonato de zinc bajo varias condiciones de pH y dureza es mostrada en la tabla 11 (ref. 23).

La figura 5 muestra la estabilidad a condiciones de E y pH para sulfuros, sulfatos y carbonatos y otros productos de oxidación de metales tales como Zn, Cu y Pb. El diagrama muestra claramente la coexistencia estable de minerales oxidados del zinc y sulfuros de cobre como la smithsonita ($ZnCO_3$) con la calcocita (Cu_2S).

Se calcularon solubilidades para las siguientes especies de zinc, a partir de la ecuación 8.

| | E_0 |
|-----------|-------|
| Zn^{++} | 0.763 |
| $ZnCO_3$ | 1.06 |
| $ZnSO_4$ | 0.799 |

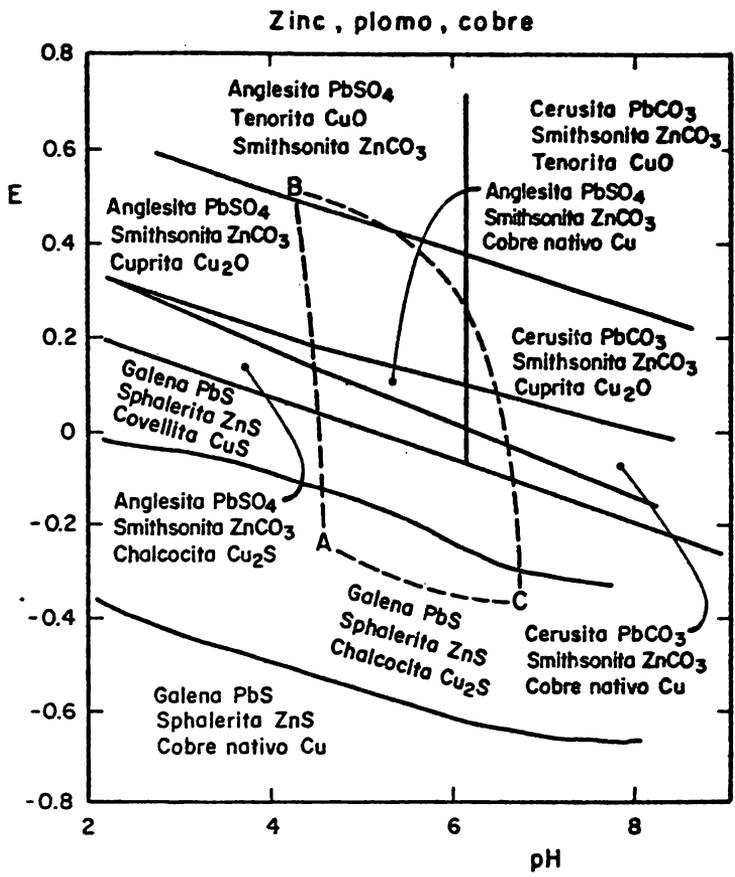


Fig 5 Diagrama compuesto por la estabilidad de sulfuros metálicos y productos de oxidación a 25° C y 1 atmósfera total de presión en presencia de un total de carbonato disuelto = $10^{1.5}$ y total de azufre disuelto = 10^{-1} .

Zn S.

1.44

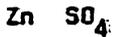
Siendo las ecuaciones para cada especie:



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]$$



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/2}$$



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/2}$$



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/2}$$

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 12

Plomo:

TABLA 12 SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS DE Zn.

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE ZN ++ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 1.2543E+00 | 2.1291E+00 | 2.4445E+00 | 2.2067E+00 | 3.2225E+00 |
| 0.5 | 8.6137E-04 | 9.8898E-04 | 1.1355E-03 | 1.3037E-03 | 1.4969E-03 |
| 0.4 | 4.0012E-07 | 4.5940E-07 | 5.2746E-07 | 6.0560E-07 | 6.9533E-07 |
| 0.3 | 1.8586E-10 | 2.1340E-10 | 2.4501E-10 | 2.8131E-10 | 3.2259E-10 |
| 0.2 | 8.5335E-14 | 9.9126E-14 | 1.1381E-13 | 1.3067E-13 | 1.5003E-13 |
| 0.1 | 4.0104E-17 | 4.6046E-17 | 5.2867E-17 | 6.0700E-17 | 6.9653E-17 |
| 0.0 | 1.8629E-20 | 2.1389E-20 | 2.4558E-20 | 2.8196E-20 | 3.2373E-20 |
| -0.1 | 8.6534E-24 | 9.9355E-24 | 1.1407E-23 | 1.3098E-23 | 1.5038E-23 |
| -0.2 | 4.0197E-27 | 4.6152E-27 | 5.2989E-27 | 6.0940E-27 | 6.9854E-27 |
| -0.3 | 1.8672E-30 | 2.1438E-30 | 2.4614E-30 | 2.8251E-30 | 3.2448E-30 |
| -0.4 | 8.6734E-34 | 9.9584E-34 | 1.1434E-33 | 1.3128E-33 | 1.5073E-33 |
| -0.5 | 4.0289E-37 | 4.6258E-37 | 5.3111E-37 | 6.0990E-37 | 7.0015E-37 |
| -0.6 | 1.8715E-40 | 2.1488E-40 | 2.4671E-40 | 2.8326E-40 | 3.2523E-40 |

E(0)= 0.763 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 1 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE ZN EN ZNCO3 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 3.9109E-03 | 4.1906E-03 | 4.4903E-03 | 4.8115E-03 | 5.1556E-03 |
| 0.5 | 8.4290E-05 | 9.0319E-05 | 9.6778E-05 | 1.0370E-04 | 1.1112E-04 |
| 0.4 | 1.8167E-06 | 1.9466E-06 | 2.0858E-06 | 2.2350E-06 | 2.3949E-06 |
| 0.3 | 3.9154E-08 | 4.1954E-08 | 4.4955E-08 | 4.8170E-08 | 5.1615E-08 |
| 0.2 | 8.4388E-10 | 9.0423E-10 | 9.6990E-10 | 1.0382E-09 | 1.1124E-09 |
| 0.1 | 1.8188E-11 | 1.9489E-11 | 2.0882E-11 | 2.2375E-11 | 2.3976E-11 |
| 0.0 | 3.9199E-13 | 4.2003E-13 | 4.5007E-13 | 4.8226E-13 | 5.1675E-13 |
| -0.1 | 8.4485E-15 | 9.0527E-15 | 9.7002E-15 | 1.0394E-14 | 1.1137E-14 |
| -0.2 | 1.8209E-16 | 1.9511E-16 | 2.0906E-16 | 2.2402E-16 | 2.4004E-16 |
| -0.3 | 3.9244E-18 | 4.2051E-18 | 4.5059E-18 | 4.8281E-18 | 5.1734E-18 |
| -0.4 | 8.4582E-20 | 9.0631E-20 | 9.7113E-20 | 1.0406E-19 | 1.1150E-19 |
| -0.5 | 1.8230E-21 | 1.9533E-21 | 2.0930E-21 | 2.2427E-21 | 2.4031E-21 |
| -0.6 | 3.9290E-23 | 4.2100E-23 | 4.5111E-23 | 4.8337E-23 | 5.1794E-23 |

E(0)= 1.06 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE ZN EN ZNSO4 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 8.7467E+01 | 9.3722E+01 | 1.0043E+02 | 1.0761E+02 | 1.1530E+02 |
| 0.5 | 1.8851E+00 | 2.0200E+00 | 2.1644E+00 | 2.3192E+00 | 2.4851E+00 |
| 0.4 | 4.0630E-02 | 4.3535E-02 | 4.6649E-02 | 4.9985E-02 | 5.3568E-02 |
| 0.3 | 8.7568E-04 | 9.3830E-04 | 1.0054E-03 | 1.0773E-03 | 1.1544E-03 |
| 0.2 | 1.8873E-05 | 2.0223E-05 | 2.1669E-05 | 2.3219E-05 | 2.4880E-05 |
| 0.1 | 4.0676E-07 | 4.3586E-07 | 4.6703E-07 | 5.0043E-07 | 5.3622E-07 |
| 0.0 | 8.7568E-09 | 9.3933E-09 | 1.0066E-08 | 1.0785E-08 | 1.1557E-08 |
| -0.1 | 1.8895E-10 | 2.0246E-10 | 2.1694E-10 | 2.3246E-10 | 2.4908E-10 |
| -0.2 | 4.0723E-12 | 4.3636E-12 | 4.6757E-12 | 5.0101E-12 | 5.3684E-12 |
| -0.3 | 8.7769E-14 | 9.4047E-14 | 1.0077E-13 | 1.0798E-13 | 1.1570E-13 |
| -0.4 | 1.8917E-15 | 2.0270E-15 | 2.1719E-15 | 2.3273E-15 | 2.4937E-15 |
| -0.5 | 4.0770E-17 | 4.3686E-17 | 4.6811E-17 | 5.0158E-17 | 5.3746E-17 |
| -0.6 | 8.7871E-19 | 9.4155E-19 | 1.0089E-18 | 1.0810E-18 | 1.1584E-18 |

E(0)= 0.799 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

(CONTINUACION)
 SOLUBILIDAD (MG/L) DE ZN EN ZNS EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|----------------|-----------------------|--------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 1.8179E-09 | 1.9480E-09 | 2.0973E-09 | 2.2365E-09 | 2.3965E-09 |
| 0.5 | 3.9181E-11 | 4.1983E-11 | 4.4986E-11 | 4.8203E-11 | 5.1651E-11 |
| 0.4 | 8.4446E-13 | 9.0485E-13 | 9.6957E-13 | 1.0389E-12 | 1.1132E-12 |
| 0.3 | 1.8200E-14 | 1.9502E-14 | 2.0897E-14 | 2.2391E-14 | 2.3953E-14 |
| 0.2 | 3.9226E-16 | 4.2032E-16 | 4.5038E-16 | 4.8259E-16 | 5.1710E-16 |
| 0.1 | 8.4543E-18 | 9.0590E-18 | 9.7069E-18 | 1.0401E-17 | 1.1145E-17 |
| 0.0 | 1.8221E-19 | 1.9524E-19 | 2.0921E-19 | 2.2417E-19 | 2.4020E-19 |
| -0.1 | 3.9272E-21 | 4.2090E-21 | 4.5090E-21 | 4.8315E-21 | 5.1770E-21 |
| -0.2 | 8.4641E-23 | 9.0694E-23 | 9.7180E-23 | 1.0413E-22 | 1.1158E-22 |
| -0.3 | 1.8242E-24 | 1.9547E-24 | 2.0945E-24 | 2.2443E-24 | 2.4048E-24 |
| -0.4 | 3.9317E-26 | 4.2129E-26 | 4.5142E-26 | 4.8370E-26 | 5.1830E-26 |
| -0.5 | 8.4738E-28 | 9.0798E-28 | 9.7292E-28 | 1.0425E-27 | 1.1171E-27 |
| -0.6 | 1.8263E-29 | 1.9569E-29 | 2.0969E-29 | 2.2469E-29 | 2.4076E-29 |
| E(0)= 1.44 | CL= 2.68 | CO3= 3.74 | SO4= 2.34 | | |
| EXPONENTE= 0.5 | | DIVIDENDO= 1 | | | |

El plomo es un elemento relativamente escaso en la naturaleza ($\approx 10^{-3}\%$ en peso) y se encuentra ampliamente distribuido en la atmósfera, tierra, océano y en el fondo de las aguas, es absorbido, acumulado y puede ser identificado en muchos tejidos de plantas y animales.

La forma físicoquímica del plomo es importante para determinar cualquier distribución del plomo en el medio ambiente y de aquí el impacto sobre el ecosistema acuático, por lo que seguidamente se dan algunos aspectos químicos de el plomo

Existen diversas sales de plomo $\text{II}(\text{Pb}^{2+})$, la mayor parte de las mismas son poco solubles (Pb F_2), (Pb Cl_2) o insolubles en agua (Pb Cr O_4 , Pb SO_4) con excepción del $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ y del $\text{Pb}(\text{O CO CH}_3)_2$ que se ioniza completamente.

Los haluros del Pb en el agua forman especies tales como PbX^- que en exceso de iones X^- y a pH ácido se forman $\text{Pb X}_n^{(n-2)}$.

El plomo forma halogenuros complejos como Pb Cl_6^{2-} , Pb F_6^{2-} , Pb_6^{2-} , que existen en solución, de los cuales el cloro y fluoro complejos se hidrolizan como facilidad.

Las soluciones de plomo (Pb^{2+}) en presencia del ión sulfuro -- (S^{2-}) dan PbS , todas las sales con excepción del PbS son solubles en exceso de iones OH^- para dar plumbatos. El hidróxido es un óxido hidratado no estequiométrico ($Pb(OH)_2$). El plomo es capaz de formar un óxido que contiene al metal en 2 estados de oxidación: II y III; se trata del óxido rojo llamado minio - (ref. 4).

Los compuestos organometálicos del plomo más importantes son - el tetraetilo $(CH_3 - CH_2)_4 Pb$ y el tetrametilo $(CH_3)_4 Pb$ que se emplean en la gasolina como antidetonantes, son líquidos -- viscosos y tóxico. El ión $(CH_3)_2 Pb^{2+}$ se forman fácilmente en solución acuosa. También forma complejos con amino ácidos, en la tabla 13 se dan algunos de ellos y sus constantes de estabilidad.

En la tabla 14 se da la especiación del plomo en aguas naturales, según la referencia (re. 17).

La figura 6 muestra las condiciones que pueden ser encontradas en un depósito de galena oxidada, con un total favorablemente alto de carbonato disuelto y azufre disuelto. El diagrama señala la aparición de hidrocerucita $(Pb_3(OH)_2(CO_3)_2)$ debido al-

**TABLA 13 CONSTANTES DE ESTABILIDAD DE COMPLEJOS
DE PLOMO (Log K_1)**

| | |
|---------------------|-------|
| EDTA | 18.3 |
| Cisteína (N-S) | 12.2 |
| Glicina (N-O) | 5.47 |
| Metionina | 4.4 |
| Histidina | 6.84 |
| Arginina | 4.65 |
| Glutacion | 10.60 |
| 8 hidroxiquinoleina | 9.62 |

TABLA 14 ESPECIES DE PLOMO EN AGUA

| | |
|--|--|
| Ion metálico libre | Pb^{2+} |
| Iones inorgánicos y complejos | $Pb H CO_3^+$; $Pb CO_3$ |
| Compuestos orgánicos quelatos y complejos | $Pb - EDTA$ $Pb - \text{ácidos fuluico y húmico}$ |
| Pb adsorbido sobre compuestos inorgánicos | $Pb - \text{arcillas, óxido (Fe, Mn)}$ |
| Precipitación y Coprecipitados | $Pb CO_3$, $Pb S$, $Pb_5 (PO_4)_3 Cl$ |

PLOMO

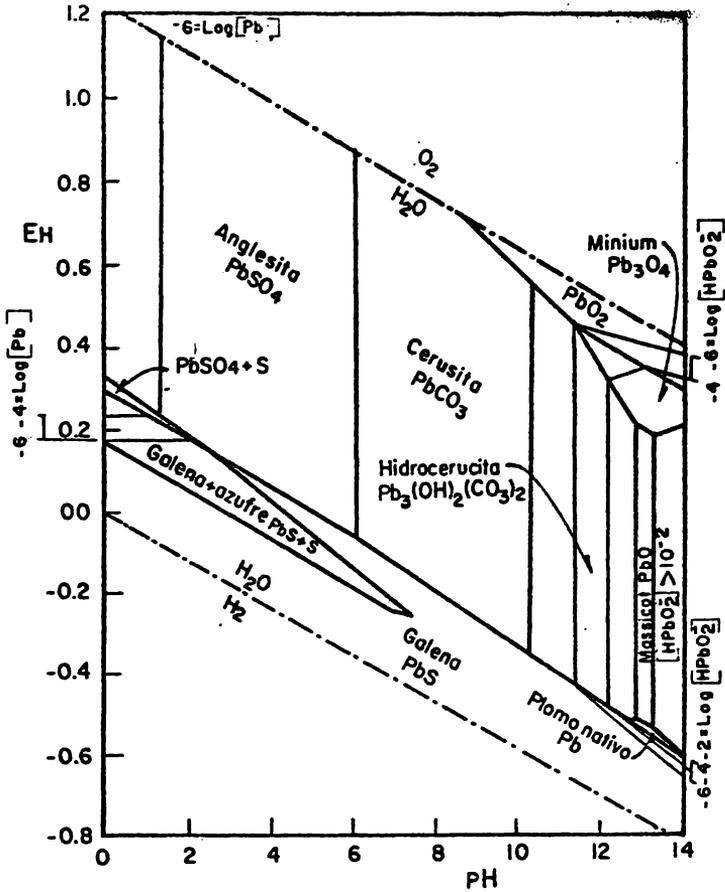


Fig 6 Relaciones de estabilidad entre compuesto del plomo en agua a 25°C y 1 atmósfera de presión total de especies de azufre disueltas = $10^{-1.5}$ total de carbonatos disueltos = 10^{-1}

contenido total de CO_2 del sistema y a valores altos de pH el hidrato carbonato puede competir con el carbonato normal ($\text{Pb} \cdot \text{CO}_3$). El diagrama también nos muestra el amplio campo que ocupa a pH bajos y condiciones oxidantes el sulfato de plomo o anglesita ($\text{Pb} \cdot \text{SO}_4$). El plomo nativo solo puede observarse a condiciones extremadamente reductoras y pH altos.

Se calcularon las solubilidades para las siguientes especies de plomo:

| | E_0 |
|-------------------------------|--------|
| Pb^{++} | 0.1269 |
| $\text{Pb} \cdot \text{SO}_4$ | 0.3563 |
| $\text{Pb} \cdot \text{CO}_3$ | 0.506 |
| $\text{Pb} \cdot \text{S}$ | 0.98 |
| $\text{Pb} \cdot 0$ | 0.576 |
| $\text{Pb} \cdot 0_2$ | 1.46 |

Siendo las ecuaciones para cada especie:

$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E - E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]$$



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/2}$$



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/2}$$



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/2}$$



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/2}$$



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o)(2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/2}$$

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 15, observándose el aumento de solubilidad con el pH y la disminución de la misma con el decremento de los valores de potencial.

TABLA 15. SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS DE Pb.

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE PB++ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|-------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 9.3110E+21 | 1.0725E+22 | 1.2314E+22 | 1.4138E+22 | 1.6233E+22 |
| 0.5 | 4.3390E+18 | 4.9819E+18 | 5.7199E+18 | 6.5674E+18 | 7.5464E+18 |
| 0.4 | 2.0155E+15 | 2.3142E+15 | 2.6570E+15 | 3.0506E+15 | 3.5026E+15 |
| 0.3 | 9.3625E+11 | 1.0750E+12 | 1.2342E+12 | 1.4171E+12 | 1.6270E+12 |
| 0.2 | 4.3490E+08 | 4.9933E+08 | 5.7331E+08 | 6.5825E+08 | 7.5577E+08 |
| 0.1 | 2.0202E+05 | 2.3195E+05 | -2.6631E+05 | 3.0577E+05 | 3.5167E+05 |
| 0.0 | 9.3841E+01 | 1.0774E+02 | 1.2371E+02 | 1.4203E+02 | 1.6368E+02 |
| -0.1 | 4.3590E-02 | 5.0049E-02 | 5.7463E-02 | 6.5977E-02 | 7.5722E-02 |
| -0.2 | 2.0248E-05 | 2.3243E-05 | 2.6693E-05 | 3.0647E-05 | 3.5188E-05 |
| -0.3 | 9.4057E-09 | 1.0799E-08 | 1.2399E-08 | 1.4236E-08 | 1.6345E-08 |
| -0.4 | 4.3691E-12 | 5.0164E-12 | 5.7596E-12 | 6.6129E-12 | 7.5926E-12 |
| -0.5 | 2.0295E-15 | 2.3302E-15 | 2.6754E-15 | 3.0718E-15 | 3.5269E-15 |
| -0.6 | 9.4274E-19 | 1.0824E-18 | 1.2428E-18 | 1.4269E-18 | 1.6363E-18 |

E(0)= 0.1269 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 1 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE PB EN PBO2 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 7.3408E-05 | 7.6864E-05 | 8.0483E-05 | 8.4272E-05 | 8.8239E-05 |
| 0.5 | 5.6997E-06 | 5.9681E-06 | 6.2490E-06 | 6.5433E-06 | 6.8513E-06 |
| 0.4 | 4.4255E-07 | 4.6339E-07 | 4.8520E-07 | 5.0805E-07 | 5.3197E-07 |
| 0.3 | 3.1362E-08 | 3.2961E-08 | 3.4673E-08 | 3.6417E-08 | 3.8201E-08 |
| 0.2 | 2.6680E-09 | 2.7936E-09 | 2.9251E-09 | 3.0629E-09 | 3.2071E-09 |
| 0.1 | 2.0716E-10 | 2.1691E-10 | 2.2712E-10 | 2.3781E-10 | 2.4901E-10 |
| 0.0 | 1.6085E-11 | 1.6842E-11 | 1.7635E-11 | 1.8465E-11 | 1.9334E-11 |
| -0.1 | 1.2489E-12 | 1.3077E-12 | 1.3692E-12 | 1.4337E-12 | 1.5012E-12 |
| -0.2 | 9.6968E-14 | 1.0153E-13 | 1.0631E-13 | 1.1132E-13 | 1.1656E-13 |
| -0.3 | 7.5291E-15 | 7.8835E-15 | 8.2547E-15 | 8.6433E-15 | 9.0503E-15 |
| -0.4 | 5.8459E-16 | 6.1211E-16 | 6.4093E-16 | 6.7111E-16 | 7.0270E-16 |
| -0.5 | 4.5390E-17 | 4.7527E-17 | 4.9765E-17 | 5.2108E-17 | 5.4561E-17 |
| -0.6 | 3.5243E-18 | 3.6902E-18 | 3.8640E-18 | 4.0459E-18 | 4.2364E-18 |

E(0)= 1.46 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.333 DIVIDENDO= 4

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE PB EN PBO EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 1.4425E+06 | 1.5457E+06 | 1.6563E+06 | 1.7747E+06 | 1.9016E+06 |
| 0.5 | 3.1091E+04 | 3.3014E+04 | 3.5697E+04 | 3.8250E+04 | 4.0965E+04 |
| 0.4 | 6.7008E+02 | 7.1801E+02 | 7.6936E+02 | 8.2438E+02 | 8.8344E+02 |
| 0.3 | 1.4442E+01 | 1.5475E+01 | 1.6582E+01 | 1.7768E+01 | 1.9038E+01 |
| 0.2 | 3.1126E-01 | 3.3302E-01 | 3.5703E-01 | 3.8274E-01 | 4.1023E-01 |
| 0.1 | 6.7086E-03 | 7.1883E-03 | 7.7024E-03 | 8.2533E-03 | 8.8436E-03 |
| 0.0 | 1.4459E-04 | 1.5493E-04 | 1.6601E-04 | 1.7789E-04 | 1.9060E-04 |
| -0.1 | 3.1162E-06 | 3.3391E-06 | 3.5779E-06 | 3.8338E-06 | 4.1060E-06 |
| -0.2 | 6.7163E-08 | 7.1966E-08 | 7.7113E-08 | 8.2628E-08 | 8.8538E-08 |
| -0.3 | 1.4475E-09 | 1.5511E-09 | 1.6626E-09 | 1.7809E-09 | 1.9082E-09 |
| -0.4 | 3.1198E-11 | 3.3423E-11 | 3.5820E-11 | 3.8382E-11 | 4.1127E-11 |
| -0.5 | 6.7240E-13 | 7.2049E-13 | 7.7202E-13 | 8.2732E-13 | 8.8640E-13 |
| -0.6 | 1.4492E-14 | 1.5528E-14 | 1.6639E-14 | 1.7829E-14 | 1.9164E-14 |

E(0)= 0.576 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

(CONTINUACION)

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE PB EN PBO4 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 6.6135E+09 | 7.0865E+09 | 7.5933E+09 | 8.1363E+09 | 8.7182E+09 |
| 0.5 | 1.4254E+08 | 1.5273E+08 | 1.6366E+08 | 1.7386E+08 | 1.8790E+08 |
| 0.4 | 3.0721E+06 | 3.2918E+06 | 3.5272E+06 | 3.7795E+06 | 4.0492E+06 |
| 0.3 | 6.6211E+04 | 7.0946E+04 | 7.6030E+04 | 8.1457E+04 | 8.7282E+04 |
| 0.2 | 1.4270E+03 | 1.5291E+03 | 1.6384E+03 | 1.7385E+03 | 1.8792E+03 |
| 0.1 | 3.0756E+01 | 3.2956E+01 | 3.5313E+01 | 3.7838E+01 | 4.0544E+01 |
| 0.0 | 6.6287E-01 | 7.1028E-01 | 7.6108E-01 | 8.1551E-01 | 8.7363E-01 |
| -0.1 | 1.4287E-02 | 1.5308E-02 | 1.6403E-02 | 1.7576E-02 | 1.8803E-02 |
| -0.2 | 3.0791E-04 | 3.2994E-04 | 3.5353E-04 | 3.7882E-04 | 4.0591E-04 |
| -0.3 | 6.6364E-06 | 7.1110E-06 | 7.6195E-06 | 8.1645E-06 | 8.7464E-06 |
| -0.4 | 1.4303E-07 | 1.5326E-07 | 1.6422E-07 | 1.7597E-07 | 1.8855E-07 |
| -0.5 | 3.0827E-09 | 3.3032E-09 | 3.5394E-09 | 3.7925E-09 | 4.0638E-09 |
| -0.6 | 6.6440E-11 | 7.1192E-11 | 7.6283E-11 | 8.1739E-11 | 8.7565E-11 |

E(0)= 0.3563 CL= 2.68 CO3= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE PB EN PBO3 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 2.1168E+07 | 2.2682E+07 | 2.4304E+07 | 2.6042E+07 | 2.7905E+07 |
| 0.5 | 4.3622E+05 | 4.6885E+05 | 5.0302E+05 | 5.3925E+05 | 5.7742E+05 |
| 0.4 | 9.8323E+03 | 1.0536E+04 | 1.1290E+04 | 1.2097E+04 | 1.2962E+04 |
| 0.3 | 2.1192E+02 | 2.2706E+02 | 2.4332E+02 | 2.6072E+02 | 2.7937E+02 |
| 0.2 | 4.5675E+00 | 4.8942E+00 | 5.2422E+00 | 5.6143E+00 | 6.0211E+00 |
| 0.1 | 9.8442E-02 | 1.0543E-01 | 1.1303E-01 | 1.2111E-01 | 1.2977E-01 |
| 0.0 | 2.1217E-03 | 2.2734E-03 | 2.4360E-03 | 2.6102E-03 | 2.7969E-03 |
| -0.1 | 4.5728E-05 | 4.8998E-05 | 5.2502E-05 | 5.6257E-05 | 6.0281E-05 |
| -0.2 | 9.8555E-07 | 1.0569E-06 | 1.1316E-06 | 1.2125E-06 | 1.2992E-06 |
| -0.3 | 2.1241E-08 | 2.2769E-08 | 2.4388E-08 | 2.6132E-08 | 2.8001E-08 |
| -0.4 | 4.5780E-10 | 4.9054E-10 | 5.2563E-10 | 5.6322E-10 | 6.0350E-10 |
| -0.5 | 9.8669E-12 | 1.0573E-11 | 1.1329E-11 | 1.2139E-11 | 1.3007E-11 |
| -0.6 | 2.1266E-13 | 2.2787E-13 | 2.4416E-13 | 2.6162E-13 | 2.8034E-13 |

E(0)= 0.586 CL= 2.68 CO3= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE PB EN PBO EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 2.0697E-01 | 2.2607E-01 | 2.4653E-01 | 2.6845E-01 | 2.9174E-01 |
| 0.5 | 5.7540E-03 | 6.1655E-03 | 6.6065E-03 | 7.0783E-03 | 7.5822E-03 |
| 0.4 | 1.6401E-04 | 1.7288E-04 | 1.8239E-04 | 1.9257E-04 | 2.0348E-04 |
| 0.3 | 2.6728E-06 | 2.8640E-06 | 3.0668E-06 | 3.2888E-06 | 3.5305E-06 |
| 0.2 | 5.7606E-08 | 6.1726E-08 | 6.6141E-08 | 7.0871E-08 | 7.5940E-08 |
| 0.1 | 1.2416E-09 | 1.3304E-09 | 1.4255E-09 | 1.5275E-09 | 1.6367E-09 |
| 0.0 | 2.6759E-11 | 2.8673E-11 | 3.0723E-11 | 3.2931E-11 | 3.5305E-11 |
| -0.1 | 5.7873E-13 | 6.1797E-13 | 6.6217E-13 | 7.0953E-13 | 7.6027E-13 |
| -0.2 | 1.2430E-14 | 1.3319E-14 | 1.4271E-14 | 1.5292E-14 | 1.6386E-14 |
| -0.3 | 2.6790E-16 | 2.8705E-16 | 3.0759E-16 | 3.2955E-16 | 3.5316E-16 |
| -0.4 | 5.7739E-18 | 6.1868E-18 | 6.6298E-18 | 7.1042E-18 | 7.6115E-18 |
| -0.5 | 1.2444E-19 | 1.3334E-19 | 1.4288E-19 | 1.5310E-19 | 1.6405E-19 |
| -0.6 | 2.6807E-21 | 2.8739E-21 | 3.0794E-21 | 3.2997E-21 | 3.5355E-21 |

E(0)= 0.98 CL= 2.68 CO3= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

Hierro.

Después del aluminio, el hierro es el metal más abundante en la corteza terrestre. Los minerales de hierro más importantes, son la hematita (Fe_2O_3), la magnetita (Fe_3O_4), la limonita - - ($\text{FeO}(\text{OH})$), la siderita (FeCO_3) y pirita FeS_2 .

El hierro en el aire húmedo se oxida rápidamente dando un óxido hidratado, se combina fácilmente con cloro. Se disuelve rápidamente en soluciones ácidas, en ausencia de aire y en soluciones ácidas no-oxidantes se encuentra Fe^{2+} , si hay aire o soluciones oxidantes se obtiene Fe^{3+} (ref. 4).

Se conocen tres óxidos de hierro FeO , Fe_2O_3 y Fe_3O_4 . El óxido férrico hidratado ($\text{FeO}(\text{OH})$), limonita se encuentra en la naturaleza, es un sólido de color rojo pardo. El óxido Fe_2O_3 también se encuentra en la naturaleza formando el mineral llamado hematita. Finalmente, tenemos Fe_3O_4 , un óxido mixto $\text{Fe}^{2+} - \text{Fe}^{3+}$ que se presenta en la naturaleza en forma de cristales negros en el mineral magnetita.

Se conocen los cuatro haluros del hierro Fe^{2+} (FeF_2 , FeCl_2 ,

FeBr_2 , FeI_2), los cuales son bastante solubles en agua. El hierro Fe^{2+} forma sales con prácticamente todos los aniones estables como son sulfato (Fe SO_4) y carbonato (Fe CO_3).

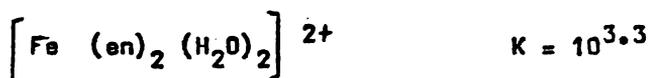
El carbonato (Fe CO_3), el hidróxido (Fe (OH)_2) y el sulfuro (FeS) pueden precipitar de soluciones acuosas de sales ferrosas. Tanto el carbonato como el hidróxido son blancos, pero en presencia de aire oscurecen debido a la oxidación. El Fe (OH)_2 puede convertirse completamente en $\text{Fe}_2 \text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ si se expone al aire durante tiempo prolongado. El sulfuro también sufre una lenta oxidación.

Las soluciones acuosas de hierro Fe^{2+} que no contienen otros agentes complejados, contienen al ión hexaquo hierro (II) - $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ que posee un color verde azulado pálido. En solución ácida el oxígeno puede convertir al ión ferroso Fe^{2+} en ión férrico Fe^{3+} , el proceso de oxidación es más favorable en solución alcalina, por lo que si se precipita hidróxido ferroso Fe (OH)_2 en presencia de aire se oscurece casi instantáneamente. Las soluciones neutras y ácidas de ión ferroso Fe^{2+} se oxidan más lentamente a medida que aumenta la acidez, a pesar de que el potencial de la reacción de oxidación se hace más positivo. Esto se debe a que el Fe^{3+} se encuentra formando hidroxo complejos, pero también puede haber razones cinéticas.

El Fe^{2+} forma numerosos complejos con compuestos orgánicos e inorgánicos, que generalmente son oxidados a complejos de Fe^{3+} .

La mayoría de los amino-complejos no son estables en el agua, solamente en soluciones saturadas de amoníaco. Se conocen algunos complejos estables en solución acuosa con aminas quelantes como ligando, por ejemplo la etilendiamina que forma:

(en) = etilendiamina



El complejo más importante del hierro Fe^{2+} es la proteína de la sangre llamada hemoglobina que tiene como función el transportar oxígeno (ref. 4).

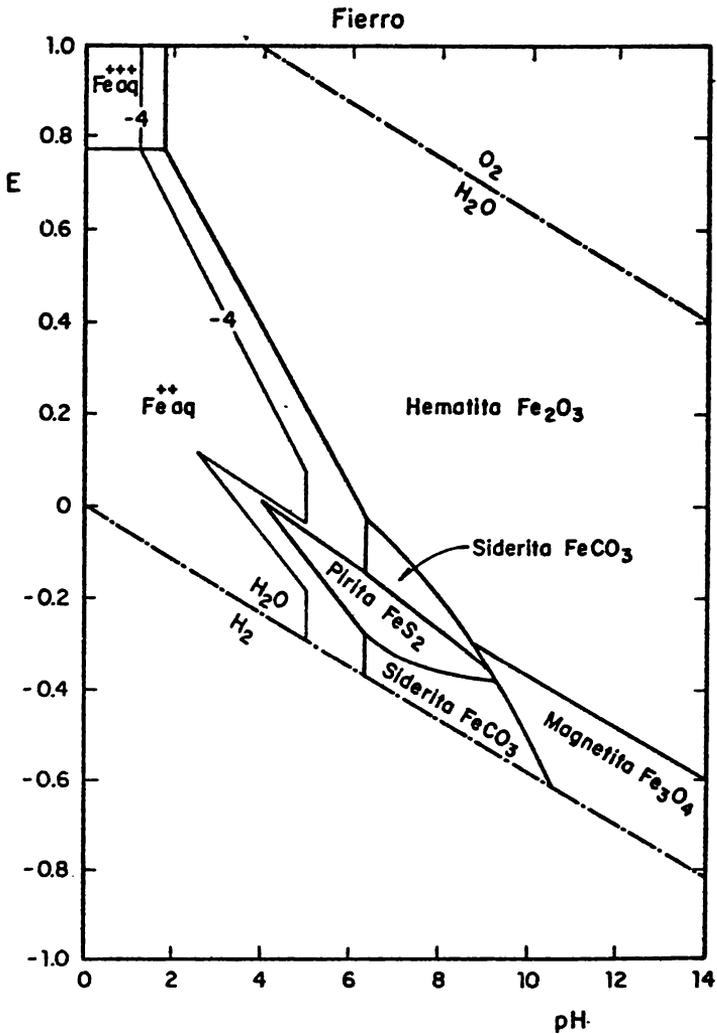
En aguas superficiales de la mayoría de las aguas naturales, las condiciones de pH y concentraciones de oxígeno son tales que si se descarga Fe^{2+} , rápidamente es oxidado a Fe^{3+} .

La formación de complejos orgánicos e inorgánicos con el ión Fe^{3+} puede elevar la estabilidad coloidal. Usualmente en aguas superficiales en las que se encuentran altas concentraciones de materia orgánica, también se encuentran cantidades sustanciales del ión férrico (Fe^{3+}).

Para la mayoría de las aguas naturales las concentraciones del ión férrico soluble se encuentran lejos del exceso predado por equilibrios de solubilidad que han sido reportados.

De aquí que una fracción substancial de hierro en muchas aguas se encuentra presente en forma suspendida o como complejo orgánico. (ref. 20).

En la figura 7 se muestran las relaciones de estabilidad varias especies del hierro, donde se muestra un considerable campo de pirita (FeS_2), señala también que la siderita (FeCO_3) puede estar a condiciones fuertemente reductoras o condiciones moderadamente reductoras y en presencia de grandes cantidades de mineral de hierro, aparentemente indica la ausencia esencial de azufre divalente en presencia de relativamente grandes can-



- 7 Relaciones de estabilidad de óxidos, sulfuros y carbonatos de hierro en agua a 25° C y 1 atmósfera de presión total. Azufre disuelto = 10^{-6} . total de carbonato disuelto 10^{-6} , señala la eliminación del campo de FeS por Fe_2CO_3 bajo condiciones fuertemente reductoras y la notable estabilidad de pirita en presencia de pequeñas cantidades de azufre disuelto

tidades de carbonatos disueltos. También nos muestra la gran estabilidad de las hematitas (Fe_2O_3) y la magnetita (Fe_3O_4) como también el campo del ión ferroso (Fe^{2+}).

Se calcularon solubilidades para las siguientes especies de hierro:

| | E_o |
|--------------------|-------|
| Fe^{++} | 0.44 |
| Fe | 0.036 |
| Fe CO_3 | 0.756 |
| Fe (OH)_2 | 0.877 |
| Fe S | 0.97 |
| Fe S_2 | 0.864 |

Siendo las ecuaciones para cada especie:

$$S = \left[\begin{array}{c} \text{Fe}^{++} \\ \text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o) (2)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \end{array} \right]$$

$$s = \left[\begin{array}{c} \text{Fe}^{+++} \\ \text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o) (3)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \end{array} \right]$$

Fe CO₃

$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o) (2)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right)}{\text{Fe (OH)}_2} \right]^{1/2}$$

$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o) (2)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right)}{4} \right]^{1/3}$$

Fe S

$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o) (2)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right)}{\text{Fe S}_2} \right]^{1/2}$$

$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_o) (2)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right)}{4} \right]^{1/3}$$

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 16.

Níquel:

El níquel se encuentra en la naturaleza en unión con arsénico,

TABLA 16 SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS DE Fe.

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE FE⁺⁺ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 9.2347E+10 | 1.8003E+11 | 1.2174E+11 | 1.0377E+11 | 1.0048E+11 |
| 0.5 | 4.2897E+07 | 4.9252E+07 | 5.6549E+07 | 6.4927E+07 | 7.4546E+07 |
| 0.4 | 1.9926E+04 | 2.2879E+04 | 2.6268E+04 | 3.0159E+04 | 3.4628E+04 |
| 0.3 | 9.2560E+00 | 1.0627E+01 | 1.2202E+01 | 1.4010E+01 | 1.6085E+01 |
| 0.2 | 4.2996E-03 | 4.9365E-03 | 5.6679E-03 | 6.5076E-03 | 7.4718E-03 |
| 0.1 | 1.9972E-06 | 2.2931E-06 | 2.6328E-06 | 3.0229E-06 | 3.4787E-06 |
| 0.0 | 9.2773E-10 | 1.0652E-09 | 1.2230E-09 | 1.4042E-09 | 1.6122E-09 |
| -0.1 | 4.3095E-13 | 4.9479E-13 | 5.6810E-13 | 6.5226E-13 | 7.4890E-13 |
| -0.2 | 2.0018E-16 | 2.2984E-16 | 2.6389E-16 | 3.0299E-16 | 3.4787E-16 |
| -0.3 | 9.2987E-20 | 1.0676E-19 | 1.2258E-19 | 1.4074E-19 | 1.6159E-19 |
| -0.4 | 4.3194E-23 | 4.9593E-23 | 5.6941E-23 | 6.5377E-23 | 7.5063E-23 |
| -0.5 | 2.0064E-26 | 2.3037E-26 | 2.6450E-26 | 3.0368E-26 | 3.4868E-26 |
| -0.6 | 9.3202E-30 | 1.0701E-29 | 1.2286E-29 | 1.4107E-29 | 1.6197E-29 |

E(0)= 0.44 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 1 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE FE⁺⁺⁺ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 6.8018E+33 | 7.8095E+33 | 8.9665E+33 | 1.0295E+34 | 1.1820E+34 |
| 0.5 | 6.8018E+28 | 7.8095E+28 | 8.9665E+28 | 1.0295E+29 | 1.1820E+29 |
| 0.4 | 6.8018E+23 | 7.8095E+23 | 8.9665E+23 | 1.0295E+24 | 1.1820E+24 |
| 0.3 | 6.8018E+18 | 7.8095E+18 | 8.9665E+18 | 1.0295E+19 | 1.1820E+19 |
| 0.2 | 6.8018E+13 | 7.8095E+13 | 8.9665E+13 | 1.0295E+14 | 1.1820E+14 |
| 0.1 | 6.8018E+08 | 7.8095E+08 | 8.9665E+08 | 1.0295E+09 | 1.1820E+09 |
| 0.0 | 6.8018E+03 | 7.8095E+03 | 8.9665E+03 | 1.0295E+04 | 1.1820E+04 |
| -0.1 | 6.8018E-02 | 7.8095E-02 | 8.9665E-02 | 1.0295E-01 | 1.1820E-01 |
| -0.2 | 6.8018E-07 | 7.8095E-07 | 8.9665E-07 | 1.0295E-06 | 1.1820E-06 |
| -0.3 | 6.8018E-12 | 7.8095E-12 | 8.9665E-12 | 1.0295E-11 | 1.1820E-11 |
| -0.4 | 6.8018E-17 | 7.8095E-17 | 8.9665E-17 | 1.0295E-16 | 1.1820E-16 |
| -0.5 | 6.8018E-22 | 7.8095E-22 | 8.9665E-22 | 1.0295E-21 | 1.1820E-21 |
| -0.6 | 6.8018E-27 | 7.8095E-27 | 8.9665E-27 | 1.0295E-26 | 1.1820E-26 |

E(0)= 0.036 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 1 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE FE EN PECOS EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 3.8912E+02 | 4.1695E+02 | 4.4677E+02 | 4.7872E+02 | 5.1296E+02 |
| 0.5 | 8.3365E+00 | 8.9863E+00 | 9.6290E+00 | 1.0318E+01 | 1.1056E+01 |
| 0.4 | 1.8975E-01 | 1.9368E-01 | 2.0753E-01 | 2.2237E-01 | 2.3838E-01 |
| 0.3 | 3.8957E-03 | 4.1743E-03 | 4.4728E-03 | 4.7927E-03 | 5.1355E-03 |
| 0.2 | 8.3962E-05 | 8.9967E-05 | 9.6401E-05 | 1.0330E-04 | 1.1082E-04 |
| 0.1 | 1.8096E-06 | 1.9390E-06 | 2.0777E-06 | 2.2263E-06 | 2.3855E-06 |
| 0.0 | 3.9082E-08 | 4.1791E-08 | 4.4780E-08 | 4.7983E-08 | 5.1414E-08 |
| -0.1 | 8.4059E-10 | 9.0071E-10 | 9.6512E-10 | 1.0341E-09 | 1.1081E-09 |
| -0.2 | 1.8117E-11 | 1.9413E-11 | 2.0801E-11 | 2.2289E-11 | 2.3863E-11 |
| -0.3 | 3.9047E-13 | 4.1839E-13 | 4.4831E-13 | 4.8038E-13 | 5.1473E-13 |
| -0.4 | 8.4156E-15 | 9.0174E-15 | 9.6624E-15 | 1.0353E-14 | 1.1094E-14 |
| -0.5 | 1.8138E-16 | 1.9435E-16 | 2.0825E-16 | 2.2314E-16 | 2.3910E-16 |
| -0.6 | 3.9092E-18 | 4.1887E-18 | 4.4883E-18 | 4.8093E-18 | 5.1533E-18 |

E(0)= 0.756 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

(CONTINUACION)

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE FE EN FE(OH)2 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 5.8125E+01 | 6.0864E+01 | 6.3732E+01 | 6.6736E+01 | 6.98E1E+01 |
| 0.5 | 4.5027E+00 | 4.7149E+00 | 4.9371E+00 | 5.1698E+00 | 5.4134E+00 |
| 0.4 | 3.4881E-01 | 3.6525E-01 | 3.8246E-01 | 4.0048E-01 | 4.1935E-01 |
| 0.3 | 2.7021E-02 | 2.8294E-02 | 2.9627E-02 | 3.1024E-02 | 3.2466E-02 |
| 0.2 | 2.0932E-03 | 2.1918E-03 | 2.2951E-03 | 2.4033E-03 | 2.5165E-03 |
| 0.1 | 1.6215E-04 | 1.6979E-04 | 1.7779E-04 | 1.8617E-04 | 1.9495E-04 |
| 0.0 | 1.2561E-05 | 1.3153E-05 | 1.3773E-05 | 1.4422E-05 | 1.5102E-05 |
| -0.1 | 9.7307E-07 | 1.0189E-06 | 1.0669E-06 | 1.1172E-06 | 1.1699E-06 |
| -0.2 | 7.5380E-08 | 7.8932E-08 | 8.2651E-08 | 8.6546E-08 | 9.0624E-08 |
| -0.3 | 5.6394E-09 | 6.1145E-09 | 6.4027E-09 | 6.7040E-09 | 7.0200E-09 |
| -0.4 | 4.5235E-10 | 4.7367E-10 | 4.9599E-10 | 5.1936E-10 | 5.4384E-10 |
| -0.5 | 3.5042E-11 | 3.6693E-11 | 3.8422E-11 | 4.0233E-11 | 4.2129E-11 |
| -0.6 | 2.7146E-12 | 2.8425E-12 | 2.9764E-12 | 3.1167E-12 | 3.2635E-12 |

E(0)= 0.877 CL= 2.68 CO3= 3.74 S04= 2.34
EXPONENTE= 0.3333 DIVIDENDO= 4

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE FE EN FES EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 1.0560E-01 | 1.1318E-01 | 1.2128E-01 | 1.2995E-01 | 1.3924E-01 |
| 0.5 | 2.2765E-03 | 2.4393E-03 | 2.6138E-03 | 2.8007E-03 | 3.0010E-03 |
| 0.4 | 4.9905E-05 | 5.2574E-05 | 5.6334E-05 | 6.0363E-05 | 6.4680E-05 |
| 0.3 | 1.0975E-06 | 1.1331E-06 | 1.2142E-06 | 1.3010E-06 | 1.3940E-06 |
| 0.2 | 2.2792E-08 | 2.4422E-08 | 2.6168E-08 | 2.8040E-08 | 3.0045E-08 |
| 0.1 | 4.9122E-10 | 5.2635E-10 | 5.6399E-10 | 6.0433E-10 | 6.4755E-10 |
| 0.0 | 1.0587E-11 | 1.1344E-11 | 1.2156E-11 | 1.3025E-11 | 1.3956E-11 |
| -0.1 | 2.3918E-13 | 2.4450E-13 | 2.6198E-13 | 2.8072E-13 | 3.0080E-13 |
| -0.2 | 4.9178E-15 | 5.2695E-15 | 5.6464E-15 | 6.0502E-15 | 6.4830E-15 |
| -0.3 | 1.0599E-16 | 1.1357E-16 | 1.2170E-16 | 1.3040E-16 | 1.3972E-16 |
| -0.4 | 2.2844E-18 | 2.4478E-18 | 2.6228E-18 | 2.8164E-18 | 3.0114E-18 |
| -0.5 | 4.9235E-20 | 5.2756E-20 | 5.6529E-20 | 6.0572E-20 | 6.4904E-20 |
| -0.6 | 1.0511E-21 | 1.1370E-21 | 1.2184E-21 | 1.3055E-21 | 1.3969E-21 |

E(0)= 0.97 CL= 2.68 CO3= 3.74 S04= 2.34
EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE FE EN FES2 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|-------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 9.1055E+01 | 9.4875E+01 | 9.8874E+01 | 1.03062E+01 | 9.7448E+01 |
| 0.5 | 6.2790E+00 | 6.5749E+00 | 6.8847E+00 | 7.2092E+00 | 7.5469E+00 |
| 0.4 | 4.8641E-01 | 5.0933E-01 | 5.3333E-01 | 5.5847E-01 | 5.8478E-01 |
| 0.3 | 3.7680E-02 | 3.9456E-02 | 4.1315E-02 | 4.3262E-02 | 4.5301E-02 |
| 0.2 | 2.9189E-03 | 3.0565E-03 | 3.2005E-03 | 3.3513E-03 | 3.5093E-03 |
| 0.1 | 2.2612E-04 | 2.3677E-04 | 2.4793E-04 | 2.5962E-04 | 2.7165E-04 |
| 0.0 | 1.7516E-05 | 1.8342E-05 | 1.9206E-05 | 2.0111E-05 | 2.1059E-05 |
| -0.1 | 1.3569E-06 | 1.4209E-06 | 1.4878E-06 | 1.5579E-06 | 1.6314E-06 |
| -0.2 | 1.0512E-07 | 1.1007E-07 | 1.1526E-07 | 1.2069E-07 | 1.2637E-07 |
| -0.3 | 8.1429E-09 | 8.5266E-09 | 8.9285E-09 | 9.3492E-09 | 9.7898E-09 |
| -0.4 | 5.3080E-10 | 6.0053E-10 | 6.9165E-10 | 7.2424E-10 | 7.5837E-10 |
| -0.5 | 4.8866E-11 | 5.1163E-11 | 5.3579E-11 | 5.6104E-11 | 5.8748E-11 |
| -0.6 | 3.7854E-12 | 3.9613E-12 | 4.1506E-12 | 4.3462E-12 | 4.5510E-12 |

E(0)= 0.864 CL= 2.68 CO3= 3.74 S04= 2.34
EXPONENTE= 0.3333 DIVIDENDO= 4



FACULTAD DE
QUIMICA

antimonio y azufre en el mineral millerita (NiS), (NiAs), también existe en combinaciones como NiSb , NiAs_2 , NiAsS o NiSbS . Los depósitos más importantes son los del mineral garnierita, que es un silicato de magnesio y níquel. También se encuentra níquel elemental (Ni^0) aleado con hierro, en numerosos meteoritos.

El metal es moderadamente electropositivo, se disuelve en ácidos minerales diluidos, no se disuelve en ácido nítrico (HNO_3) concentrado porque este reactivo lo pasiva.

La estabilidad de los estados de oxidación más altos disminuye en el níquel, por lo que la química común de éste elemento está relacionado solo con Ni^{2+} , pero en ciertos sistemas de óxidos y en algunos complejos se encuentra Ni^{3+} y Ni^{4+} . Los compuestos de Ni^0 y Ni^{1+} también son escasos.

El estado divalente (Ni^{2+}), el níquel forma un gran número de compuestos. En solución acuosa, el estado de oxidación $2+$ es el único estado más importante del níquel.

El óxido de níquel II (NiO), es un sólido de color verde, es insoluble en agua pero se disuelve fácilmente en soluciones ácidas.

El hidróxido de níquel ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) puede precipitarse de soluciones acuosas de sales de Ni^{2+} en presencia de hidróxidos alcalinos, se trata de un gel verde, voluminoso, es fácilmente soluble en soluciones ácidas y también en soluciones acuosas de amoníaco debido a la formación de aminas complejas. La solubilidad del $\text{Ni}(\text{OH})_2$ en agua pura es de 5.6×10^{-3} g/lt. y --
 $K_{ps} = 2 \times 10^{-16}$.

En presencia de iones sulfuro (S^{2-}) en solución acuosa de Ni^{2+} , precipita NiS de color negro. tiene una solubilidad de 1.7×10^{-9} g/lt. Inicialmente, el sulfuro de níquel es muy soluble en soluciones ácidas, pero al quedar expuesto al aire se vuelve rápidamente insoluble, por oxidación a $(\text{Ni}(\text{OH})\text{S})$ hidroxisulfuro de níquel.

Se conocen los cuatro haluros del níquel (Ni F_2 , Ni Cl_2 , Ni Br_2 , Ni I_2), todos son solubles en agua, por ejemplo el cloruro de níquel (Ni Cl_2) tiene una solubilidad de 642 g/lt.

Las sales de oxo-ácidos del níquel, tales como, carbonato, sulfatos, nitratos son la mayoría solubles en agua con excepción del carbonato que en soluciones alcalinas precipita.

Las soluciones acuosas de Ni^{2+} que no contienen agentes acomplejantes energicos contienen el ion hexacuoniquel (II) $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, de color verde, que es bastante labil como la mayoria de los complejos del Ni^{2+} (ref. 4).

En la fig 8 se muestran las relaciones del sistema Ni y agua con azufre y CO_2 disuelto. El diagrama nos indica que el sulfuro de niquel (Ni S) es estable sobre un rango de pH amplio bajo condiciones reductoras, los oxidos de niquel e hidroxidos (NiO_2 , Ni_2O_3 , Ni_3O_4 y $\text{Ni}(\text{OH})_2$), en cambio, son relativamente solubles como esta indicado por el gran campo de Ni^{2+} bajo condiciones acidos y NiO_2H^- bajo condiciones alcalinas. Muestra tambien los efectos del incremento total de azufre con la aparicion de un campo de azufre nativo y un alargamiento del area ocupada por (Ni S) sulfuro de niquel (Ref. 10).

Se calcularon solubilidades para las siguientes especies de niquel:

Ni^{++}

E_0 (Volts)

0.250

TABLA 17 SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS DE Ni.

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE NI++ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 2.0884E+17 | 2.3978E+17 | 2.7530E+17 | 3.1609E+17 | 3.6292E+17 |
| 0.5 | 9.7009E+13 | 1.1138E+14 | 1.2788E+14 | 1.4683E+14 | 1.6858E+14 |
| 0.4 | 4.5062E+10 | 5.1733E+10 | 5.9404E+10 | 6.8204E+10 | 7.8309E+10 |
| 0.3 | 2.0932E+07 | 2.4033E+07 | 2.7594E+07 | 3.1682E+07 | 3.6376E+07 |
| 0.2 | 9.7233E+03 | 1.1164E+04 | 1.2818E+04 | 1.4717E+04 | 1.6857E+04 |
| 0.1 | 4.5166E+00 | 5.1856E+00 | 5.9546E+00 | 6.8362E+00 | 7.8490E+00 |
| 0.0 | 2.0980E-03 | 2.4089E-03 | 2.7657E-03 | 3.1755E-03 | 3.6460E-03 |
| -0.1 | 9.7457E-07 | 1.1190E-06 | 1.2847E-06 | 1.4751E-06 | 1.6936E-06 |
| -0.2 | 4.5270E-10 | 5.1977E-10 | 5.9678E-10 | 6.8519E-10 | 7.8671E-10 |
| -0.3 | 2.1029E-13 | 2.4144E-13 | 2.7721E-13 | 3.1829E-13 | 3.6544E-13 |
| -0.4 | 9.7681E-17 | 1.1215E-16 | 1.2877E-16 | 1.4785E-16 | 1.6975E-16 |
| -0.5 | 4.5375E-20 | 5.2097E-20 | 5.9815E-20 | 6.8677E-20 | 7.8852E-20 |
| -0.6 | 2.1077E-23 | 2.4200E-23 | 2.7785E-23 | 3.1902E-23 | 3.6628E-23 |

E(0)= 0.25 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 1 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE NI EN NICO3 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 5.1435E+07 | 5.5114E+07 | 5.9056E+07 | 6.3279E+07 | 6.7805E+07 |
| 0.5 | 1.1086E+06 | 1.1879E+06 | 1.2728E+06 | 1.3638E+06 | 1.4614E+06 |
| 0.4 | 2.3893E+04 | 2.5601E+04 | 2.7432E+04 | 2.9394E+04 | 3.1496E+04 |
| 0.3 | 5.1495E+02 | 5.5178E+02 | 5.9124E+02 | 6.3352E+02 | 6.7883E+02 |
| 0.2 | 1.1098E+01 | 1.1892E+01 | 1.2743E+01 | 1.3654E+01 | 1.4631E+01 |
| 0.1 | 2.3920E-01 | 2.5631E-01 | 2.7464E-01 | 2.9428E-01 | 3.1533E-01 |
| 0.0 | 5.1554E-03 | 5.5241E-03 | 5.9192E-03 | 6.3425E-03 | 6.7961E-03 |
| -0.1 | 1.1111E-04 | 1.1906E-04 | 1.2757E-04 | 1.3670E-04 | 1.4647E-04 |
| -0.2 | 2.3948E-06 | 2.5669E-06 | 2.7496E-06 | 2.9462E-06 | 3.1569E-06 |
| -0.3 | 5.1613E-08 | 5.5305E-08 | 5.9260E-08 | 6.3498E-08 | 6.8040E-08 |
| -0.4 | 1.1124E-09 | 1.1920E-09 | 1.2772E-09 | 1.3686E-09 | 1.4664E-09 |
| -0.5 | 2.3975E-11 | 2.5690E-11 | 2.7527E-11 | 2.9496E-11 | 3.1605E-11 |
| -0.6 | 5.1673E-13 | 5.5368E-13 | 5.9328E-13 | 6.3571E-13 | 6.8118E-13 |

E(0)= 0.45 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE NI EN NICOH2 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 3.3983E+03 | 3.5583E+03 | 3.7258E+03 | 3.9013E+03 | 4.0849E+03 |
| 0.5 | 2.6386E+02 | 2.7628E+02 | 2.8929E+02 | 3.0291E+02 | 3.1717E+02 |
| 0.4 | 2.0487E+01 | 2.1452E+01 | 2.2462E+01 | 2.3519E+01 | 2.4627E+01 |
| 0.3 | 1.5907E+00 | 1.6656E+00 | 1.7440E+00 | 1.8262E+00 | 1.9121E+00 |
| 0.2 | 1.2351E-01 | 1.2933E-01 | 1.3542E-01 | 1.4179E-01 | 1.4847E-01 |
| 0.1 | 9.5900E-03 | 1.0042E-02 | 1.0514E-02 | 1.1009E-02 | 1.1528E-02 |
| 0.0 | 7.4451E-04 | 7.7967E-04 | 8.1638E-04 | 8.5481E-04 | 8.9506E-04 |
| -0.1 | 5.7815E-05 | 6.0537E-05 | 6.3387E-05 | 6.6371E-05 | 6.9456E-05 |
| -0.2 | 4.4890E-06 | 4.7004E-06 | 4.9217E-06 | 5.1534E-06 | 5.3960E-06 |
| -0.3 | 3.4855E-07 | 3.6496E-07 | 3.8214E-07 | 4.0013E-07 | 4.1897E-07 |
| -0.4 | 2.7063E-08 | 2.8337E-08 | 2.9671E-08 | 3.1068E-08 | 3.2531E-08 |
| -0.5 | 2.1013E-09 | 2.2002E-09 | 2.3033E-09 | 2.4123E-09 | 2.5288E-09 |
| -0.6 | 1.6315E-10 | 1.7083E-10 | 1.7888E-10 | 1.8730E-10 | 1.9612E-10 |

E(0)= 0.72 CL= 2.68 CO3= 3.74 SO4= 2.34
 EXPONENTE= 0.333 DIVIDENDO= 4

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE NI EN NIS EN AGUA DE RIO (CONTINUACION)

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 2.3909E+01 | 2.5619E+01 | 2.7451E+01 | 2.9415E+01 | 3.1518E+01 |
| 0.5 | 5.1530E-01 | 5.5216E-01 | 5.9165E-01 | 6.3396E-01 | 6.7930E-01 |
| 0.4 | 1.1106E-02 | 1.1900E-02 | 1.2752E-02 | 1.3664E-02 | 1.4641E-02 |
| 0.3 | 2.3937E-04 | 2.5649E-04 | 2.7483E-04 | 2.9448E-04 | 3.1555E-04 |
| 0.2 | 5.1590E-06 | 5.5279E-06 | 5.9233E-06 | 6.3469E-06 | 6.8028E-06 |
| 0.1 | 1.1119E-07 | 1.1914E-07 | 1.2766E-07 | 1.3679E-07 | 1.4656E-07 |
| 0.0 | 2.3964E-09 | 2.5678E-09 | 2.7515E-09 | 2.9482E-09 | 3.1591E-09 |
| -0.1 | 5.1649E-11 | 5.5343E-11 | 5.9301E-11 | 6.3542E-11 | 6.8067E-11 |
| -0.2 | 1.1132E-12 | 1.1923E-12 | 1.2781E-12 | 1.3695E-12 | 1.4674E-12 |
| -0.3 | 2.3992E-14 | 2.5703E-14 | 2.7546E-14 | 2.9516E-14 | 3.1627E-14 |
| -0.4 | 5.1709E-16 | 5.5407E-16 | 5.9369E-16 | 6.3615E-16 | 6.8165E-16 |
| -0.5 | 1.1145E-17 | 1.1942E-17 | 1.2796E-17 | 1.3711E-17 | 1.4691E-17 |
| -0.6 | 2.4019E-19 | 2.5737E-19 | 2.7578E-19 | 2.9550E-19 | 3.1664E-19 |

E(0)= 0.83 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 17.

Cadmio

El cadmio es relativamente un elemento raro y se encuentra generalmente asociado a minerales de zinc, en cantidades muy pequeñas, también se encuentra presente en pequeñas cantidades en el agua de mar y en un amplio rango de animales y plantas - igual que Hg y Pb, su función biológica no ha sido definida - (ref. 26).

La química del cadmio es esencialmente similar a la del Zn, - siendo metales bastante electropositivos. El cadmio reacciona con ácido no oxidantes con liberación de hidrógeno y la formación del ión divalente, Cd^{2+} , no reacciona con las bases en forma apreciable (ref 4).

El hidróxido de cadmio $Cd(OH)_2$ precipita en soluciones de sus sales por la presencia de bases, su producto de solubilidad es $K_{ps} = 10^{-14}$. El sulfuro CdS es un sólido cristalino insoluble en agua y se puede formar con facilidad por la afinidad del cadmio por el azufre (ref. 4).

| | Solubilidad en Agua moles/lt. | Punto de Fusión °C | Punto de Ebullición °C |
|--------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Cd F ₂ | 0.29 (25 °C) | 1110 | 1747 |
| Cd Cl ₂ | 7.7 (25 °C) | 868 | 980 |
| Cd Br ₂ | 4.2 (20 °C) | 568 | 1136 |
| Cd I ₂ | 2.3 (20 °C) | 387 | (sublima) |

TABLA 19 ALGUNAS CONSTANTES DE FORMACION DE HALO. COMPLEJOS DE Cd
(A 25°C)

| Halógeno | Log K ₁ | Log K ₂ | Log K ₃ | Log K ₄ | Medio |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| F | 0.46 | 0.07 | No. obs. | No. obs. | 1.0 M Na ClO ₄ |
| Cl | 1.77 | 1.45 | - 0.25 | - 0.05 | 2.1 M K NO ₃ |
| Br | 1.97 | 1.25 | 0.24 | 0.15 | 1 M K NO ₃ |
| I | 2.96 | 1.33 | 1.07 | 1.00 | 1.6 M K NO ₃ |

De los haluros del cadmio el fluoruro, Cd F_2 , es el menos soluble en agua, el incremento de solubilidad de los otros haluros, Cd Cl_2 , Cd Br_2 , Cd I_2 , se debe en parte a la formación de halocomplejos en solución. En la tabla 18 se mencionan algunas propiedades de los haluros del cadmio.

La exactitud de los valores de constantes de equilibrio de halocomplejos del cadmio (Tabla 19) carece de importancia ya que -- los efectos de fuerzas iónicas son muy grandes y solo pueden efectuarse consideraciones cualitativas.

Se sabe que las soluciones acuosas de los haluros de cadmio se comportan, desde un punto de vista superficial, como si se encontraran disociados en forma incompleta, es decir como electrolitos débiles, por lo tanto, estas soluciones se consideran como sistemas que contienen todas las especies posibles en equilibrio (ref. 4).

Otras sales de cadmio como nitrato Cd NO_3 , sulfato Cd SO_4 , sulfito Cd SO_3 , son solubles en agua, por ejemplo el sulfato de cadmio tiene una solubilidad en agua de 770 g/lt.

El cadmio en solución acuosa tiene una pronunciada tendencia a

TABLA 20
 CONSTANTES DE EQUILIBRIO
 PARA COMPLEJOS DE CADMIO

| Log ₍₁₀₎ de Constantes de Equilibrio | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| Ligando | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 | K_6 | Condiciones |
| OII ⁻ | 4.16 | 4.23 | 0.69 | -0.32 | — | — | Fuerza Ionica Cero 25°C |
| Cl ⁻ | 1.32 | 0.90 | 0.09 | -0.45 | — | — | 4.5 M NaClO ₄ , 25°C |
| NH ₃ | 2.65 | 2.10 | 1.44 | 0.93 | -0.32 | -1.66 | 2 M NH ₄ NO ₃ , 25°C |

| Constantes de Formación Totales | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---|
| Ligando | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 | β_6 | Condiciones |
| OII ⁻ | 1.45·10 ⁴ | 2.46·10 ⁸ | 1.20·10 ⁹ | 5.76·10 ⁸ | — | — | Fuerza Ionica Cero 25°C |
| Cl ⁻ | 21.0 | 166.0 | 204.0 | 71.5 | — | — | 4.5 M NaClO ₄ , 25°C |
| NH ₃ | 4.47·10 ² | 5.63·10 ⁴ | 1.55·10 ⁶ | 1.32·10 ⁷ | 6.31·10 ⁶ | 1.38·10 ⁵ | 2 M NH ₄ NO ₃ , 25°C |

TABLA 21

CONSTANTES DE ESTABILIDAD DE COMPLEJOS. 1:1

| LIGANDO | (Log K_1) |
|---|--------------|
| NH_3 | 2.51 |
| Imidazol | 2.80 |
| EDTA | 16.6 |
| Etilendiamina (N-N) | 5.5 |
| Glicina | 4.8 |
| Metionina | 3.88 |
| Histidina | 5.65 |
| Arginina | 3.31 |
| Glutation | 10.50 |
| 8 - Hidroxinoleina | 7.78 |
| Tris (2-amino-2-(hidroximetil)- 1, 3-propanediol | 2.22 |

formar complejos solubles con ligandos orgánicos e inorgánicos. Son de particular interés para sistemas de aguas naturales y de deshecho industrial, los complejos formados por la combinación con hidróxido, cloruro y amoníaco. En la tabla 20 se encuentran las constantes de equilibrio de estas especies (ref.21).

Los complejos de cadmio con aminoácido y péptidos se encuentran en la tabla 21 donde se observa por los valores de las constantes de equilibrio que el cadmio se encuentra más firmemente unido a grupos de azufre libre que a ligandos de oxígeno y nitrógeno (ref.26).

Los compuestos organometálicos del cadmio $R_2 Cd$ son líquidos no polares o sólidos de bajo punto de fusión, solubles en la mayoría de los líquidos orgánicos e insolubles en agua.

Se calcularon solubilidades para las siguientes especies de cadmio:

| | E_0 |
|-------------|-------|
| Cd^{++} | 0.403 |
| $Cd CO_3$ | 0.740 |
| $Cd (OH)_2$ | 0.809 |

Cd S

1.24

Siendo las ecuaciones para cada especie:

Cd⁺⁺

$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right) \right]$$

Cd CO₃

$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right) \right]^{1/2}$$

Cd (OH)₂

$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right)}{4} \right]^{1/3}$$

Cd S

$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (2)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right) \right]^{1/2}$$

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 22.

TABLA 22 SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS DE Cd.

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CD++ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 3.1796E+12 | 3.6507E+12 | 4.1916E+12 | 4.8126E+12 | 5.5256E+12 |
| 0.5 | 1.4770E+09 | 1.6959E+09 | 1.9470E+09 | 2.2355E+09 | 2.5667E+09 |
| 0.4 | 6.8608E+05 | 7.8773E+05 | 9.0443E+05 | 1.0384E+06 | 1.1923E+06 |
| 0.3 | 3.1870E+02 | 3.6591E+02 | 4.2012E+02 | 4.8237E+02 | 5.5383E+02 |
| 0.2 | 1.4304E-01 | 1.6997E-01 | 1.9515E-01 | 2.2407E-01 | 2.5765E-01 |
| 0.1 | 6.8766E-05 | 7.8954E-05 | 9.0652E-05 | 1.0408E-04 | 1.1950E-04 |
| 0.0 | 3.1943E-08 | 3.6676E-08 | 4.2109E-08 | 4.8348E-08 | 5.5511E-08 |
| -0.1 | 1.4838E-11 | 1.7036E-11 | 1.9560E-11 | 2.2458E-11 | 2.5766E-11 |
| -0.2 | 6.8925E-15 | 7.9136E-15 | 9.0861E-15 | 1.0432E-14 | 1.1978E-14 |
| -0.3 | 3.2017E-18 | 3.6760E-18 | 4.2206E-18 | 4.8459E-18 | 5.5639E-18 |
| -0.4 | 1.4872E-21 | 1.7076E-21 | 1.9605E-21 | 2.2510E-21 | 2.5845E-21 |
| -0.5 | 6.9084E-25 | 7.9319E-25 | 9.1070E-25 | 1.0456E-24 | 1.2025E-24 |
| -0.6 | 3.2090E-28 | 3.6845E-28 | 4.2304E-28 | 4.8571E-28 | 5.5767E-28 |

E(0)= 0.403 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 1 DIVIDENDO= 1

(CONTINUACION)

SOLUBILIDAD DE CD EN CDC03 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| .6 | 1.4470E+03 | 1.5505E+03 | 1.6614E+03 | 1.7802E+03 | 1.9075E+03 |
| .5 | 3.1186E+01 | 3.3417E+01 | 3.5807E+01 | 3.8368E+01 | 4.1113E+01 |
| .4 | 6.7215E-01 | 7.2022E-01 | 7.7173E-01 | 8.2693E-01 | 8.8607E-01 |
| .3 | 1.4487E-02 | 1.5523E-02 | 1.6633E-02 | 1.7822E-02 | 1.9057E-02 |
| .2 | 3.1222E-04 | 3.3455E-04 | 3.5848E-04 | 3.8412E-04 | 4.1159E-04 |
| .1 | 6.7292E-06 | 7.2105E-06 | 7.7262E-06 | 8.2768E-06 | 8.8709E-06 |
| .0 | 1.4503E-07 | 1.5541E-07 | 1.6652E-07 | 1.7843E-07 | 1.9119E-07 |
| .1 | 3.1258E-09 | 3.3494E-09 | 3.5889E-09 | 3.8456E-09 | 4.1267E-09 |
| .2 | 6.7370E-11 | 7.2188E-11 | 7.7351E-11 | 8.2883E-11 | 8.8811E-11 |
| .3 | 1.4520E-12 | 1.5559E-12 | 1.6671E-12 | 1.7863E-12 | 1.9141E-12 |
| .4 | 3.1294E-14 | 3.3533E-14 | 3.5931E-14 | 3.8500E-14 | 4.1254E-14 |
| .5 | 6.7448E-16 | 7.2271E-16 | 7.7440E-16 | 8.2979E-16 | 8.8913E-16 |
| .6 | 1.4537E-17 | 1.5576E-17 | 1.6690E-17 | 1.7884E-17 | 1.9163E-17 |

E(0)= 0.74 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

) (CONTINUACION)

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CD EN CD(OH)2 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 6.6606E+02 | 6.9745E+02 | 7.3031E+02 | 7.6473E+02 | 8.0076E+02 |
| 0.5 | 5.1597E+01 | 5.4023E+01 | 5.6574E+01 | 5.9240E+01 | 6.2032E+01 |
| 0.4 | 3.9970E+00 | 4.1854E+00 | 4.3826E+00 | 4.5891E+00 | 4.8054E+00 |
| 0.3 | 3.0963E-01 | 3.2422E-01 | 3.3950E-01 | 3.5500E-01 | 3.7225E-01 |
| 0.2 | 2.3986E-02 | 2.5116E-02 | 2.6300E-02 | 2.7539E-02 | 2.8837E-02 |
| 0.1 | 1.8581E-03 | 1.9457E-03 | 2.0373E-03 | 2.1333E-03 | 2.2339E-03 |
| 0.0 | 1.4394E-04 | 1.5072E-04 | 1.5762E-04 | 1.6526E-04 | 1.7365E-04 |
| -0.1 | 1.1150E-05 | 1.1676E-05 | 1.2226E-05 | 1.2802E-05 | 1.3405E-05 |
| -0.2 | 8.6378E-07 | 9.0448E-07 | 9.4710E-07 | 9.9173E-07 | 1.0385E-06 |
| -0.3 | 6.6913E-08 | 7.0066E-08 | 7.3360E-08 | 7.6826E-08 | 8.0446E-08 |
| -0.4 | 5.1835E-09 | 5.4278E-09 | 5.6835E-09 | 5.9514E-09 | 6.2318E-09 |
| -0.5 | 4.0155E-10 | 4.2047E-10 | 4.4028E-10 | 4.6103E-10 | 4.8275E-10 |
| -0.6 | 3.1106E-11 | 3.2572E-11 | 3.4107E-11 | 3.5714E-11 | 3.7397E-11 |

E(0)= 0.809 CL= 2.68 CO3= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.3333 DIVIDENDO= 4

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CD EN CDS EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 8.7292E-06 | 7.2105E-06 | 7.7263E-06 | 8.2703E-06 | 8.8496E-06 |
| 0.5 | 1.4503E-07 | 1.5541E-07 | 1.6652E-07 | 1.7843E-07 | 1.9119E-07 |
| 0.4 | 3.1258E-09 | 3.3494E-09 | 3.5869E-09 | 3.8466E-09 | 4.1207E-09 |
| 0.3 | 6.7870E-11 | 7.2108E-11 | 7.7051E-11 | 8.2303E-11 | 8.7811E-11 |
| 0.2 | 1.4530E-12 | 1.5558E-12 | 1.6671E-12 | 1.7863E-12 | 1.9141E-12 |
| 0.1 | 3.1394E-14 | 3.3533E-14 | 3.5931E-14 | 3.8500E-14 | 4.1254E-14 |
| 0.0 | 6.7448E-16 | 7.2271E-16 | 7.7440E-16 | 8.2979E-16 | 8.8913E-16 |
| -0.1 | 1.4537E-17 | 1.5576E-17 | 1.6690E-17 | 1.7884E-17 | 1.9163E-17 |
| -0.2 | 3.1330E-19 | 3.3571E-19 | 3.5972E-19 | 3.8545E-19 | 4.1302E-19 |
| -0.3 | 6.7525E-21 | 7.2355E-21 | 7.7529E-21 | 8.3074E-21 | 8.9016E-21 |
| -0.4 | 1.4553E-22 | 1.5594E-22 | 1.6710E-22 | 1.7905E-22 | 1.9185E-22 |
| -0.5 | 3.1367E-24 | 3.3610E-24 | 3.6014E-24 | 3.8589E-24 | 4.1349E-24 |
| -0.6 | 6.7603E-26 | 7.2438E-26 | 7.7619E-26 | 8.3170E-26 | 8.9118E-26 |

E(0)= 1.24 CL= 2.68 CO3= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.5 DIVIDENDO= 1

Cromo

El cromo se encuentra en las rocas ígneas de la corteza terrestre en concentraciones promedio de 1,800 ppm, en el agua de mar se le encuentra en bajas concentraciones, la tabla 23 muestra las concentraciones del cromo en las rocas y otros materiales.

El cromo elemental no es encontrado en la naturaleza, el mineral más importante es la cromita, un mineral del grupo de las espinelas $(Fe, Mg)O \cdot (Cr, Al, Fe)_2O_3$. En estado puro la cromita tiene la fórmula $Fe(CrO_2)_2$, y contiene 68 % de óxido de cromo Cr_2O_3 , y 32% de óxido ferroso, FeO . El cromo existe en menores cantidades en muchos minerales en los cuales como Cr^{3+} reemplaza al Fe^{3+} o al Al^{3+} .

Los estados de oxidación más conocidos del cromo son 2, 3 y 6. En el estado $2+$, el cromo interviene en los compuestos cromosos que son fuertes reductores, oxidándose al convertirse en crómicos (Cr^{3+}). El ión Cr^{2+} tiene carácter básico, es ligeramente hidrolizable y posee escasa tendencia a formar complejos.

El estado $3+$, es la forma más estable del Cr (en solución acuosa), con este estado actúa en las sales crómicas violetas o --

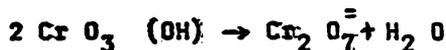
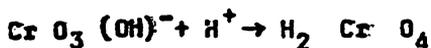
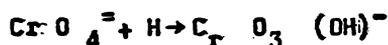
TABLA 23 ABUNDANCIA DEL CROMO EN MATERIALES VARIOS
(Ref. 22).

| Material | Contenido de Cr, ppm | |
|---------------------|-----------------------|----------|
| | Rango usualmente dado | Promedio |
| Corteza continental | 80 - 200 | 125 |
| Rocas igneas | 1,000 - 3,400 | 1,800 |
| Rocas basálticas | 40 - 600 | 220 |
| Rocas graníticas | 2 - 90 | 20 |
| Pizarras y arcillas | 30 - 590 | 120 |
| Piedras calizas | - - - | 20 |
| Arenas | - - - | 35 |
| Suelos | 10 - 150 | 40 |
| Fosforitas | 30 - 3,000 | 300 |
| Carbones | 10 - 1,000 | 20 |
| Petróleo | - - - | 3 |
| Agua de mar | 0.00004 - 0.00005 | -- |
| Plantas marinas | - - - | 1 |
| Animales marinos | 0.2 - 1 | -- |
| Plantas terrestres | - - - | 0.2 |
| Insectos | trazas | -- |
| Mamíferos | - - - | 0.3 |
| Agua dulce | 0.0001 - 0.08 | 0.00018 |

verdes, en forma de cationes complejos o al menos hidratados.

El estado más alto del cromo es el cromo 6+ y el óxido de cromo hexavalente (CrO_3) es fácilmente soluble en agua y sumamente venenoso, oxida vigorosamente la materia orgánica.

La química de las soluciones acuosas del cromo (VI) es muy importante, en soluciones alcalinas se encuentra el ión cromato (CrO_4^{2-}). De ésta solución se pueden precipitar los cromatos insolubles de Ba^{2+} , Pb^{2+} , Ag^+ . Si se disminuye el pH, las soluciones cambian de color amarillo al anaranjado y dan el ión dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$). El mecanismo de esta reacción comprende la adición de un protón para dar HCrO_4^- que luego dimeriza



Estos equilibrios dependen del pH del medio y al agregar cationes que formen cromatos insolubles, precipita los cromatos y no los dicromatos. (Ref. 4).

El cromo forma compuestos con valencias de 2 (cromosos), 3 (crómicos) y 6 (cromatos).

Los compuestos cromosos se asemejan bastante a los compuestos ferrosos. El hidróxido, $\text{Cr}(\text{OH})_2$, es una sustancia de color pardo, poco soluble en agua, que se oxida rápidamente en el aire.

Los compuestos crómicos son muy parecidos a los correspondientes compuestos de aluminio. El hidróxido crómico, $\text{Cr}(\text{OH})_3$, se precipita en soluciones básicas y se disuelve en exceso de hidróxido alcalino con formación de cromito. Los iones crómicos forman muchos complejos por coordinación, particularmente con amoníaco (NH_3), como $\text{Cr}(\text{NH}_3)_6 \text{Cl}_3$, con agua, haluros, cianuros y tiocionatos (ref. 4).

En el estado $6+$, el cromo tiene gran aplicación industrial, como consecuencia de sus propiedades oxidantes y su habilidad para formar sales insolubles fuertemente coloreadas, se utiliza en pigmentos, inhibidores de corrosión, oxidantes, en tenografía, galvanoplastia y cerámica. En la tabla 24 se encuentran compuestos de cromo de procesos industriales con su valencia y solubilidad.

TABLA 24 VALENCIA Y SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS DE CROMO SELECCIONADOS (Ref. 4.24)

| Material | Fórmula | Valencia | Solubilidad |
|-----------------------------|---|----------|---|
| Residuo de proceso: | | | |
| Cromatos | | 6 | Sol. en agua. |
| Complejo de cromato-cromita | $\text{CrO}_4\text{Cr}_2\text{O}_4$ | 3.6 | Sol. en H_2O y sol. en ácido |
| Oxido crómico | Cr_2O_3 | 3 | Ins. en ácido |
| Cromato de calcio | Ca Cr O_4 | 6 | Moderadamente sol. en H_2O y sol. en alcohol. |
| Cromato crómico | $\text{Cr}_2 (\text{Cr O}_4)_3$ $x (\text{Cr}_2\text{O}_3)$ y (CrO_3) | 3.6 | Sol. en agua; forma coloides. |
| Oxido crómico | $x.\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 3 | Ins. en H_2O e ins. en ácido |
| Trióxido crómico | $y.\text{CrO}_3$ | 6 | Sol. en H_2O , alcohol, eter y ácido. |

En la figura 9 se observa que el cromo hexavalente es estable únicamente bajo condiciones fuertemente oxidantes y el ión CrO_4^{2-} (cromato) existe a pH básico y el $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (dicromato a pH ácido). El ión cromoso (Cr^{2+}) es estable solo a condiciones reductoras y pH menor de 8. El cromo elemental (Cr^0) no existe en la naturaleza.

Se calcularon solubilidades para las siguientes especies de cromo:

| | E_0 |
|--------------------------|-------|
| Cr^{+++} | 0.74 |
| CrO_4^{2-} | 0.13 |
| Cr_2O_7 | 1.33 |
| $\text{Cr}(\text{OH})_3$ | 1.3 |

Siendo las ecuaciones para cada especie:

$$S = \left[\text{Cr}^{+++} \text{ Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (3)}{0.06} + 0.06 (pH + pCl + pCO_3 + pSO_4) \right) \right]$$

TABLA 25 SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS DE Cr.

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CR+++ EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 3.9955E-02 | 4.5874E-02 | 5.2671E-02 | 6.0474E-02 | 6.9434E-02 |
| 0.5 | 3.9955E-07 | 4.5874E-07 | 5.2671E-07 | 6.0474E-07 | 6.9434E-07 |
| 0.4 | 3.9955E-12 | 4.5874E-12 | 5.2671E-12 | 6.0474E-12 | 6.9434E-12 |
| 0.3 | 3.9955E-17 | 4.5874E-17 | 5.2671E-17 | 6.0474E-17 | 6.9434E-17 |
| 0.2 | 3.9955E-22 | 4.5874E-22 | 5.2671E-22 | 6.0474E-22 | 6.9434E-22 |
| 0.1 | 3.9955E-27 | 4.5874E-27 | 5.2671E-27 | 6.0474E-27 | 6.9434E-27 |
| 0.0 | 3.9955E-32 | 4.5874E-32 | 5.2671E-32 | 6.0474E-32 | 6.9434E-32 |
| -0.1 | 3.9955E-37 | 4.5874E-37 | 5.2671E-37 | 6.0474E-37 | 6.9434E-37 |
| -0.2 | 3.9955E-42 | 4.5874E-42 | 5.2671E-42 | 6.0474E-42 | 6.9434E-42 |
| -0.3 | 3.9955E-47 | 4.5874E-47 | 5.2671E-47 | 6.0474E-47 | 6.9434E-47 |
| -0.4 | 3.9955E-52 | 4.5874E-52 | 5.2671E-52 | 6.0474E-52 | 6.9434E-52 |
| -0.5 | 3.9955E-57 | 4.5874E-57 | 5.2671E-57 | 6.0474E-57 | 6.9434E-57 |
| -0.6 | 3.9955E-62 | 4.5874E-62 | 5.2671E-62 | 6.0474E-62 | 6.9434E-62 |

E(0)= 0.74 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 1 DIVIDENDO= 1

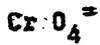
| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 2.8933E+20 | 3.0295E+20 | 3.1721E+20 | 3.3215E+20 | 3.4778E+20 |
| 0.5 | 1.3533E+17 | 1.4179E+17 | 1.4837E+17 | 1.5530E+17 | 1.6227E+17 |
| 0.4 | 6.3298E+13 | 6.6278E+13 | 6.9390E+13 | 7.2666E+13 | 7.6087E+13 |
| 0.3 | 2.9607E+10 | 3.1001E+10 | 3.2460E+10 | 3.3988E+10 | 3.5588E+10 |
| 0.2 | 1.3848E+07 | 1.4500E+07 | 1.5183E+07 | 1.5897E+07 | 1.6646E+07 |
| 0.1 | 6.4772E+03 | 6.7822E+03 | 7.1015E+03 | 7.4358E+03 | 7.7859E+03 |
| 0.0 | 3.6296E+00 | 3.1723E+00 | 3.3216E+00 | 3.4780E+00 | 3.6417E+00 |
| -0.1 | 1.4171E-03 | 1.4838E-03 | 1.5536E-03 | 1.6268E-03 | 1.7044E-03 |
| -0.2 | 6.6281E-07 | 6.9401E-07 | 7.2669E-07 | 7.6090E-07 | 7.9673E-07 |
| -0.3 | 3.1002E-10 | 3.2462E-10 | 3.3990E-10 | 3.5590E-10 | 3.7266E-10 |
| -0.4 | 1.4501E-13 | 1.5183E-13 | 1.5898E-13 | 1.6647E-13 | 1.7430E-13 |
| -0.5 | 6.7825E-17 | 7.1018E-17 | 7.4362E-17 | 7.7863E-17 | 8.1528E-17 |
| -0.6 | 3.1724E-20 | 3.3218E-20 | 3.4782E-20 | 3.6419E-20 | 3.8134E-20 |

E(0)= 0.13 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.333 DIVIDENDO= 4

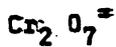
SOLUBILIDAD (MG/LT) DE CR EN CR(OH)3 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 8.8881E-05 | 9.2005E-05 | 9.5238E-05 | 9.8585E-05 | 1.0205E-04 |
| 0.5 | 4.9982E-06 | 5.1738E-06 | 5.3556E-06 | 5.5438E-06 | 5.7366E-06 |
| 0.4 | 2.8107E-07 | 2.9094E-07 | 3.0117E-07 | 3.1175E-07 | 3.2271E-07 |
| 0.3 | 1.5806E-08 | 1.6361E-08 | 1.6936E-08 | 1.7531E-08 | 1.8147E-08 |
| 0.2 | 8.8881E-10 | 9.2005E-10 | 9.5238E-10 | 9.8585E-10 | 1.0205E-09 |
| 0.1 | 4.9982E-11 | 5.1738E-11 | 5.3556E-11 | 5.5438E-11 | 5.7366E-11 |
| 0.0 | 2.8107E-12 | 2.9094E-12 | 3.0117E-12 | 3.1175E-12 | 3.2271E-12 |
| -0.1 | 1.5806E-13 | 1.6361E-13 | 1.6936E-13 | 1.7531E-13 | 1.8147E-13 |
| -0.2 | 8.8881E-15 | 9.2005E-15 | 9.5238E-15 | 9.8585E-15 | 1.0205E-14 |
| -0.3 | 4.9982E-16 | 5.1738E-16 | 5.3556E-16 | 5.5438E-16 | 5.7366E-16 |
| -0.4 | 2.8107E-17 | 2.9094E-17 | 3.0117E-17 | 3.1175E-17 | 3.2271E-17 |
| -0.5 | 1.5806E-18 | 1.6361E-18 | 1.6936E-18 | 1.7531E-18 | 1.8147E-18 |
| -0.6 | 8.8881E-20 | 9.2005E-20 | 9.5238E-20 | 9.8585E-20 | 1.0205E-19 |

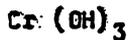
E(0)= 1.3 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.25 DIVIDENDO= 9



$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (6)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)}{4} \right]^{1/3}$$



$$S = \left[\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (6)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right) \right]^{1/3}$$



$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) (3)}{0.06} + 0.06 (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)}{9} \right]^{1/4}$$

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 25.

Arsénico.

El arsénico está considerado un elemento no esencial, conocido por sus cualidades médicas y toxicológicas desde hace dos mil años. Se encuentra en bajas concentraciones en el agua y en gases volcánicos y en forma natural aparece como sulfuro o arsenopiritas.

El arsénico en sistemas acuáticos tiene una química excepcionalmente compleja con reacciones de óxido reducción, cambio de liandos, precipitación y adsorción. El arsénico se encuentra en estados de oxidación estables (+5, +3, 0, - 3) bajo condiciones de E (potencial) que se presentan en sistemas acuáticos.

El arsénico metálico se presenta raramente y el arsénico -3 a valores extremadamente bajos de E.

En la figura 10 se presenta una concentración total de arsénico 10^{-5} mol/lit. en el sistema incluyendo oxígeno, agua y azufre - concentración total de azufre 10^{-3} moles/lit), mostrando las especies solubles predominantes y los sólidos con solubilidades suficientemente bajas para presentarse en este sistema de la siguiente forma: las regiones de menor solubilidad que $10^{-5.3}$ moles/lit. son indicadas por el área transversal encerrada, con las especies sólidas encerradas por paréntesis (ref.8).

Si se incluye hierro al sistema, el arsenato férrico ($pK_{sp} = 24$) pudiera tener una pequeña región de estabilidad a pH inferior de 2.3 y E superior a + 0.74 V. El arsénico no tiene otras interacciones significativas con iones que cambien las áreas de predominancia de las especies solubles descritas en el diagrama.

ARSENICO

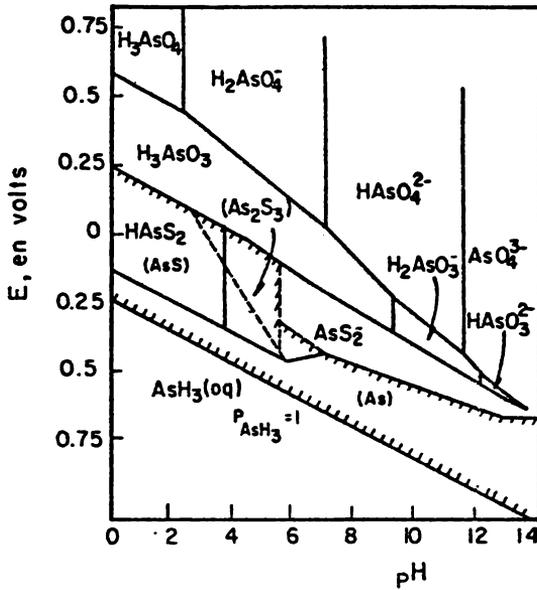


Fig 10 Diagrama E-pH para Hs a 25 °C y 1 atmósfera de presión con un total de arsénico 10^{-5} moles/lit y un total de azufre 10^{-3} moles/lit.

A valores altos de E encontrados en aguas oxigenadas, especies de ácido arsénico (H_3AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ y AsO_4^{3-}) son estables. A condiciones características de condiciones reductoras moderadas, especies de ácido arsenioso (H_3AsO_3 , H_2AsO_3 y $HAsO_3^{2-}$) llegan a ser estables.

Ninguno de los óxidos arsenicos As_2O_5 y As_2O_3 , son insolubles suficientemente para aparecer sobre el diagrama. Bajo condiciones donde el sulfuro es estable S^0 , realgar As_2S_3 y oropimente As_2S_3 tienen baja solubilidad y se presentan como sólidos estables a valores de pH inferiores de 5.5 y valores de potencial cercanos a 0 V. $HAsS_2$ (acuoso es de las especies predominantes a bajo pH en presencia de sulfuro, y tiene una solubilidad máxima de $10^{-6.5}$ mole/lt (0.025 mg/lt). AsS_2^- predomina a pH mayor de 3.7 y cerca de 5.5, su solubilidad es de 10^{-5} moles/lt. A valores bajos de E el arsénico metálico es estable termodinámicamente. Aunque la solubilidad del arsénico metálico no ha sido reportada, es sin duda baja.

A valores muybajos de E, AsH_3 arsina, puede ser formada, la arsina solo ligeramente soluble.

El arsénico forma enlaces termodinámicamente estables con azufre y carbono en compuestos orgánicos. Semejante al mercurio, el arsénico (3+) reacciona con grupos sulfhídricos de cisteína

en proteínas y la inactivación de enzimas por este mecanismo es la primera forma de toxicidad del arsénico. Los compuestos así formados son termodinámicamente inestables pero persistentes. El arsenato no reacciona con grupos sulfhidrilos, sin embargo puede ser reducido a As^{3+} en organismos.

El arsénico $3+$ y $5+$ ambos forman compuestos con enlaces carbono-arsénico. Miles de estos compuestos han sido sintetizados y probados efectivamente contra varias pestes, incluyendo parásitos humanos, malas hierbas e insectos; también han sido usados contra los humanos.

El ácido fenil arsénico $C_6H_5AsO(OH)_2$ y otros fenil y difenilarseno compuestos sustituidos han sido usados en quimioterapia de infecciones tripanosomales. El ácido cacodílico $(CH_3)_2AsOOH$ y ácido metano-arsénico $CH_3AsO(OH)_2$, han tenido aplicación junto con arsenicales inorgánicos como pesticidas.

Compuestos tales como Lewisite $CH_3CH_2=CHAsCl_2$ han sido desarrollados como agentes químicos de guerra, algunos de estos compuestos persisten en el agua, otros son rápidamente oxidados, hidrolizados o por otra parte degradados.

Un importante grupo de compuestos es el de las metilarsinas, - Trimetilarsina $(\text{CH}_3)_3 \text{As}$, es formada por microorganismos a partir de compuestos inorgánicos de arsénico. Bajo ciertas circunstancias es altamente tóxica, aunque la trimetilarsina $(\text{CH}_3)_3 \text{As}$ es considerada insoluble en agua, es lo suficientemente soluble para ser de interés ambiental.

Los arsenicales orgánicos sintetizados por organismos o formados por reacción con constituyentes de los organismos pueden afectar la distribución y forma del arsénico en las masas de agua y los sedimentos.

Se calcularon solubilidades para las siguientes especies de arsénico:

| | E_0 |
|---------------------------|-------|
| $\text{H}_3 \text{AsO}_4$ | 0.559 |
| AsS^- | 0.8 |
| AsH_3 | 0.60 |
| AsO_4^{---} | 0.67 |

Siendo las ecuaciones para cada especie:



$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) \cdot (2)}{0.06} + 0.06 \cdot (\text{pH} + \text{pCl}_3 + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)}{9} \right]^{1/4}$$

As S^-

$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) \cdot (3)}{0.06} + 0.06 \cdot (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)}{9} \right]^{1/4}$$

As H_3

$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) \cdot (3)}{0.06} + 0.06 \cdot (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)}{9} \right]^{1/4}$$

As O_4^{---}

$$S = \left[\frac{\text{Antilog} \left(\frac{(E-E_0) \cdot (2)}{0.06} + 0.06 \cdot (\text{pH} + \text{pCl} + \text{pCO}_3 + \text{pSO}_4) \right)}{9} \right]^{1/4}$$

os resultados obtenidos se encuentran en la tabla 26.

TABLA 25 SOLUBILIDAD DE COMPUESTOS DE As.

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE AS EN HAsO4 EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|-----------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 1.5815E+05 | 1.6371E+05 | 1.6946E+05 | 1.7542E+05 | 1.8158E+05 |
| 0.5 | 2.3218E+04 | 2.4034E+04 | 2.4878E+04 | 2.5753E+04 | 2.6658E+04 |
| 0.4 | 3.4085E+03 | 3.5283E+03 | 3.6523E+03 | 3.7807E+03 | 3.9135E+03 |
| 0.3 | 5.0040E+02 | 5.1799E+02 | 5.3619E+02 | 5.5503E+02 | 5.7454E+02 |
| 0.2 | 7.3463E+01 | 7.6045E+01 | 7.8717E+01 | 8.1483E+01 | 8.4347E+01 |
| 0.1 | 1.0785E+01 | 1.1164E+01 | 1.1556E+01 | 1.1962E+01 | 1.2383E+01 |
| 0.0 | 1.5833E+00 | 1.6390E+00 | 1.6966E+00 | 1.7552E+00 | 1.8179E+00 |
| -0.1 | 2.3244E-01 | 2.4061E-01 | 2.4907E-01 | 2.5783E-01 | 2.6688E-01 |
| -0.2 | 3.4125E-02 | 3.5324E-02 | 3.6565E-02 | 3.7858E-02 | 3.9180E-02 |
| -0.3 | 5.0098E-03 | 5.1858E-03 | 5.3681E-03 | 5.5567E-03 | 5.7520E-03 |
| -0.4 | 7.3548E-04 | 7.6132E-04 | 7.8808E-04 | 8.1577E-04 | 8.4444E-04 |
| -0.5 | 1.0797E-04 | 1.1177E-04 | 1.1576E-04 | 1.1976E-04 | 1.2397E-04 |
| -0.6 | 1.5851E-05 | 1.6409E-05 | 1.6985E-05 | 1.7582E-05 | 1.8200E-05 |
| E(0)= 0.559 | CL= 2.68 | CO3= 3.74 | S04= 2.34 | | |
| EXPONENTE= 0.25 | DIVIDENDO= 9 | | | | |

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE AS EN HAs- EN AGUA DE RIO

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|--------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 5.7570E-05 | 6.6099E-05 | 7.5892E-05 | 8.7136E-05 | 1.0005E-04 |
| 0.5 | 5.7570E-10 | 6.6099E-10 | 7.5892E-10 | 8.7136E-10 | 1.0005E-09 |
| 0.4 | 5.7570E-15 | 6.6099E-15 | 7.5892E-15 | 8.7136E-15 | 1.0005E-14 |
| 0.3 | 5.7570E-20 | 6.6099E-20 | 7.5892E-20 | 8.7136E-20 | 1.0005E-19 |
| 0.2 | 5.7570E-25 | 6.6099E-25 | 7.5892E-25 | 8.7136E-25 | 1.0005E-24 |
| 0.1 | 5.7570E-30 | 6.6099E-30 | 7.5892E-30 | 8.7136E-30 | 1.0005E-29 |
| 0.0 | 5.7570E-35 | 6.6099E-35 | 7.5892E-35 | 8.7136E-35 | 1.0005E-34 |
| -0.1 | 5.7570E-40 | 6.6099E-40 | 7.5892E-40 | 8.7136E-40 | 1.0005E-39 |
| -0.2 | 5.7570E-45 | 6.6099E-45 | 7.5892E-45 | 8.7136E-45 | 1.0005E-44 |
| -0.3 | 5.7570E-50 | 6.6099E-50 | 7.5892E-50 | 8.7136E-50 | 1.0005E-49 |
| -0.4 | 5.7570E-55 | 6.6099E-55 | 7.5892E-55 | 8.7136E-55 | 1.0005E-54 |
| -0.5 | 5.7570E-60 | 6.6099E-60 | 7.5892E-60 | 8.7136E-60 | 1.0005E-59 |
| -0.6 | 5.7570E-65 | 6.6099E-65 | 7.5892E-65 | 8.7136E-65 | 1.0005E-64 |
| E(0)= 0.8 | CL= 2.68 | CO3= 3.74 | S04= 2.34 | | |
| EXPONENTE= 1 | DIVIDENDO= 1 | | | | |

(CONTINUACION)

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE AS EN ASHS EN AGUA DE PH

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 2.6736E+03 | 3.0697E+03 | 3.5245E+03 | 4.0467E+03 | 4.6482E+03 |
| 0.5 | 1.2419E+00 | 1.4259E+00 | 1.6372E+00 | 1.8797E+00 | 2.1582E+00 |
| 0.4 | 5.7690E-04 | 6.6337E-04 | 7.6050E-04 | 8.7317E-04 | 1.0025E-03 |
| 0.3 | 2.6798E-07 | 3.0768E-07 | 3.5326E-07 | 4.0560E-07 | 4.6509E-07 |
| 0.2 | 1.2448E-10 | 1.4292E-10 | 1.6410E-10 | 1.8811E-10 | 2.1632E-10 |
| 0.1 | 5.7823E-14 | 6.6369E-14 | 7.6225E-14 | 8.7519E-14 | 1.0048E-13 |
| 0.0 | 2.6859E-17 | 3.0939E-17 | 3.5408E-17 | 4.0653E-17 | 4.6676E-17 |
| -0.1 | 1.2477E-20 | 1.4325E-20 | 1.6447E-20 | 1.8984E-20 | 2.1682E-20 |
| -0.2 | 5.7956E-24 | 6.6542E-24 | 7.6401E-24 | 8.7733E-24 | 1.0072E-23 |
| -0.3 | 2.6921E-27 | 3.0910E-27 | 3.5489E-27 | 4.0747E-27 | 4.6784E-27 |
| -0.4 | 1.2505E-30 | 1.4358E-30 | 1.6465E-30 | 1.8928E-30 | 2.1732E-30 |
| -0.5 | 5.8090E-34 | 6.6696E-34 | 7.6577E-34 | 8.7922E-34 | 1.0095E-33 |
| -0.6 | 2.6983E-37 | 3.0981E-37 | 3.5571E-37 | 4.0841E-37 | 4.6862E-37 |

E(0)= 0.67 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 1 DIVIDENDO= 1

SOLUBILIDAD (MG/LT) DE AS EN ASHS EN AGUA DE PH

| PH= | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
|---------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|
| ***E*** | *****SOLUBILIDAD***** | | | | |
| 0.6 | 7.1017E+04 | 7.4548E+04 | 7.7168E+04 | 7.9880E+04 | 8.2687E+04 |
| 0.5 | 4.0498E+03 | 4.1922E+03 | 4.3395E+03 | 4.4920E+03 | 4.6498E+03 |
| 0.4 | 2.2774E+02 | 2.3574E+02 | 2.4403E+02 | 2.5268E+02 | 2.6148E+02 |
| 0.3 | 1.2807E+01 | 1.3257E+01 | 1.3723E+01 | 1.4205E+01 | 1.4704E+01 |
| 0.2 | 7.2017E-01 | 7.4548E-01 | 7.7168E-01 | 7.9880E-01 | 8.2687E-01 |
| 0.1 | 4.0498E-02 | 4.1922E-02 | 4.3395E-02 | 4.4920E-02 | 4.6498E-02 |
| 0.0 | 2.2774E-03 | 2.3574E-03 | 2.4403E-03 | 2.5268E-03 | 2.6148E-03 |
| -0.1 | 1.2807E-04 | 1.3257E-04 | 1.3723E-04 | 1.4205E-04 | 1.4704E-04 |
| -0.2 | 7.2017E-06 | 7.4548E-06 | 7.7168E-06 | 7.9880E-06 | 8.2687E-06 |
| -0.3 | 4.0498E-07 | 4.1922E-07 | 4.3395E-07 | 4.4920E-07 | 4.6498E-07 |
| -0.4 | 2.2774E-08 | 2.3574E-08 | 2.4403E-08 | 2.5268E-08 | 2.6148E-08 |
| -0.5 | 1.2807E-09 | 1.3257E-09 | 1.3723E-09 | 1.4205E-09 | 1.4704E-09 |
| -0.6 | 7.2017E-11 | 7.4548E-11 | 7.7168E-11 | 7.9880E-11 | 8.2687E-11 |

E(0)= 0.6 CL= 2.68 C03= 3.74 S04= 2.34
 EXPONENTE= 0.25 DIVIDENDO= 9

IV. Distribución de los contaminantes.

Transporte de material soluble.

**Los mecanismos por los cuales los elementos contenidos en -
rocas tienen acceso a las aguas naturales, pueden explicarse
en términos de su movilidad y del medio ambiente en que-
se desarrollen.**

Mecanismos de incorporación natural de metales traza (ref. 20).

Elementos tipomórficos

Un elemento químico, iónico, o compuesto es tipomórfico si su migración caracteriza un proceso dado. Así, el tipomorfismo depende de la abundancia y de la habilidad migratoria de un elemento.

Los elementos tipomórficos son aquellos que migran más activamente durante un proceso dado, o se acumulan residualmente en cantidades mayores.

Migración eólica o acuática.

Se pueden distinguir dos tipos principales de elementos tipomórficos:

- 1.- Elementos y compuestos tipomórficos eólicos que migran en estado gaseoso. Ejemplos: dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, y metano.
- 2.- Elementos y compuestos tipomórficos transportados en el agua, migran en soluciones verdaderas o coloidales. - - Ejemplos: ión cloruro, ión sulfato, ión bicarbonato, calcio, magnesio y sodio.

En las series ambientales de migrantes acuosos, cada medio ambiente está caracterizado por algún ión o compuesto tipomórfico, los cuales controlan la relación alcalinidad-acidez de las aguas naturales y sus cargas químicas. Los medios ambientales más importantes son:

1. Fuertemente ácido, pH menor de 4. El ión tipomórfico más común es el H^+ ; ocasionalmente Fe^{3+} , Al^{3+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , etc.
2. Ácidos, el pH varía entre 4 y 6.5. Iones tipomórficos: H^+ y aniones de ácidos orgánicos.
3. Neutral a débilmente alcalinos, enriquecidos con bicarbonato de calcio. El pH varía entre 6.5 y 8.5. Iones tipomórficos son Ca^{2+} , HCO_3^- , etc.
4. Neutral y débilmente alcalinos, cloro-sulfáticos. El pH varía entre 7 y 8. Los iones tipomórficos son Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} .
5. Neutral y débilmente alcalinos, depositantes de yeso. Los iones tipomórficos son SO_4^{2-} y Ca^{2+} .
6. Alcalinos, sódicos. El pH es superior a 8.5. Los iones y compuestos tipomórficos son HCO_3^- , OH^- , Na^+ , SiO_2 , etc.

Perel'man (ref. 20), ha propuesto al uso del coeficiente de migración acuosa, K_x , el cual es obtenido dividiendo el contenido del elemento en la roca entre su contenido en las aguas naturales que fluyen sobre ese tipo de rocas. Entre mayor sea el valor de K_x , mayor será la habilidad migratoria del elemento - dado, esta relación es:

$$K_x = m_x \cdot 100/a n_x$$

donde

- m_x contenido del elemento X en el agua, en mg/l
- n_x contenido del elemento X en la roca, en por ciento
- a residuo mineral contenido en el agua, en por ciento

En la tabla 27 se presentan los metales traza en estudio y el valor de su coeficiente K_x , dando el siguiente comportamiento

| Metal Traza | Mayor habilidad migratoria |
|-------------|----------------------------|
| Cu | en ríos |
| Zn | en lagos |
| Pb | en almacenamiento sup. |
| Fe | en aguas subterráneas |
| Ni | en lagos |
| Cr | en ríos |

| | R* | L* | A* | S* | E ₊ | Tabla 1.3-2 M** | *** Litosfera § | Coeficiente K_x | | | | | | |
|----|-------|--------|--------|--------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|----------------|---|--------|
| | | | | | | | | R | L | A | S | E ₊ | M | |
| Hg | | | | | | 0.00003 | 8.3×10^{-6} | | | | | | | 0.72 |
| Cu | 0.084 | 0.057 | 0.073 | 0.015 | | 0.003 | 4.7×10^{-3} | 3.57 | 2.43 | 3.11 | 0.64 | | | 0.13 |
| Zn | 0.210 | 0.340 | 0.099 | 0.470 | | 0.010 | 8.3×10^{-3} | 5.06 | 8.19 | 2.39 | 11.33 | | | 0.24 |
| Pb | 0.060 | 0.026 | 0.094 | 0.038 | | 0.003 | 1.6×10^{-3} | 7.50 | 3.25 | 11.75 | 4.75 | | | 0.38 |
| Fe | 3.800 | 0.100 | 0.950 | 6.600 | | 0.910 | 4.65 | 0.16 | 0.004 | 0.037 | 0.28 | | | 0.0004 |
| Ni | 0.015 | 0.021 | 0.015 | 0.015 | | 0.0005 | 5.8×10^{-3} | 0.52 | 0.72 | 0.52 | 0.52 | | | 0.017 |
| Cd | | | | | | 0.00011 | 1.3×10^{-5} | | | | | | | 1.69 |
| Cr | 0.078 | 0.0036 | 0.0038 | 0.0011 | | 0.00005 | 8.3×10^{-3} | 1.88 | 0.09 | 0.092 | 0.024 | | | 0.0012 |

* Ref. + Sin datos

** Ref.

*** Ref.

NOTA: El residuo mineral del agua, a , se considera que pesa 500 mg/l; el contenido de elementos en rocas es tomado de sus valores de abundancia ($a = 500 \%$).

R, Rlo, L, Lago A, Almacenamiento S, Agua subterránea E, Estuario M, Mar

TABLA 27 CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE MIGRACION ACUOSA K_x

Cada medio se caracteriza por su propia serie migratoria de -- elementos. Por ejemplo, de la tabla 28, se puede apreciar la - diferencia existente en la migración de un mismo elemento en - dos medios - uno oxidante y el otro fuertemente reductor (rico, en H_2S). Esto conduce al concepto de contraste migratorio, el- cual es medido por la proporción entre la intensidad migratoria durante los dos procesos diferentes. Por ejemplo, el coeficien- te de contraste del zinc es aproximadamente 100, el cual es - muy alto. Se obtiene dividiendo el valor de K_{zn} para el medio oxidante (n) entre el K_{zn} para el medio sulfuroso (0.0n).

Para elementos como Zr, Hf, T y Pt que realmente no forman -- compuestos solubles, el valor del coeficiente K_x no excede - - 0.01. Se sigue de esto que todos los metales inertes tienen - bajos coeficientes de contraste.

Un esquema de clasificación para los elementos químicos se - - presenta a continuación, basado en 1) modo de migración, 2) in- tensidad de migración y 3) el contraste del elemento.

A. Migrantes edílicos

A₁ Activos (formando compuestos químicos)

O, H, C, N y I.

A₂ Inactivos (no forman compuestos químicos)

A. Ne, He, Kr, Xe, R.

b. Migrantes acuáticos

| Intensidad Migratoria | Medio ambiente oxidante | | Contraste de migración | | Medio Ambiente fuertemente reductor | |
|-----------------------|---------------------------------|--|------------------------------------|--|-------------------------------------|---|
| | Kx 1000 100 10 1 01 001 0001 | | ← Débil → Fuerte → | | Kx 1000 100 10 1 01 001 0001 | |
| Muy Fuerte | Cl, I Br, S | | Cl, Br, I | | Cl, I Br | |
| Fuerte | | Ca, Mg Na, F Sr, Zn U | Ca, Mg; Na, F, Sr Sn, U | | Ca, Mg Na, F Sr | |
| Mediana | | Co, Si, P, Cu Ni, Mn, K | Si, P, K Cu, Ni, Co | | Si, P K | |
| Débil y Muy Fuerte | | Fe, Al, Ti, V, Th, Zr, Hf, Nb, Ta, Ru, Rh, Pd, Os, Pt, Sn, | Al, Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, Pt, TR, Sn | | | Al, Ti, Sn, V, Cu, Ni, Co, Mn, Th, Zr, Hf, Nb Ta, Ru, Rh, Pd, Os, Zn U, Pt |

TABLA 28 SERIES MIGRATORIAS DURANTE EL INTEMPERISMO DE ROCAS SILICICAS EN CLIMAS TEMPLADOS.

- B_1 Aniones muy móviles, con K_x entre $10n$ y $100 n$ S, Cl, B, y Br.
- B_2 Móviles, con $K_x = n$
- B_{2a} Cationes: Ca, Na, Mg, Sr y Ra
- B_{2b} Aniones: F
- B_3 Débilmente móviles, con $K_x = 0n$.
- B_{3a} Cationes: K, Ba, Rb, Li, Be, Cs, Tl
- B_{3b} Aniones más importantes: Si, P, Sn, As, Ge, y Sb.
- B_4 Móviles y débilmente móviles en medio oxidante ($K_x = n$ a $0.n$) e inertes en medio fuertemente reductores (k_x menor de 0.1).
- B_{4a} Alta movilidad en aguas oxidantes ácidas y débilmente ácidas y baja movilidad en aguas neutrales y alcalinas. Cationes predominantes: Zn, Ni, Cu, Pb, Cd, Hg, y Ag.
- B_{4b} Migración energética en aguas alcalinas y ácidas más energéticas en alcalinas que en ácidas, aniones predominantes: V, U, Mo, Se, Re.
- B_5 Móviles y débilmente móviles en medios reductores, coloidales ($K_x = n$ a $0.n$) e inertes en medios oxidantes ($K_x = - -$

O,On): Fe, Mn y Co. '

B_6 Poblemente móviles en la mayoría de los modios ($K_x = O.n$ a $O.O_n$).

B_{6a} Débil migración resultante en la formación de compues-
tos químicos: Al, Ti, Zr, Cr, tierras raras, Y, Ga, -
Cb, Th, Sc, Ta, W, In, Bi y Te.

B_{6b} No forman o raramente forman compuestos químicos: Os,
Pd, Ru, Pt, Au, Rh, Ir.

Este esquema de clasificación es aplicable a la zona super-
genética de los continentes. En cada grupo, los elementos -
están arreglados en orden descendiente de abundancia, lo -
cual corresponde generalmente a su importancia decreciente -
en los procesos supergenéticos.

V. Analisis de contaminantes.

Absorción Atómica.

Definición.

El análisis por Absorción Atómica determina el tipo y la can
tidad de un elemento al medir la longitud de onda y la inten
sidad de la luz absorbida por los vapores mono-atómicos.

Raras veces el material a analizar se presenta en forma gaseo
sa; teniéndose una solución o una fase sólida, por lo que la

conversión del elemento a determinar en un vapor atómico representa la parte más importante de este procedimiento analítico.

La atomización de una sustancia se lleva a cabo al emplear una flama que en una operación: Nebuliza el líquido, evapora el solvente y partículas disueltas causando a su vez, la disociación de las moléculas y sales en la fase de vapor.

Es por esta razón que este método se le conoce con el nombre de Análisis por Absorción de Flama o Fotometría de Absorción, sin embargo; cabe mencionar que existen procedimientos de atomización sin flama, métodos que se vienen perfeccionando y que tienen una gran proyección para el futuro.

Principios de Análisis.

La evaporación de la mezcla se lleva a cabo en tal forma que el elemento a determinar adquiere el estado atómico térmicamente no excitado. Un haz de luz de resonancia monocromática se hace pasar a través de éste vapor.

La condensación cuántica ocurre y los átomos del elemento a determinar se excitan, causando con ello una disminución de la luz de resonancia. Bajo las mismas condiciones ópticas y usando la misma disposición geométrica, el grado de absorción luminosa dependerá del número de átomos en el vapor sujeto a investigación, esto es a su concentración.

La cantidad del elemento en la muestra atomizada se puede calcular usando las mismas relaciones aplicadas en la Absorciometría.

Rango de empleo del espectrofotometro A.A.

Existen dos prerequisites para que un elemento sea detectado y cuantificado por Absorción Atómica.

- 1) El elemento en cuestión debe tener una línea de absorción en los rangos espectrales disponibles, esto es, en el rango de luz visible o U V (cuarzo). Las mediciones abajo de 190 nm son difícilmente realizables.
- 2) El elemento debe sufrir una conversión a vapor monocromático por una técnica accesible de atomización.

Los elementos que no cumplen con la primera condición son los no-metales, tales como los gases nobles, halógenos, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, carbono, fósforo y azufre.

Por esta razón la Absorción atómica está limitada a la determinación de los metales y semi-metales pudiéndose cuantificar unos 70 elementos de la tabla periódica.

Especificidad.

la mayoría de los casos la absorción atómica es específica para la detección y medida de un elemento en particular; aún se encuentran presentes otros elementos en mayor concentración.

La transferencia energética entre los átomos excitados puede interferir en la especificidad de los átomos de emisión más no en la absorción atómica, pues es una técnica analítica que mide los átomos en su estado basal.

atomización de flama.

La flama es producida a temperaturas elevadas en varias mezclas:

flama de aire - acetileno (2300 ° C)

flama de aire - propano (1900 ° C)

flama de óxido nitroso - acetileno (3000 ° C).

Para mediciones superiores a 200 nm, (caso del As y Se); se necesita una transferencia de flama la cual se obtiene por la atomización de hidrógeno - argón - aire.

Los métodos como la atomización térmica sin flama en tubo de cuarzo, han sido investigados y posteriormente desarrollados sucesivamente aumentando así la sensibilidad de las determinaciones.

Para los elementos que se evaporan a una energía relativamente baja, como Ag, Zn, Cd, Pb, Th, As, Se, etc. se ha desarrollado una técnica que consiste en evaporar la muestra en una cuva abierta (ref. 9)

sensibilidad y límites de detección.

La existencia de una línea bien definida de absorción para cada metal, asegura una buena sensibilidad, la tabla 29 nos proporciona las condiciones para los elementos en estudio que fueron determinados por Absorción atómica.

Procedimientos analíticos.

Las determinaciones del Registro de descarga como las de la Unidad de Monitores se hicieron en un aparato Perkin Elmer, modelo 290 B de operación manual.

Tabla 29. Principales líneas de absorción, sensibilidades analíticas (S), y límites de detección (d) para el análisis de Absorción con flama de soluciones acuosas.

| Elemento | (nm) | flama óptima | S (ng/ml) para 1%abs) | d(ng)ml. |
|----------|-------|-----------------|--------------------------|----------|
| As | 193.7 | Hidrógeno-argón | 1.5 | 0.5 |
| Cd | 228.8 | Acetileno-aire | 0.05 | 0.005 |
| Cr | 357.9 | Acetileno-aire | 0.1 | 0.01 |
| Cu | 324.7 | acetileno-aire | 0.05 | 0.005 |

| | | | | | |
|----|-------|---------|----------------|-------|-------|
| Hg | 253.7 | 253.7 | acetileno-aire | 10.00 | 2.5 |
| Ni | 232.0 | (341.5) | Acetileno-aire | 0.1 | 0.01 |
| Pb | 283.3 | (217.0) | acetileno-aire | 0.5 | 0.05 |
| Zn | 213.8 | | acetileno-aire | 0.02 | 0.002 |

VI. Conclusiones y Recomendaciones.

Conclusiones.

- 1.- La concentración de metales pesados en los residuos líquidos domésticos varía según el uso del agua, cantidad y tipo de alimento consumido, nivel de vida, época del año, etc.
- 2.- El acceso a los cuerpos de agua de los metales pesados presentes en los desechos sólidos industriales, domésticos y de plantas de tratamiento es debido a los métodos de disposición que se les aplique.
- 3.- En las zonas urbanas, el incremento de unidades automotrices trae consigo un aumento en la emisión de partículas con metales pesados que en gran proporción son depositadas en las superficies pavimentadas y que por su efecto de lluvia son disueltos o arrastrados hacia el sistema de alcantarillado. La carga de contaminantes, en los escurrimientos de caminos, es mucho mayor que en las aguas residuales municipales según datos reportados (re. 3.23).

- .- El sistema contaminante está constituido por todas aquellas fuentes que generan desechos con metales pesados y que se incorporan de una forma directa o indirecta a los cuerpos de agua.
- .- Las fuentes contaminadoras que integran el sistema contaminante son las naturales y artificiales.
- .- Siendo México un país con altos recursos minerales es factible suponer la contaminación natural de las aguas superficiales y subterráneas, debido al poder solvente que presenta el agua en determinadas circunstancias.
- .- Los principales fenómenos por los cuales, los metales pesados presentes en los yacimientos tienen acceso a los cuerpos de agua son el interperismo y la lluvia.
- Con base a la información existente las cuencas hidrológicas del país se encuentran teóricamente afectadas por plomo, cobre, fierro y manganeso, provenientes de los yacimientos minerales.
- Las principales fuentes del sistema contaminante corresponden a las fuentes artificiales, las cuales son originadas como resultado de las distintas actividades del hombre (Industriales, cotidianas, etc.

Recomendaciones.

1. Se recomienda constituir un banco de datos, en el cual se encuentre recopilada la información necesaria para la evaluación del problema de contaminación, dicho banco contendrá información acerca de la empresa como nombre y localización, materia prima y procesos utilizados, productos que elaboran, volumen de producción, caracterización físicoquímica del residuo, tipo y aportación de contaminante, existencia de tratamiento, localización de la descarga, cuerpo receptor y cuenca hidrológica afectada.
2. Realizar las pruebas de campo suficientes para obtener los parámetros necesarios, que permitan la calibración de los modelos matemáticos que predicen el comportamiento de los compuestos de metales pesados, tanto solubles como insolubles.
3. La falta de información, de concentraciones, potenciales redox y especiación química existente, sugieren la formación de un banco de datos con pruebas de campo tanto en aguas como en sedimentos.
4. Los datos pueden ser obtenidos estableciendo mayor número de laboratorios de monitoreo, muestreando los cuerpos de agua y descargas industriales.

REFERENCIAS

- 1.- Ayres, Gilbert "Análisis Químico Cuantitativo", Harper & Row Publishers Inc. Madrid (1970).
- 2.- Briggs, K y Jones, K "The Significance of redox Potential-Measurements in Sewage Treatment" Wat. Res. Poll. Lab. Report: 543, 157-161 (1968).
- 3.- Castellan, Gilbert W. "Físicoquímica" Fondo. Educ. Interamericano, México (1976.)
- 4.- Cotton, F. Albert y Wilkinson, F. R. S. Geoffrey "Química - Inorgánica Avanzada" Limusa, México (1975).
- 5.- Charlot, Gaston "Curso de Química Analítica General", Toray - Masson, S. A. Barcelona. (1975).
- 6.- Datos de la Red Nacional de Monitoreo. SICA S.A.R.H. EDO. de Veracruz. Informe Estadístico (25/08/78).
- 7.- Escalante Pliego Rosalinda. Tesis "Toxicidad de los Mercuriales, sus Efectos y su Comportamiento como Contaminantes Marinos". (1978).

- 8.- Ferguson John F. y Gavis Jerome "A Review of the Arsenic Cycle in Natural Waters" Wat. Res. 6 1259 (1972).
- 9.- García García J. Isabel. Tesis. "Contribución al estudio de los métodos analíticos recientes aplicados a la determinación de los contaminantes ambientales" (1977).
- 10.- Garrels, R. M. y Christ. C. L. "Solutions, Minerals and -- Equilibria". Harper & Row, N. Y. Evanston & London (1965).
- 11.- Gutiérrez Contreras Mario "Manual de Análisis Cuantitativo". COFAA. IPN México (1968).
- 12.- Handbook of Chemistry and Physics
The Chemical Rubber Co.
1972 - 1973 53a. Ed.
- 13.- Hayes, Thomas D. y Theis, Thomas L. "The Distribution of - Hearn Metals in Anaerobic Digestion". J.
Wat. Poll. Contr. Fed. 50, 1 61-72 (1978).
- 14.- Hem, J. D. "Chemical of Mercury in aqueous media".
U. S. Geol. Survey Prof. Paper 713, 19 (1970).
- 15.- Huber, N. K. y Garrel, R. M. "Relación of pH and Oxidation Potencial to Sedimentary Iron Mineral Formation" Econ. - - Geol. 48, 337-57 (1953).

- 16.- Latimer, H. H. "Oxidation Potentials" Practice-Hill N. Y. (1952).
- 17.- Laxen, D.P.H. y Harrison, R. M. "The Highway as a Source - of Water Pollution: an Appraisal with the Heavy Metal Lead" Wat. Res. 11, 1 (1977).
- 18.- Tesis Madrid Mejorado Juan José "Impacto sobre el medio Am biente por la Emisión del Cr VI" Fac. Quim (1978).
- 19.- Maron Samuel H. y Prutton, Carl F. "Fundamentos de Físico-química". Limusa- Wiley México (1972).
- 20.- Perel'man Aleksandr I. "Geochemistry of Epigenesis". Plenum Press N. Y. (1967). Monographs in Geoscience.
- 21.- Rubin, Alan J. "Aqueous Environmental Chemistry of Metals". Ann Arbor Science (1976).
- 22.- Show, T. L. y Brown, U.M. "the Toxicity of Some Forms Of - Copper to Rainbow Trout". Wat. Res. 8, 372 (1974).
- 23.- Solbé, J. F. & L. G. "The Toxicity of Zinc Sulphate to Rain Trout in very Hard Water". Wat. Res. 8, 389 (1974).
- 24.- Stumm Werner y Morgan, James, J. "Aquatic Chemistry" Wiley

Interscience, U. S. A. (1970).

25.- Sylva, R. N. "The Environmental Chemistry of Copper (II) - in Aquatic Systems". Wat. Res. 10, 789 (1976).

26.- Valles, Bert L. y Ulmer, David D. "Biochemical Effects of Mercury Cadmium And Lead". (1972).