



*UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO*



*INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALÚRGICAS*

**COLUMNAS DE FLOTACIÓN APLICADAS
A LA REMOCIÓN DE IONES DE COBRE
EN SOLUCIÓN**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIAS
DE LOS MATERIALES**

**PRESENTA:
ING. ULISES MONTAÑO ARTEAGA**

**ASESOR:
DR. RAMIRO ESCUDERO GARCÍA**

MORELIA, MICH., FEBRERO DE 2007

El tiempo no se puede atrapar, mucho menos almacenar; nuestra existencia transcurre a gran velocidad, pero mientras tengamos vida, tenemos la oportunidad de cambiar nuestros hábitos, de tener una mejor calidad de existencia, de aprovechar y disfrutar cada respiro, cada latido de nuestro corazón.

Agradecimientos

A Dios, por permanecer siempre a mi lado; ayudarme y guiarme por el camino, que me permitió cumplir con esta etapa de mi vida.

A mi Madre Ma. Luz Arteaga Chávez, por darme la vida y contribuir para encontrar las respuestas que me fortalecieron y me permitieron seguir adelante.

A mis hermanos Homero y Erica, por su comprensión, solidaridad, y por el cariño que siempre me han demostrado.

A mi esposa Lucrecia, por todo el amor y apoyo incondicional en todo momento, así mismo por su ayuda para poder alcanzar juntos esta meta.

A mis Hijos Yessica Yarabid y Carlos Alonso, por ser el motivo principal en mi vida ya que son los que me dan la fuerza y el entusiasmo para seguir adelante.

Al Dr. Ramiro Escudero García, por su apoyo, asesoría y disposición profesional, en el desarrollo del presente trabajo.

A mis Sinodales, por su experiencia y capacidad profesional reflejadas en sus sugerencias y recomendaciones, los cuales contribuyeron en la consolidación del presente trabajo de tesis.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo institucional para la realización del presente postgrado.

A Julio Cesar Juárez tapia y Martín Reyes Pérez, un agradecimiento especial y a todos aquellos amigos y compañeros que de una forma u otra me brindaron consejo y apoyo.

G R A C I A S ...

RESUMEN

Cada vez son mayores los casos de contaminación de los mantos freáticos en todo el mundo y por supuesto ésta se ha transmitido al agua para consumo urbano.

Es del conocimiento común que la industria minera y en general la minero-metalúrgica son las principales fuentes de contaminación de los sistemas acuosos en el mundo. El tratamiento de estas aguas residuales es costoso debido a los enormes volúmenes de agua a tratar y de los tiempos prolongados de tratamiento convencionales.

En respuesta a esta realidad la aplicación de nuevas tecnologías, más eficientes, económicas y sencillas de operar se presenta como una alternativa para poder contrarrestar este tipo de situaciones. Una opción es la flotación en columnas como una contribución científica y de transferencia tecnológica.

La flotación es un proceso de separación selectivo, originalmente diseñado para la separación de partículas en una dispersión sólido-líquido-gas. Las especies capturadas por las burbujas forman un nuevo agregado burbuja-partícula que sale de la columna por su parte superior como concentrado. La aceptación de los equipos de dispersión y específicamente el uso de las columnas se ha visto incrementado a escala industrial debido a múltiples ventajas que incluyen menor costo de instalación y operación, menor ocupación de espacio, disminución sustancial del consumo de energía, principalmente porque no tiene sistema de agitación mecánica, mayor rendimiento metalúrgico y menor consumo de reactivos.

Lo anterior ha despertado en los investigadores del área de metalurgia extractiva un especial interés por “adaptar” o transferir esta tecnología a aplicaciones no-minerales como es el caso de la industria del reciclado, de recuperación de suelos y de descontaminación en general, entre otros.

La flotación iónica es una propuesta para remover iones de metales pesados que se encuentran en solución contaminando un manto freático.

Este trabajo presenta los resultados de experimentos llevados a cabo en una columna de flotación de laboratorio, para separar iones de cobre en solución. Los resultados demuestran la posibilidad de utilizar este sistema de dispersión en la remoción de iones de metales pesados, al obtener recuperaciones mayores al 90% y poder procesar volúmenes considerables de agua contaminada sin un gasto excesivo de reactivos químicos.

CONTENIDO

Agradecimientos

Resumen

Contenido

Lista de figuras

Lista de tablas

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

1.1.- Introducción	1
1.2.- Objetivo	5
1.3.- Justificación	6

CAPITULO II REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

2.1.- Contaminación de aguas	8
2.2.- Columna de flotación	12
2.2.1.- Zona de colección	13
2.2.2.- Zona de limpieza	15
2.3.- Dispersiones de gas en flotación	16
2.4.- Generadores de dispersiones de gas	17
2.4.1.- Efecto del área superficial del burbujeador	18
2.5.- Flotación iónica	19
2.6.- Diferencia entre flotación iónica y flotación de minerales	23

2.7.- Variables en el proceso de flotación	25
2.7.1.- Velocidad superficial de gas	25
2.7.2.- Velocidad superficial de líquido	27
2.7.3.- Altura de la zona de colección	29
2.7.4.- Tiempo de residencia	29
2.7.5.- Pruebas de agotamiento	31
2.8.- Características de mezclado	32
2.8.1.- Patrones de mezclado	32
2.9.- Características de la dispersión	35
2.9.1.- Fracción de gas	35
2.9.2.- Teoría de la estimación de gas por diferencia de presión	36
2.9.3.- Diámetro de burbuja	40
2.9.4.- Flujo de área superficial de burbujas	43
2.10.- Química de la flotación	45
2.10.1.- Colectores	45
2.10.2.- Mizelación	51
2.10.3.- Espumantes	52

CAPITULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1.- Construcción de una columna de laboratorio	53
3.2.- Determinación de las variables de operación	56
3.2.1.- Selección del burbujeador cilíndrico recubierto con tela de lona	56
3.2.2.- Establecimiento de la tensión superficial del líquido	58
3.2.3.- Determinación del patrón de flujo de mezclado	60

3.2.4.- Determinación de la relación molar xantato amílico de cobre:sal de cobre	62
3.3.- Construcción de una celda de conductividad eléctrica	63
3.4.- Flotación iónica	66

CAPITULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.- Caracterización de los burbujeadores de lona	68
4.1.1.- Sistema aire-agua sin espumante	68
4.1.2.- Sistema agua aire con espumante	70
4.2.- Determinación del tiempo de residencia y patrón de mezclado	83
4.3.- Flotación de iones de cobre en solución	86
4.3.1.- Cálculo de la constante de velocidad de flotación	88

CAPITULO V CONCLUSIONES

5.1.- Conclusiones	90
5.2.- Trabajo futuro	92

CAPITULO VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 95

CAPITULO II

- Figura 2.1.** Columna de Flotación
- Figura 2.2.** Zona de Colección
- Figura 2.3.** Zona de limpieza
- Figura 2.4.** Clasificación general de dispersores
- Figura 2.5.** Relación general entre el gas retenido en función de la velocidad superficial de gas
- Figura 2.6.** Velocidad superficial de gas Vs. Gas retenido, efecto de la velocidad de líquido en contracorriente con las burbujas.
- Figura 2.7.** Distribución del tiempo de residencia flujo tipo pistón y un mezclador perfecto
- Figura 2.9.** Adsorción del colector sobre la superficie de una partícula.
- Figura 2.10.** Enlace teórico entre la especie mineral y la molécula de xantato
- Figura 2.11.** Representación esquemática de una micela.
- Figura 2.12.** Orientación de los grupos polar y no polar de los espumantes en la interfase aire-agua

CAPITULO III

- Figura 3.1** Representación esquemática de la columna de flotación empleada para la flotación de iones en solución.
- Figura 3.2.** Pantalla digital Cole Parmer para lectura de caída de presión hidrostática en la columna
- Figura 3.3.** Textura de la tela filtro utilizada para recubrir los burbujeadores utilizados en este trabajo.

Figura 3.4	Instrumento para medir la tensión superficial de líquido de acuerdo al principio de formación de gota
Tabla 3.1	Estimaciones de tensión superficial del líquido para diferentes adiciones de aceite de pino a agua corriente
Tabla 3.2	Propiedades físicas y químicas de xantato amílico de potasio (Alkemin S.A. de S.R.L. Morelia, Michoacán, México)
Figura 3.5	Representación esquemática de la celda de conductividad eléctrica utilizada para medir el tiempo de residencia de la fase continua
Figura 3.6	Fotografía del conductivímetro Tacussel Electronic CDRV62E
Figura 3.7	Tarjeta convertidora de señal y de adquisición de datos Solartron Instruments 35951 I.M.P.
Figura 3.8	Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3100

CAPITULO IV

Figura 4.1	Fracción de gas Vs. Velocidad superficial de gas para el sistema aire-agua sin espumante.
Figura 4.2	Diámetro promedio de burbuja Vs. Velocidad superficial de gas para los datos de la Figura 4.1
Figura 4.3	Fracción volumétrica de gas contra la velocidad superficial de gas para el caso de 20 ppm de espumante (66.3 dinas/cm.).
Figura 4.4	Diámetro promedio de burbuja Vs. Velocidad superficial de gas.
Figura 4.5	Cambio en el flujo del área superficial de burbujas con la velocidad superficial de gas, para el caso de la adición de 20 ppm de aceite de pino.

Figura 4.6	Relaciones de fracciones volumétricas de gas y velocidades superficiales de aire para el caso de 40 ppm de espumante (55.3 dinas/cm.)
Figura 4.7	Relaciones de diámetro de burbuja y velocidad superficial de gas para los datos de la figura 4.6
Figura 4.8	Cambios en el área superficial de burbujas con la velocidad superficial de aire para el caso de 40 ppm de espumante y γ de 55.3 dinas/cm.
Figura 4.9	Relación entre la fracción volumétrica de gas y la velocidad superficial de gas para el caso de una tensión superficial de 44.2 dinas/cm.
Figura 4.10	Diámetro promedio de burbuja para el caso de adición de 60 ppm de espumante.
Figura 4.11	Cambios en el área superficial de burbujas con la velocidad superficial de gas y la coalescencia de burbujas para los datos de la figura anterior.
Tabla.- 4.1	Valores máximos de fracción volumétrica de gas, diámetro de burbuja y área superficial de burbujas.
Figura 4.12	Máximas fracciones de gas para cada caso de adición de espumante.
Figura 4.13	Diámetro promedio de burbuja para diferentes casos de adición de espumante.
Figura 4.14	Máxima área superficial de burbuja para cada caso de adición de espumante.
Figura 4.15	Comportamiento típico de cambios en la concentración del cloruro de potasio inyectado con el tiempo.
Tabla 4.2	Cálculo del número de dispersión a diferentes valores de velocidad superficial de gas.
Figura 4.16	Resultados de recuperación acumulada de iones de cobre en solución para tres diferentes relaciones molares colector:sal de cobre.
Figura 4.17	Variaciones de la constante de la velocidad de flotación de iones de cobre para los datos de la Figura 4.16.

1.1.- Introducción

La aplicación de dispersiones de gas para flotar partículas finas en agua comenzó en el siglo pasado (la primera fue registrada en 1906), en el campo de procesamiento de minerales. Este proceso fue aplicado muy poco fuera de este campo, hasta que cerca de 1960, el proceso de aire disperso (el cual había tenido éxito en el campo de la industria de la pulpa y el papel), fue aplicado al tratamiento de aguas residuales. Las siguientes dos décadas vieron un creciente desarrollo en temas de investigación relacionados con aplicaciones no minerales de los equipos de flotación ^[1].

Tradicionalmente el proceso de flotación era llevado a cabo en celdas mecánicas, con el paso del tiempo y el estudio de los fenómenos inherentes a la flotación de partículas finas se ha descubierto un problema relacionado con la recuperación de materiales hidrofílicos (que no se adhieren a las burbujas de aire), Un método alternativo para eliminar partículas hidrofílicas surgió con la columna de flotación ^[2].

La flotación puede ser definida como un proceso de separación de partículas (o agregados) o gotas vía adhesión a burbujas de aire. Las unidades burbujas – partículas (gotas) presentan una densidad aparente menor al del medio acuoso y flotan hasta la superficie de un reactor, de donde son removidos. Las áreas de aplicación de este proceso son:

Ingeniería de Minas-Metalurgia

Tratamiento de minerales (Separación diferencial de partículas minerales):

- Sulfuros, (Cu, Pb, Zn, Mo, etc.), Oxi-Minerales, (Mn, Nb, Arcillas, etc.), Minerales no metálicos, fosfatos, fluorita, etc., Metales nativos: Au, Ag, Hg, Carbón “metalúrgico”, Sales solubles: KCl, NaCl, Yodo, Ácido Bórico.
- Beneficio (adecuación) de materias primas (pigmentos, caolín, arcillas para cerámica); Medio Ambiente (separación sólido/líquido o líquido/líquido),
- Tratamiento de compuestos orgánicos (plantas de extracción por solvente), aceites, grasas y colorantes (ágatas),
- Tratamiento de efluentes que contienen metales pesados, aniones (CN, CrO₄, AsO₄, SO₄, PO₄, MoO₄, F), complejos y quelatos (galvanoplastia, siderúrgicas, industria minero-metál-mecánica)
- Metales pesados “removibles” (recuperables) por flotación: Ag⁺¹, Sn⁺², As⁺³, Cr⁺³, Cr⁺⁶, Be⁺², Cd⁺², Co⁺², Ga⁺², Ge⁺⁴, Hg⁺², Pb⁺², Mn⁺², Ni⁺², Cu⁺², Zn⁺², Sb⁺³, Se⁺².

Otros

- Separación de proteínas, impurezas en la industria del azúcar, separación de aceites, grasas, tensoactivos (detergentes), remoción de olor y residuos de la industria de alimentos, reciclado de plásticos, pigmentos, colorantes y fibras, separación tinta-papel, gomas, resinas, pigmentos de los “tonners” de las impresoras a láser, espesamiento de lodos activados, microorganismos (algas, hongos, bacterias), metales en química analítica.

- Tratamiento de suelos: remoción de pesticidas, aceites y elementos radioactivos; separación de pigmentos, semillas; tratamiento de aguas de proceso para el control de la corrosión, remoción de detergentes, aguas para uso industrial y doméstico ^[3].

La flotación iónica es un método que remueve iones, complejos y quelatos con el uso de tensoactivos o compuestos orgánicos para formar unidades insolubles. En algunos casos es necesaria la adición de un reactivo activador y debido a la necesidad de nuevas técnicas para la eliminación de iones metálicos de soluciones diluidas como una etapa de refinamiento antes de las separaciones convencionales

En la depuración de aguas contaminadas, la flotación iónica se consolida como una técnica eficiente y atractiva inclusive para soluciones de lixiviación extremadamente diluidas como las provenientes del procesamiento de metales preciosos ^[4].

El proceso de flotación ha sido estudiado dentro del área minero-metalúrgica y se encuentra incorporado en la mayoría de los procesos extractivos. Sin embargo, su aplicación como tecnología de descontaminación de efluentes líquidos no es muy conocida en este sector; no obstante de ser un método viable en el tratamiento de aguas de proceso ^[3].

En consecuencia, la depuración y tratamiento de efluentes líquidos constituye un aspecto muy importante en la preservación del medio ambiente. Los sistemas de purificación de efluentes líquidos (aguas residuales), se basan en la eliminación de los contaminantes utilizando procesos físicos, químicos y biológicos; el cual dependerá del tipo de contaminantes y el grado de depuración requerido.

El tratamiento de aguas residuales se clasifica generalmente en tres etapas de depuración: primario, secundario y terciario, dependiendo del grado de tratamiento a que se somete ^[5]. En los proceso de tratamiento primario se eliminan la mayor parte de las materias sólidas en suspensión (grasas, aceites), rebajándose moderadamente la demanda de oxígeno (DBO) ^[5]. El tratamiento secundario elimina la materia orgánica biodegradable utilizando procesos biológicos que se aproximan a los que tienen lugar en la degradación natural.

Existen dos tipos de reacciones bioquímicas:

1. Reacciones Aerobias. (presencia de oxígeno)
2. Reacciones Anaerobias. (ausencia de oxígeno)

Los sistemas más utilizados en el tratamiento secundario son: lodos activados, filtros bacterianos, lagunas aireadas y balsas de estabilización, todos estos procesos se basan en el proceso de digestión aerobia ^[5]. Dentro del tratamiento terciario las aguas tratadas provenientes de los sistemas primario y secundario pueden contener contaminantes disueltos no eliminados tales como materia orgánica que no es biodegradable, sólidos en suspensión, sales inorgánicas disueltas entre las que se encuentran el nitrógeno, fósforo así como también iones de metales pesados.

Para eliminar estos contaminantes se utilizan técnicas de descontaminación tales como:

1. Adsorción (usando carbón activado)
2. Intercambio Iónico (usando resinas orgánicas sintéticas)
3. Osmosis Inversa
4. Precipitación Química

La flotación es un proceso físico, versátil basado en propiedades superficiales ^[6], usando dispersiones agua-aire, donde las burbujas son el medio de transporte de las especies a separar. En 1960 Boutin y Trembay patentaron un dispositivo de flotación llamado “columna de flotación” usando dispersores del gas en el fondo de la columna; este reactor ha demostrado que produce mayores recuperaciones que los sistemas utilizados por tradición (celdas mecánicas) ^[7].

1.2.- Objetivo.

Objetivo General:

Establecer las condiciones hidrodinámicas y químicas para la eficiente separación de iones de Cu^{2+} disueltos en agua empleando reactores columnares.

Para dar cumplimiento al objetivo general antes mencionado se requiere cubrir las siguientes etapas:

- Construcción e instrumentación de una columna de flotación de laboratorio de 10 cm. de diámetro y 4.07 m. de altura
- Elaboración de cinco dispersores del gas con recubrimientos de 2, 4, 6, 8 y 10 capas de tela sintética de lona filtro.
- Determinación de las variables de operación óptima de la columna
 - o Velocidad Superficial de Gas
 - o Fracción de Gas Retenido
 - o Diámetro de Burbuja
 - o Concentración de Espumante
 - o Flujo de Área Superficial de Burbuja
- Pruebas de agotamiento de la especie iónica Cu^{2+}

1.3.- Justificación

Cuando las aguas residuales de tipo doméstico son lanzadas a los ríos o cuerpos de agua sin ningún tratamiento o desinfección suelen contaminarlos con altas concentraciones de bacterias, virus y parásitos creándose un grave problema de salud pública. Entre las principales enfermedades que se propagan por este mal manejo de las aguas residuales están las diarreas (bacterianas y víricas), la tifoidea, el cólera, la hepatitis infecciosa, la amibiasis, etc.

La mayoría de las industrias producen descargas de desechos líquidos que tienen demandas bioquímicas de oxígeno (DBO) muy altas pero concentraciones de coliformes fecales menores que las de las aguas residuales domésticas, pudiéndose decir que los desechos industriales constituyen un gran problema ecológico y los desechos domésticos un gran problema de salud pública aunque ambos coadyuven en el deterioro general de la calidad del agua.

La disponibilidad de agua para actividades tan diversas como el riego de cultivos, el abastecimiento para el consumo humano o las necesidades industriales, esta haciendo que su obtención sea cada vez más problemática.

La captación de aguas en niveles freáticos poco profundos, registran una contaminación con metales pesados que provienen de las filtraciones de residuos.

En lo que se refiere a los mantos freáticos la contaminación va en ascenso., la agricultura, las actividades extracto-industriales y la contaminación de la población son puntos de incidencia mayores en la contaminación de los acuíferos.

El problema de aguas contaminadas es severo principalmente con iones de metales pesados, causados en su mayoría por residuos acuosos industriales sin tratar. Es necesario procesar las soluciones residuales antes de su descarga en alcantarillas, ríos y lagunas., evitando así un foco de contaminación.

Por lo tanto el presente trabajo propone la utilización de un reactor columnar para el tratamiento de aguas con un contenido de iones de metales pesados en solución; aportando esta tecnología para el procesamiento de aguas contaminadas.

2.1.- Contaminación de aguas.

La disponibilidad de agua para actividades tan diversas como el riego de cultivos, el abastecimiento para el consumo humano o las necesidades industriales, complican cada día más su obtención.

Las cuencas fluviales mexicanas en su mayoría se encuentran sobre explotadas a causa de la construcción de grandes presas o por la extracción intensa por bombeo [5].

La captación de aguas en niveles freáticos no muy profundos, registran una contaminación con metales pesados que provienen de las filtraciones de residuos [5]. Las condiciones sanitarias precarias de esta agua de consumo, hacen que aparezcan cíclicamente focos epidémicos y enfermedades crónicas en distintos núcleos de la republica mexicana.

En cuanto a la contaminación de aguas superficiales que alude tanto a las que discurren de forma natural, como a las embasadas artificialmente con fines de consumo. El vertido de aguas industriales con metales, aguas fecales, y pesticidas son una mínima representación del conjunto de agentes contaminantes que la degradan; las distintas medidas preventivas y las mejoras de la calidad en el aprovechamiento, son las medidas más efectivas para combatir el riesgo de infección por consumo de agua en la republica mexicana según la organización mundial de la salud OMS [5].

En lo que se refiere a mantos freáticos la contaminación va en aumento; la agricultura, las actividades extractivo-industriales y la contaminación de la población son tres de los factores de mayor incidencia de la contaminación de acuíferos.

Los procesos de degradación se derivan de las siguientes acciones: bombeo de agua de los depósitos subterráneos, los cuales se agotan si la recarga no es efectiva; infiltración de productos y residuos industriales con la incorporación de metales pesados altamente contaminantes como el boro, cromo, níquel, zinc, arsénico, cadmio, plomo, cobre. Los cuales modifican la acidez o basicidad natural de las aguas y su salubridad; del mismo modo que la incorporación de elementos químicos nocivos provenientes de fertilizantes y pesticidas ^[5].

El Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo; que ha sido afectado con las aguas residuales de la ciudad de México que se emplearon para el riego agrícola y fueron suministradas a través del llamado canal de desagüe. Por dicha canalización se conducen las aguas negras de la capital consiguiéndose elevadas productividades, pero a la vez se presentó una significativa presencia de metales pesados, surfactantes, grasas y aceites y una proporción inusualmente de Boro. Además los detergentes contenidos en los efluentes residuales son del tipo no biodegradables con características hidrofóbicas e hidrofílicas fuertemente impactantes. Los factores antes mencionados afectaron grandemente la cadena agua-suelo-organismos vivos, produciendo una gran mortalidad en el elemento biótico ^[5].

Se tiene conocimiento del suceso ocurrido en la planta de la empresa Cromatos de México ubicado en la localidad de lechería en el norte del Estado de México, los depósitos no controlados de sus residuos los cuales están formados por cromo hexavalente el cual es altamente tóxico ya que este componente químico es muy utilizado en el sector del curtido de pieles, no obstante su almacenamiento residual no es objeto de especiales cuidados, teniendo como consecuencia la contaminación de suelos y aguas superficiales con cromatos y dicromatos y en casos extremos acuíferos contaminados con cromo VI ^[5].

La planta fue clausurada en 1984; aun con esto en la actualidad con la producción suspendida definitivamente quedaron depositadas 75,000 toneladas de materiales de desecho en un enclave que no es apropiado para este uso, el cromo de los desechos se ha lixiviado por la lluvia y ha pasado al suelo incluso a los acuíferos de los contornos, permaneciendo de forma latente en la cubierta edáfica con el riesgo de ser movilizados por los vientos dominantes produciendo así un aumento de afecciones médicas, daños en las construcciones y desigual desarrollo de las especies arbóreas.

Además de la contaminación con cromo hexavalente, también se ha reportado la contaminación de aguas con arsénico y otros metales pesados ^[8]. La explotación desmedida de mantos acuíferos ha alcanzado en un alto grado de afectación a zonas que se consideraban de gran potencial hidráulico como la comarca lagunera, en donde se consumen agua contaminada con arsénico; pero no solo la explotación desmedida de los mantos es causa de contaminación si no también, y de manera altamente peligrosa es la falta de control y tratamiento adecuado durante la disposición final de los residuos sólidos que permiten la generación de fluidos que ocasionan contaminación del suelo y aguas subterráneas; con la consecuencia de propagar enfermedades.

Un estudio de la Organización Mundial de la Salud revela que los principales agentes que dañan a la salud se encuentran en solventes, gases y metales pesados ^[9]. Un caso de afectación se presenta en el Estado de México en el municipio de Ecatepec., en donde los lixiviados o jugos que generan miles de toneladas de basura del tiradero municipal de Santa María, Chiconautla., contaminan pozos de agua potable, luego de que un estudio de impacto ambiental determinara la presencia de coliformes, cadmio y plomo en el líquido que podrían afectar a los habitantes de esta región ^[10].

En la población de Escamela en el Estado de Veracruz; donde la empresa Kimberly Clark de México en su planta de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar ha causado daños ecológicos en el río escamela, la presa de Tuxpango y el Río Blanco, que son calificados de irreversibles los daños ocasionados por verter irresponsablemente sin tratar residuales industriales sólidos y agua del proceso de blanqueo que contienen sosa, oxidantes y metales pesados ^[11].

El problema de contaminación es severo principalmente en aguas con iones de metales pesados, causados en su mayoría por residuos acuosos industriales sin tratar; por tal razón, es necesario procesar las soluciones residuales antes de su descarga en alcantarillas, ríos y lagunas para evitar la contaminación por iones metálicos.

La mayoría de las industrias producen descargas de desechos líquidos que tienen demandas bioquímicas de oxígeno (DBO) muy altas pero concentraciones de coliformes fecales menores que las de las aguas residuales domésticas, pudiéndose decir que los desechos industriales constituyen un gran problema ecológico y los desechos domésticos un gran problema de salud pública aunque ambos coadyuven en el deterioro general de la calidad del agua.

La disponibilidad de agua para actividades tan diversas como el riego de cultivos, el abastecimiento para el consumo humano o las necesidades industriales, esta haciendo que su obtención sea cada vez más problemática.

La captación de aguas en niveles freáticos poco profundos, registran una contaminación con metales pesados que provienen de las filtraciones de residuos.

2.2.- Columna de Flotación

La columna de flotación fue patentada por Boutin y Tremblay en 1962; las primeras empresas que probaron columnas en sus circuitos de flotación fueron Iron Ore Co. Canadá y Opemiska, utilizando columnas de sección transversal cuadrada de 45 cm. por lado, las cuales fueron abandonadas por problemas operacionales. En 1970 Sastry así como Fuerstenau ^[12] y Rice ^[13] et al., en 1974, analizaron las características de mezclado y colección de la columna de flotación.

En 1981 surgió un gran interés por la comercialización, incrementándose considerablemente el número de columnas a nivel industrial en todo el mundo; en la actualidad existen columnas en Australia, Canadá, Chile, México, Sud África, Perú, Estados Unidos de América y otros países.

La columna de flotación, figura 2.1 es un reactor tubular en posición vertical; las columnas industriales se encuentran entre 9 y 15 metros de altura y su diámetro entre 0.5 y 3.0 metros, el diámetro de la columna es usado para designar su tamaño ^[7]. La columna de flotación se divide en dos zonas distintas: la zona de colección, comprendida entre el fondo de la columna y la interfase espuma-pulpa, y la zona de limpieza la cual se encuentra entre la interfase espuma-pulpa y el labio de rebose del concentrado.

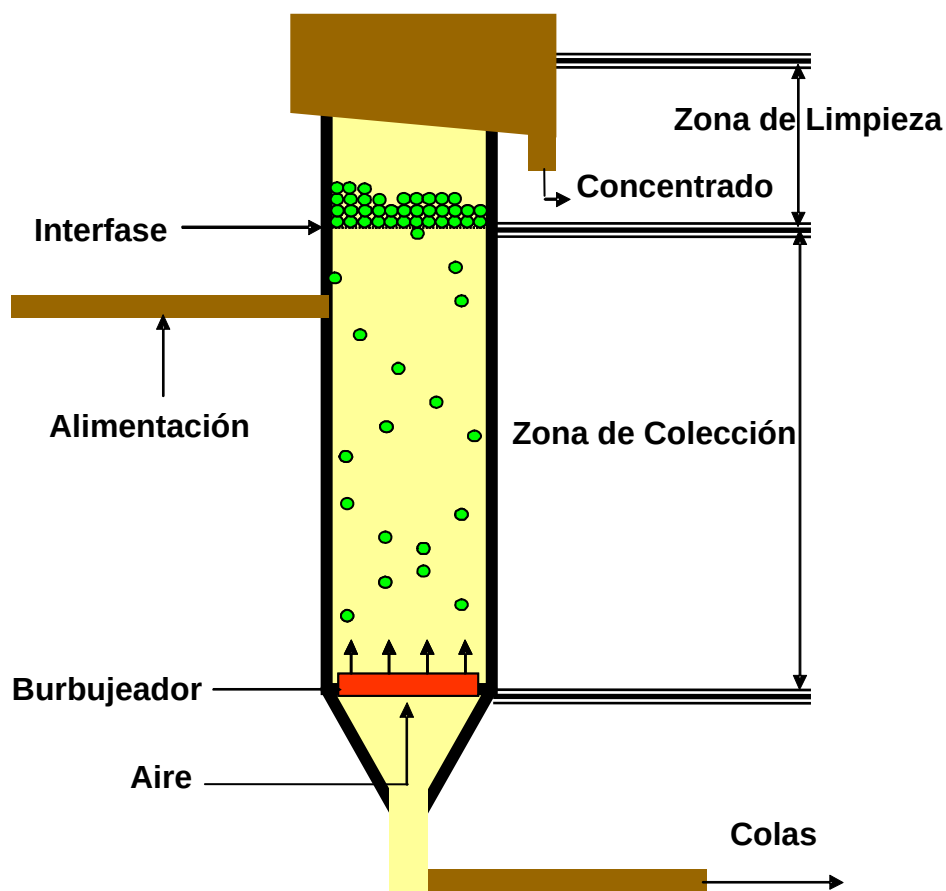


Figura 2.1.- Columna de Flotación

2.2.1.- Zona de colección.

En la zona de colección, figura 2.2 situada abajo del punto de alimentación, las partículas suspendidas descienden y se ponen en contacto con un flujo ascendente de burbujas de aire producidas por un burbujeador situado en la base de la columna. Las partículas flotables (hidrofóbicas) se adhieren a las burbujas y son transportadas a la zona de limpieza arriba del punto de alimentación; el material no flotable (hidrofílico), es retirado por la corriente de colas que se encuentra en el fondo de la columna., este comportamiento se ve favorecido por la ausencia de agitación mecánica.

La ausencia de agitación por artefactos mecánicos en la columna promueve el flujo descendente y constante del material de interés (iones metálicos); los cuales colisionan con las burbujas que ascienden y son transportados a la zona de limpieza para posteriormente rebosar por la parte superior de la columna.

Uno de los componentes muy importante de la columna de flotación sin lugar a dudas es el burbujeador, el cual se encuentra situado en la parte inferior de la columna y por este dispositivo es el encargado de introducir el aire a presión y existen generadores internos o externos de burbujas, y son los burbujeadores los que reciben mayor atención en toda instalación antigua o nueva; se puede afirmar que los generadores de burbujas son el “corazón” de la columna de flotación.

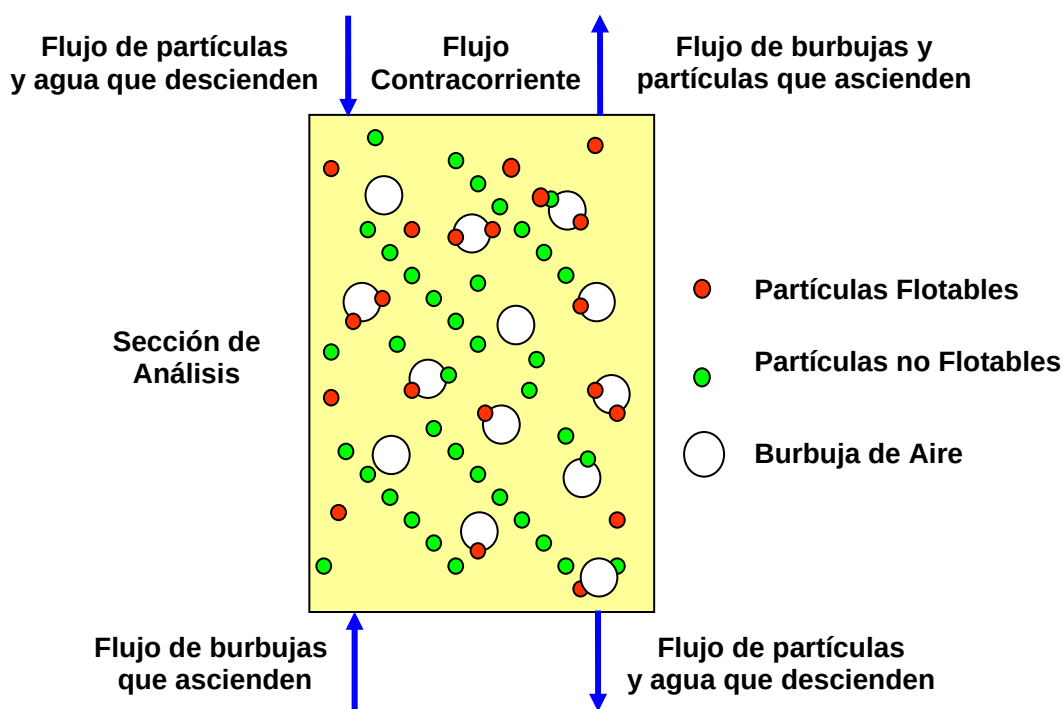


Figura 2.2.- Zona de Colección

2.2.2.- Zona de limpieza

El flujo a contracorriente de la zona de limpieza (flotación de minerales), figura 2.3 está constituido por burbujas ascendentes cargadas de mineral provenientes de la zona de colección y el agua de lavado proveniente de los distribuidores situados a unos centímetros por debajo del labio de rebose de la columna. Existen dos razones por las cuales es necesario la incorporación de agua de lavado: la 1era. es evitar el entrapamiento mecánico de partículas de ganga por burbujas que ascienden de la zona de espuma; minimizando la contaminación del concentrado por tales partículas., la 2da. razón es mantener un balance del volumen en la columna, ya que el concentrado que se descarga de la columna lleva consigo agua la cual se compensa mediante la adición de agua de lavado.

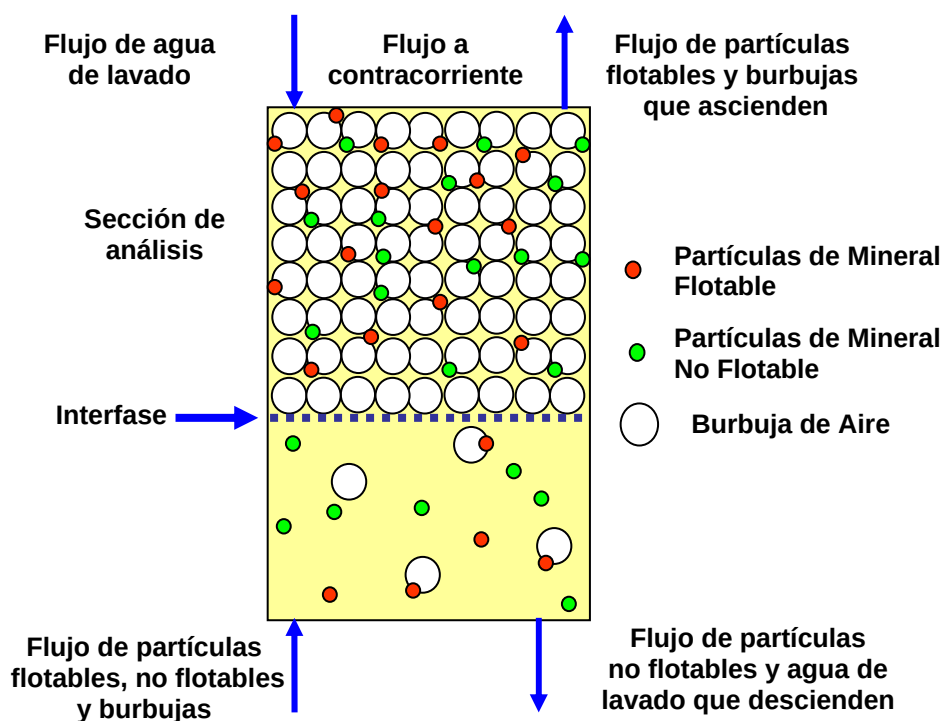


Figura 2.3.- Zona de limpieza

2.3.- Dispersiones de gas en flotación

Desde la introducción de dispersiones de gas en columnas de flotación en 1960 ^[7]. Y hasta la fecha; ha sido causa de extensa investigación, al probar columnas rectangulares y cilíndricas., demostrando que este nuevo equipo tiene mayores recuperaciones y grado de concentrado en el área de minerales, que las que se obtienen con máquinas de flotación tradicional.

Esto radica en las siguientes ventajas que presenta un reactor columnar: una gran zona de colección, debido a que la alimentación se hace a un tercio de altura medido desde el tope de la columna, aumentando la zona de contacto entre burbuja-partícula; menor grado de mezclado y la implementación de agua de lavado para liberar las especies hidrofílicas atrapadas en la espuma obteniendo un concentrado mas puro.

En las máquinas de flotación el intenso mezclado es la causa de recuperaciones y grado de concentrado menores ^[14]. Esta tecnología de dispersión de gas con dispersores porosos; y los terminos físicos involucrados en el control de operación de columnas pueden ser empleados en otros dispositivos de flotación.

Los mismos principios que se aplican a celdas convencionales de flotación son validos para la flotación en columna; siendo la cinética de flotación mucho más rápida, de esta manera las partículas hidrofóbicas son adheridas a las burbujas.

2.4.- Generadores de dispersiones de gas

El método de generación de burbujas es otra característica importante que distingue a las columnas de flotación de las máquinas convencionales. En las columnas de flotación las burbujas de aire se generan empleando dos tipos de burbujeadores; cuyo método más común es la generación de burbujas a través de un burbujeador interno cerca de la base de la columna, un segundo método de generación de burbujas es el uso de burbujeadores externos ^[7]. (oficina de minas de E.U.A., Deister, Cominco; etc.).

El primer tipo incluye cuerpos porosos fabricados de acero, materiales cerámicos o vidrio sinterizado, además de tela fieltro (lona) y hule perforado; en las plantas de instalaciones mineras se prefieren utilizar burbujeadores flexibles debido a que son menos propensos al taponamiento de sus poros.

Los generadores externos emplean dispositivos especializados en los cuales el aire y la solución acuosa se ponen en contacto fuera de la columna y son alimentados a través de la corriente de alimentación ^[15].

Cabe destacar que en el presente trabajo se emplearán cinco dispersores porosos fabricados de tela fieltro de 2,4,6,8 y 10 capas de recubrimiento; así mismo se menciona la importancia que tiene el tipo de dispersor ya que es el corazón del proceso de flotación, que permite controlar en cierto grado las características de la dispersión las cuales son: (ϵ_g , d_b y S_b).

La figura 2.4 presenta una descripción general de los tipos de dispersores

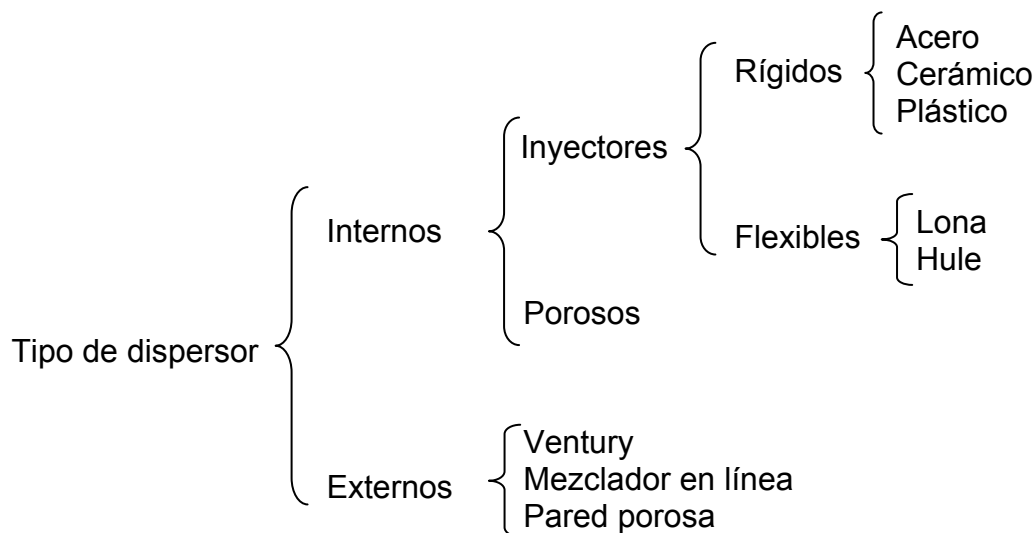


Figura 2.4.- Clasificación general de dispersores

2.4.1.- Efecto del area superficial del burbujeador

Se ha estudiado el efecto del area superficial del dispersor, respecto al área de sección transversal de una columna ($R_s = A_c / A_D$), donde A_c es el area de sección transversal del dispositivo de flotación, A_D es el área superficial del dispersor, probando generadores de burbujas internos: de acero inoxidable, tela filtro y plástico ^[16].

Estos datos experimentales presentan que con la disminución de la relación R_s , el gas retenido aumenta para los diferentes dispersores evaluados; para valores de $R_s > 1$ se tiende a producir tamaños de burbuja menos homogéneos indicando con esto la transición del régimen de flujo de burbujas estables al régimen turbulento.

Para $R_S < 1$ se tiende a generar burbujas de tamaño uniforme, y en condiciones de operación del regimen del flujo de burbujas homogéneo, además se muestra que la transición de un tipo de flujo de burbujas a otro es debido a que la distribución de gas no es uniforme ^[16].

2.5.- Flotación ionica

Recientemente; se ha descrito en la literatura una tecnología novedosa, para la recuperación y eliminación de iones de soluciones acuosas, "La flotación Ionica" presentada por Sebba (1959-1962) ^[18].

En este proceso se agrega a la solución a tratar un reactivo ionico de superficie activa (colector) que se adsorbe a la interfase gas-liquido ^[19]., los iones de carga opuesta (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} etc.) deben ser co-adsorbidos por neutralidad de la carga; siempre y cuando el reactivo colector interactue más fuertemente con los iones de interes de superficie no activa (coligante), que con los iones con los cuales estaba originalmente asociado (K^+ , H^+ , Na^+) el coligante será adsorbido preferentemente, ya sea eléctrica o químicamente ^[19].

Si se provee un área interfacial gas-líquido suficientemente grande, dada por una dispersión de gas a traves de una solución, el coligante puede ser concentrado y removido junto con moléculas del colector en la fase espuma ^[18,20]. El uso de surfactantes apropiados, ya sea el propio colector o diferentes espumantes, prevendrán la ruptura de las burbujas y promoverán la formación de una cama de espuma estable.

En la flotación ionica; donde pares de iones o complejos solubles son adsorbidos a la interfase gas-líquido, la separación por flotación con espuma tambien incluye la flotación de precipitados, en la cual el colector u otras especies acomplejadas dan como resultado la precipitación de finas partículas conteniendo el ion de interes y entonces son flotadas (flotación de iones precipitados); lo cual difiere con la definición de flotación ionica donde iones de metales pesados son colectados por el orgánico hidrofóbico.

Se han realizado estudios de la flotación de iones precipitados de cromo hexavalente con bromuro de octadeciltrimetilamonio ODTA-Br para posteriormente en base a las mejores condiciones de precipitación realizar la flotación del cromo VI acomplejado ^[21]. En un segundo caso se hace referencia a flotación ionica cuando realmente se llevo a cabo flotación de precipitados, la metodología experimental fue similar al primer caso pero acomplejando iones de cobre y zinc con un colector SCX1 (aldrich 99%), con la subsecuente separación de los precipitados mediante flotación en columna ^[22].

Los resultados obtenidos de los estudios de precipitación indican que la concentración de cobre en el efluente puede ser reducido en su totalidad, mientras que la concentración de zinc es reducida en un 80%; los resultados de los estudios de flotación indican que es posible obtener una eficiencia del orden de 95% en la remoción del precipitado ^[22].

Se han identificado técnicas de flotación ionica exitosas para separar muchos de los elementos metálicos en la tabla periódica de soluciones acuosas ^[23]., recientemente existe interes de usar la tecnología de flotación iónica para recuperar metales preciosos de licores de lixiviación ^[14]. Además de remover contaminantes traza, de grandes volúmenes de efluentes y otras soluciones de desecho ^[24].

Una revisión sobre los estudios de flotación iónica y su potencial en operaciones hidrometalúrgicas ha resaltado la potencialidad de esta técnica para estos procesos en comparación de otros tradicionales como la precipitación, extracción con solventes, etc. ^[19].

Se han realizado estudios termodinámicos sobre los fenómenos de adsorción en flotación iónica, encontrando que la densidad de adsorción se lleva a cabo de algunos segundos a varios minutos dependiendo del tipo del colector; donde la densidad de adsorción es proporcional a la concentración del ion metálico en la solución, para estos experimentos se utilizaron colectores de alto peso molecular (dodecilsulfato, tetradecilsulfato, y hexadecilsulfato de sodio), de largas cadenas hidrocarbonadas, teniendo como inconveniente la baja solubilidad en medios acuosos siendo este un problema importante; además estos colectores son tóxicos, contaminantes y deterioran el ecosistema, en estos estudios se determinó que la cinética de recuperación, para lograr el 100% de separación se requiere de alrededor de trescientos minutos ^[19,25,26]., indicando que el sistema sigue un control totalmente químico.

Sin demeritar la importancia termodinámica registrada en esos estudios, los autores no presentan el efecto hidrodinámico de la dispersión de gas en el sistema de recuperación del ion de interés; En otros trabajos se estudio el efecto del aumento de la fuerza iónica por la adición de NaCl en la separación de As^{5+} mediante la flotación de adsorción de coloides ^[27].

Demostrando efectos significativos, la adición de SO_4^{2-} reduce dramáticamente la separación de As^{5+} , además la adición de NaCl en Na_2SO_4 , aumenta la fuerza iónica de 3.4×10^{-3} a $3.49 \times 10^{-1} \text{ mol/dm}^3$, reduciendo la separación del As^{5+} .

Se piensa que la adición de Na_2SO_4 produce un efecto competitivo debido a la adsorción de iones SO_4^{2-} en las superficies cargadas de hidróxido férrico (empleado como agente coagulante); la adición de 80 mg/l de Al^{3+} en presencia de una fuerza iónica elevada con Na_2SO_4 aumenta la separación de As^{5+} de 37.7% (sin Al^{3+}) a 76.5% [27].

Se han estudiado otros procesos relacionado con la separación de metales pesados usando técnicas combinadas de flotación y biosorción; donde la biomasa muerta de levadura *Sccharomyces* es adecuada como bioadsorbente de iones metálicos (Cu, Zn, Ni), también se presentó el estudio electrocinético de la biomasa, los principales parámetros encontrados en el proceso de flotación son: pH, concentración de colector (dodecil amina); la modificación preeliminar de la biomasa y su concentración [28].

En este estudio se analizó la flotación sin colector y con colector; encontrando en la primera que la separación de Cu se acerca al 100% a pH mayor de 6, el níquel se recupera eficientemente (arriba del 80%) a pH arriba de 8.5, y la recuperación de Zn es mayor al 80% cuando se tiene un pH mayor de 8. Por debajo de estos valores de pH las recuperaciones son bajas para el níquel y zinc (alrededor de 20%); no así para el cobre que varía de 20 a 90% [28].

En lo que respecta a la flotación con colector, la adición de dodecil amina aumenta la recuperación del metal; sin embargo, se mantiene el patrón de comportamiento con respecto al pH., la desorción del metal de la biomasa se realiza mediante el lavado con ácido diluido [28].

Otro trabajo probó la separación por flotación de iones de níquel acomplejados con dietilentriamina (DETA $\text{NH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH}_2$), sin y usando amil xantato de potasio como colector, encontrando patrones claros de comportamiento en el sistema usando colector en referencia a la recuperación versus los parámetros de la dispersión de gas logrando recuperaciones del 80%, en contraste con las pruebas sin usar reactivo colector donde no se detectó un patrón claro de comportamiento ^[29].

2.6.- Diferencia entre flotación iónica y flotación de minerales

En flotación iónica el material a colectarse se encuentra en solución en la fase acuosa; y puede ser coloidal ^[18,19].

En la flotación iónica, el producto hidrofóbico puede verse en algunos casos como una fase insoluble antes de que sea colectada por las burbujas; pero en otros casos, la insolubilidad ocurre en la interfase burbuja-líquido pero llega a ser visible en la espuma final ^[19].

En el caso de la flotación de minerales; el proceso es usado para colectar partículas sólidas, las cuales se encuentran dispersas en un medio acuoso., esto se logra mediante la alteración de la naturaleza fisicoquímica de la superficie de las partículas con un agente de superficie activa (colector), creando sitios hidrofóbicos de forma tal que las burbujas de aire se adhieren en ellos y les permite flotar hasta la superficie de la fase acuosa y concentrarse allí ^[30].

También debe notarse que la flotación de minerales es un proceso que se lleva a cabo normalmente después de moler un mineral ^[30].

La flotación iónica; se aplica como una técnica en la tecnología de minerales, después de una etapa de lixiviación en el proceso aun cuando este haya tomado lugar como un proceso natural a través de un largo tiempo por acción de las condiciones del ambiente (agua y aire) ^[18].

Una diferencia más es que en la flotación convencional de minerales por espuma, el área de superficie específica de las partículas de mineral es relativamente baja y por consecuencia es muy poca la cantidad de colector que se adsorbe sobre estas.

La proporción de colector adsorbido sobre las partículas de mineral de interés es despreciable comparado con la cantidad de mineral presente en la pulpa, a diferencia con las cantidades estequiométricas que comunmente se requieren de colector en flotación iónica ^[19].

Es importante reconocer la diferencia entre colector partículas y iones de metales pesados; en el primer caso las burbujas formadas deben ser de tamaño suficiente, tal que la densidad media de la burbuja con las partículas adheridas sea menor que la densidad de la pulpa.

Las burbujas pequeñas dan un área superficial mas grande para una cierta velocidad superficial de gas, aunque se ha notado que el tener burbujas muy pequeñas tiene como resultado una espuma más húmeda; disminuyendo el grado del concentrado.

En el caso de la flotación iónica, si se tiene un área superficial de burbujas muy grande se tiende a mejorar la colección de iones, debido al hecho de que la especie se encuentra en fase acuosa; y la mayor área superficial del dispositivo de flotación cubierta por las burbujas tiende a aumentar la eficiencia del proceso de separación ^[19].

2.7.- Variables en el proceso de flotación

2.7.1.- Velocidad superficial de gas (J_g)

La velocidad superficial de aire; se emplea comunmente para describir la operación de una columna de flotación debido a que puede servir como parametro de comparación para columnas de diferentes diámetros.

Se ha mostrado que J_g es remarcadamente consistente para diferentes tamaños de columna; la velocidad superficial de aire es el flujo volumétrico de aire (Q_g), dividido entre el área de sección transversal de la columna (A_c).

$$J_g = \frac{Q_g (\text{cm}^3/\text{s})}{A_c (\text{cm}^2)} \quad (1)$$

De esta manera sus unidades son (cm/s), el valor de la velocidad superficial de aire esta dado en condiciones estandar de temperatura y presión atmosférica. En muchos casos de los casos el J_g es usado para describir el régimen de flujo de burbujas de columnas de flotación ^[7,17]., donde el gas retenido (ϵ_g); tiene una variación casi lineal con J_g , ver ecuación 1.

La sección lineal es caracterizada por una distribución homogenea de flujo de burbujas de tamaño uniforme ascendiendo a velocidad uniforme, y este comportamiento se denomina flujo de burbujas homogéneo se denota que despues de cierto valor de J_g , comienza la transición de flujo de burbujas estables.

A flujo turbulento donde el gas retenido decrece por la presencia de burbujas de mayor tamaño, que ascienden rápidamente desplazando líquido y pequeñas burbujas hacia la parte inferior de la columna., el flujo deseable en sistemas de dispersión es el flujo estable de burbujas ^[7]. El cambio del flujo de burbujas estables puede usarse como un indicativo del $J_{g \max}$ en una columna de flotación^[31]. Se ha descrito a la velocidad superficial de gas como un parámetro clave para el diseño y escalamiento de columnas industriales ^[31,32].

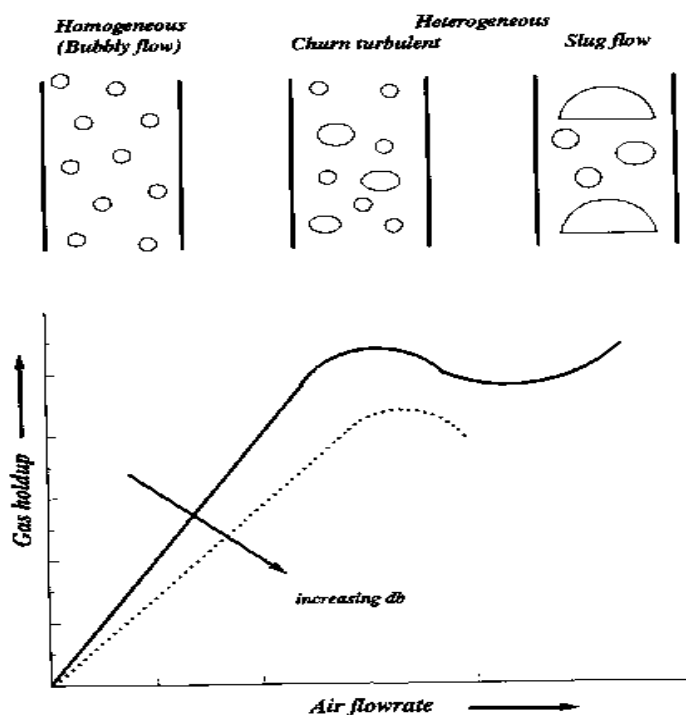


Figura 2.5.- Relación general entre el gas retenido en función de la velocidad superficial de gas ^[7].

2.7.2.- Velocidad superficial de líquido (Jl).

En sistemas de dispersión en columnas para flotación de minerales existen cuatro corrientes: alimentación, colas, concentrado y de lavado (bias); para el caso de la flotación iónica lo único que difiere es el agua de lavado que en general no se emplea.

Cada una de las corrientes es expresada como velocidades superficiales de líquido y se obtienen del flujo volumétrico de líquido en cm^3/s dividido por el área de la sección transversal de la columna en cm^2 quedando las unidades en cm/s [7,17]. ecuación 2.

Controlar los flujos de alimentación y colas tiene una elevada importancia para definir los parámetros de tiempo de residencia del sistema de flotación; nivel de interfase (dispersión-espuma), y a su vez la rapidez con la que el sistema alcanza los fines deseados en términos de separación [32].

$$Jl = \frac{Ql(\text{cm}^3/\text{s})}{Ac(\text{cm}^2)} = \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad (2)$$

Se ha analizado el efecto del incremento de la velocidad del líquido en contracorriente; en una serie de valores constantes de velocidad superficial de gas, los resultados encontrados se muestran en la figura 2.6, donde el incremento de la velocidad superficial de líquido para cierto valor de velocidad superficial de gas se tiene que el gas retenido incrementa., esto se esperaba por la razón de que la velocidad de ascenso de las burbujas (relativo al observador estacionario) disminuye; por el efecto mayor en contracorriente de la velocidad superficial de líquido [7].

Lo encontrado por los autores en realidad corresponde a un efecto aparente que depende de la técnica experimental usada, otros autores han observado un comportamiento opuesto ^[32]. Para estos experimentos; el incremento de la velocidad superficial de líquido disminuyó el máximo de la velocidad superficial de gas tolerable en operaciones dentro del régimen de flujo de burbujas estables ^[7,32].

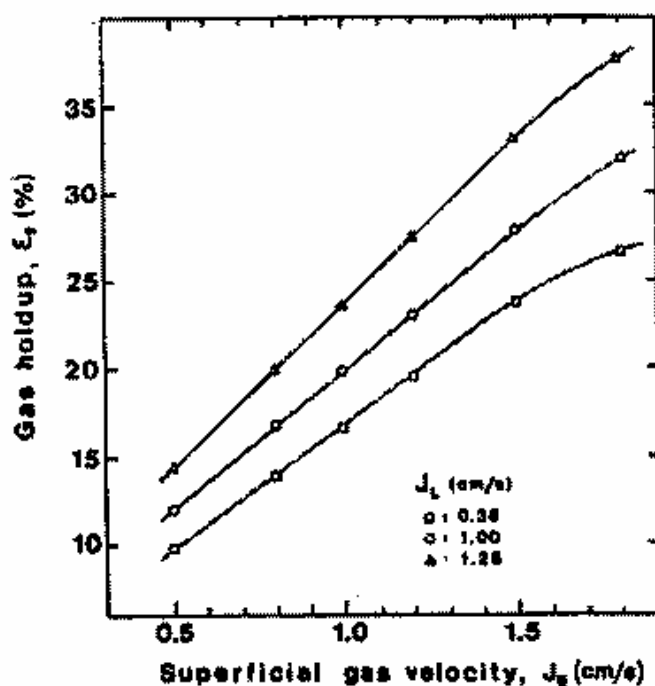


Figura 2.6.- Velocidad superficial de gas Vs. Gas retenido, efecto de la velocidad de líquido en contracorriente con las burbujas. 15mg/1 Dowfroth ^[7].

2.7.3.- Altura de la zona de colección

La zona de colección es la región donde ocurre la coalición entre burbuja y la especie de interés a separar, llevando a cabo el proceso de colección; formando una capa de agregados burbuja-partícula sobre la superficie del líquido, esta región comprendida desde el punto de inyección del gas hasta el nivel de la interfase espuma-pulpa.

En columnas de flotación esta zona se caracteriza por presentar una cinética de flotación de primer orden así como una dispersión axial y también la máxima capacidad de carga ^[32].

2.7.4.- Tiempo de residencia (τ).

Para analizar completamente el alcance del procesamiento en cualquier proceso continuo; es necesario saber cuánto tiempo le toma al material desplazarse de la(s) entrada(s) a la(s) salida(s), para estimar este tiempo de residencia es necesario conocer los patrones de flujo que ocurren en el equipo de dispersión como es el caso de la columna de flotación ^[33]. Dichos patrones pueden determinarse inyectando un trazador de un material convenientemente detectable en el equipo de dispersión, y observando su aparición en la(s) corriente(s) de salida. Un segundo método consiste en cambiar instantáneamente la concentración de un componente de la alimentación y observar el cambio de concentración en la corriente de salida.

El tiempo de residencia en la zona de colección, es un parámetro que representa de manera relativa una aproximación al periodo de permanencia del continuo en la zona de colección.

Este tiempo de residencia aparente, esta dado por tres factores que son:

1. Volúmen de la zona de colección
2. Fracción de gas retenido
3. Velocidad superficial de líquido

$$\tau = \left[\frac{V_{zc}}{Ql} (1 - \varepsilon_g) \right] \quad (3)$$

Donde V_{zc} es el volúmen de la zona de colección (cm^3), ε_g es la fracción de gas retenido, $(1 - \varepsilon_g)$ es la fracción de líquido retenido, y Ql es el flujo volumétrico de líquido cm^3/s , dando unidades de $1/\text{s}$ comunmente expresado como $1/\text{min}$.

También se puede considerar con la siguiente expresión:

$$\tau = \left[\frac{h_{zc} - h_{ce}}{Jl} (1 - \varepsilon_g) \right] \quad (4)$$

Donde h_{zc} es la altura de la zona de colección en cm ., h_{ce} es la altura de la cama de espuma en cm ., ε_g es la fracción de gas retenido, $(1 - \varepsilon_g)$ es la fracción de líquido retenido y Jl la velocidad superficial de líquido en cm/s .

La diferencia entre ambas expresiones radica en el hecho de que la primera maneja unidades en tres coordenadas y la segunda en dos, dando un mejor acercamiento la primera.

2.7.5.- Pruebas de agotamiento

Es evidente que la flotación por espuma es un método fisicoquímico de concentración de especies contenidas en una solución; el proceso involucra un tratamiento químico para crear las condiciones favorables para la unión de las especies de interés a separar a las burbujas de aire. Estas transportan la especie hacia la superficie del líquido; formando una espuma estable la cual derrama y posteriormente la especie se concentra mientras las no deseadas permanecen en la solución y son descargadas por la corriente de colas. La eficiencia con la cual se lleva a cabo la separación es referida como el porcentaje de recuperación; y está en función de un amplio grupo de parámetros de operación, condiciones químicas e hidrodinámicas del sistema.

Para evaluar la eficiencia del sistema es conocer cual es la capacidad máxima de separación de la especie de interés; si se menciona en torno a las columnas de flotación podríamos enunciarlo diciendo que de forma conjunta involucrando parámetros de operación, condiciones químicas e hidrodinámicas lograr el grado máximo de recuperación en un intervalo de tiempo determinado y así poder evaluar la eficiencia del proceso en función de la recuperación obtenida. En otras palabras esto se conoce como pruebas de agotamiento. En las pruebas de agotamiento la recuperación o eficiencia del sistema se estima llevando a cabo un balance másico del sistema a partir de la toma de muestras en las corrientes de concentrado, colas y alimentación; y se realiza el análisis químico de las especies deseadas por los siguientes métodos: Gravimetría y Espectroscopía de absorción atómica.

Durante el proceso de la colección de muestras se lleva a cabo evaluando los intervalos de tiempo de muestreo y se registra el peso de la muestra.

2.8.- Características de mezclado

El proceso de colección de iones en una columna de flotación; se lleva a cabo cuando una burbuja de gas en su recorrido ascendente y encuentra en su recorrido a un ion lo cual produce una colisión ion-burbuja, seguida por la adhesión de la superficie hidrofóbica.

2.8.1.- Patrones de mezclado.

El proceso de colección en una columna de flotación presenta una cinética de primer orden; la recuperación de un componente dentro de un proceso de primer orden depende de tres variables:

1. Constante de velocidad
2. Tiempo de residencia promedio
3. Parámetro de mezclado

Los patrones de mezclado se pueden considerar en función de dos tipos ideales; el de flujo tipo pistón y el de mezclado perfecto ^[33]. El tipo más simple de patrón de flujo a través de un proceso, es el que ocurre cuando todos los elementos de la corriente de alimentación tienen igual tiempo de residencia (τ) en el reactor, a este flujo se le conoce como tipo pistón. El flujo pistón en una columna significa que existe un gradiente de concentración a lo largo de la columna; si se introduce un trazador en la corriente de alimentación este aparecerá después de un tiempo $t=\tau$, figura 2.7, en el caso del mezclado perfecto toda alimentación al sistema se dispersa de inmediato uniformemente por todo el volumen del reactor; cuando se introduce un trazador.

Figura 2.7; puede apreciarse que una parte de este sale instantaneamente mientras que otra parte no sale nunca teóricamente, por lo que existe una distribución del tiempo de residencia que va desde cero hasta el infinito ^[33]. Para una reacción de primer orden con una constante de velocidad k , teniendo transporte de flujo tipo pistón y con tiempo de retención t , la recuperación R esta dada por:

$$R = 1 - \exp(-kt) \quad (5)$$

Y para un sistema que tiene mezclado perfecto con un tiempo de residencia promedio τ :

$$R = 1 - (1 + k\tau)^{-1} \quad (6)$$

El mezclado tiene un efecto perjudicial en la recuperación. Por ejemplo; cuando $t=\tau=5$ min. y $k=0.5$ min.⁻¹, la recuperación en transporte flujo piston es del 92%, mientras que la recuperación en flujo de mezclado perfecto es solo del 71% ^[33].

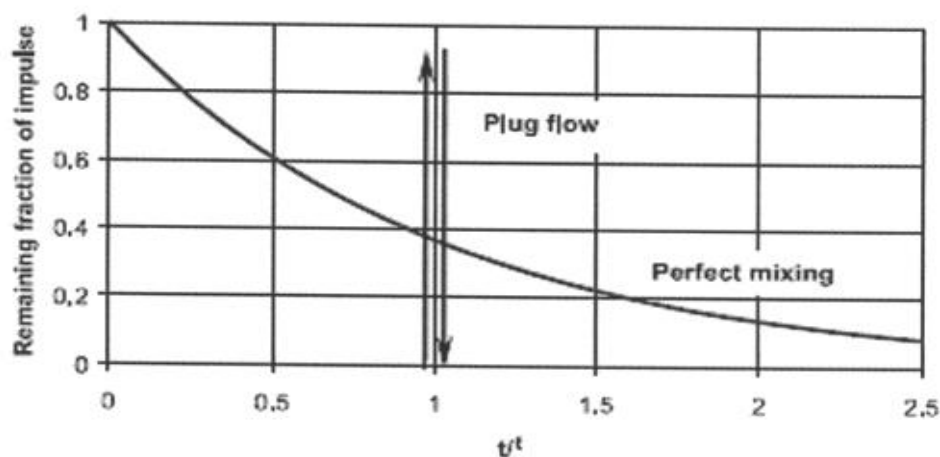


Figura 2.7.- Distribución del tiempo de residencia flujo tipo pistón y un mezclador perfecto ^[54].

En condiciones normales de operación, se considera un mezclado tipo pistón, para una columna típica de laboratorio; mientras que para columnas que son utilizadas en la industria se considera que son transportados entre las condiciones de flujo pistón y meclado perfecto., así el modelo de flujo pistón con dispersión axial describe adecuadamente el mezclado axial en la zona de colección ^[34,35].

El tipo de mezclado puede ser cuantificado por el número de Peclet ^[36] (Pe). Un número de Peclet con valor de cero representa condiciones de mezclado perfecto; mientras que el número de Peclet con valor infinito representa condiciones de flujo tipo pistón., el número de Peclet esta definido por la siguiente relación:

$$Pe = \frac{1}{N_d} \quad (7)$$

En la zona de colección de altura H_c el número de dispersión del dispositivo N_d para sólidos o líquidos esta dado por:

$$N_d = \frac{E}{uH_c} \quad (8)$$

Donde u es la velocidad intersticial del líquido y E es el coeficiente de dispersión axial; el cual cuantifica el grado de mezclado. (en unidades de longitud ² / tiempo), para condiciones en las cuales el mezclado está representado por flujo pistón tenemos que $E=0$ y $N_d=0$, obteniendo de esta manera un número de $Pe=\infty$.

El coeficiente de dispersión axial queda definido considerando un flujo descendente de agua en una columna de flotación., cuando un trazador es inyectado en la parte superior de la zona de colección, la concentración del trazador en la corriente descendente, desde el punto de inyección a un tiempo y distancia axial dados; es función del mezclado dentro de la columna.

El objeto de medir los parámetros de mezclado es cuantificar el efecto del mezclado en la recuperación, y la recuperación en la zona de colección esta dada por ^[37]:

$$Rc = 1 - \left[\frac{4a \exp\left(\frac{1}{2Nd}\right)}{(1+a)^2 \exp\left(\frac{a}{2Nd}\right) - (1-a)^2 \exp\left(\frac{-a}{2Nd}\right)} \right] \quad (8)$$

donde:

$$a = (1 + 4k_c \tau Nd)^{1/2} \quad (9)$$

2.9.- Características de la dispersión

2.9.1.- Fracción de gas (ϵ_g)

La fracción de gas (ϵ_g), es el contenido volumétrico de gas en la fase gas-líquido, cuya magnitud da una idea de las condiciones hidrodinámicas de la zona de colección ^[7]. La fracción de gas en la zona de colección es una variable importante que puede afectar significativamente el tiempo de residencia y la cinética de colección ^[7]. Es decir el tiempo de residencia se incrementa cuando la fracción de gas aumenta, esto se espera debido a que la velocidad de asentamiento disminuye, aumentando el tiempo que transcurre desde la entrada de la solución a tratar hasta que sale del reactor.

Por otro lado la cinética de colección se ve afectada debido a que las burbujas ascienden a una mayor velocidad cuando se incrementa la fracción de gas, esto es debido a que se favorece el mezclado en la columna de flotación resultando más difícil la formación del agregado burbuja-ion por el incremento en la velocidad del movimiento relativo entre las burbujas y los iones.

Cuando el gas se introduce en un equipo de flotación, el líquido contenido es desplazado; la fracción volumétrica desplazada se conoce como fracción de gas expresado comúnmente como porcentaje en volumen, existen varios métodos para la estimación del gas retenido tales como:

- Gas retenido global
- Gas retenido local (dividido en 2 métodos que son):
 1. La sección dada es definida por la distancia entre las dos tomas de presión.
 2. Es definido por la trayectoria de la señal de los sensores

2.9.2.-Teoria de la estimación de gas por diferencia de presión

Para hacer tratable el procedimiento, se supone que el componente dinámico de la presión es despreciable y que las burbujas están ligeramente cargadas y consecuentemente; la densidad del agregado es despreciable. En la figura 2.8.- la presión atmosférica en PA, PB, PA', PB' está dada por ^[7,17].

$$PA = PA' \Leftrightarrow PB = PB' \quad (10)$$

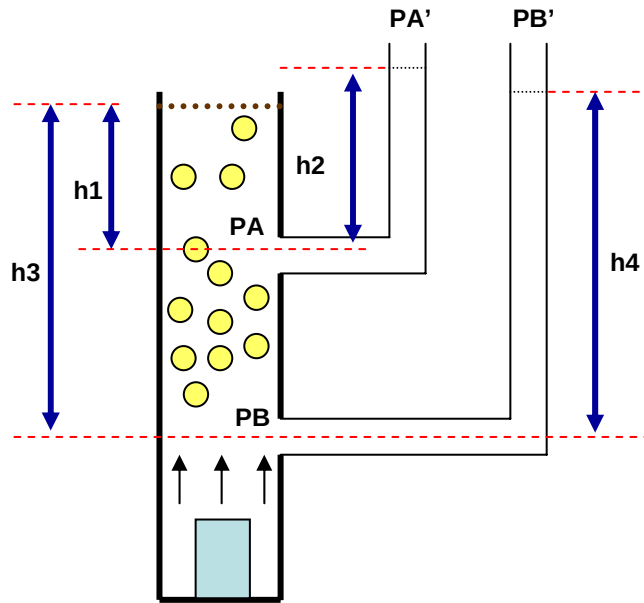


Figura 2.8.- Estimación de gas retenido por el método de diferencia de presión ^[17].

Donde:

$$PA = g\rho_{sl}h1(1 - \varepsilon g) \quad (11)$$

$$PB = g\rho_{sl}h3(1 - \varepsilon g) \quad (12)$$

$$PA' = g\rho_w h2 \quad (13)$$

$$PB' = g\rho_w h4 \quad (14)$$

Lo que resulta en un balance de fuerzas;

$$PB - PA = PB' - PA' \quad (15)$$

Arreglando términos queda:

$$[g\rho_{sl}h3(1-\varepsilon g)] - [g\rho_{sl}h1(1-\varepsilon g)] = (g\rho_w h4) - (g\rho_w h2) \quad (16)$$

Factorizando:

$$g\rho_{sl}(h3-h1)(1-\varepsilon g) = g\rho_w(h4-h2) \quad (17)$$

Acomodando términos:

$$1-\varepsilon g = \frac{g\rho_w(h4-h2)}{g\rho_{sl}(h3-h1)} \quad (18)$$

Eliminando términos semejantes y arreglando nuevamente, el gas retenido queda; considerando que se opera en condiciones de solo líquido, la densidad de pulpa ρ_{sl} (densidad de pulpa) se considera unitaria.

$$\varepsilon g = 1 - \left[\frac{(\rho_w)}{(\rho_{sl})} \frac{(\Delta P)}{(\rho_{sl} \Delta H)} \right] \quad (19)$$

Considerando que se trabaja con agua solamente, la ρ_{sl} (densidad de pulpa) es igual a 1., por lo cual el gas retenido en su forma más sencilla queda como:

$$\varepsilon g = 1 - \left[\frac{\Delta P}{\Delta H} \right] \quad (20)$$

Donde ΔP corresponde a la diferencia de presión (en cm. de columna de agua), dividido por la altura entre las dos tomas de presión ΔH .

Este método de estimación de gas retenido se aplica comunmente en aplicaciones industriales, la importancia de conocer el ϵ_g del sistema radica en el hecho, que es un parámetro de control primario en sistemas de dispersión de gas ^[38]. Se ha establecido que el gas retenido esta en función de un amplio grupo de variables presentes en flotación tales como: químicas, operacionales y mecánicas ^[39].

El gas retenido esta relacionado con el tamaño de burbuja en función del tipo de dispersor de gas, características físicas y concentración de espumante, velocidad superficial de gas y modelo de mezclado en la zona de colección ^[32].

Además, el ϵ_g define la densidad del flujo de burbujas (S_b , cm/s/cm)., por lo cual, el conocimiento del gas retenido es una herramienta importante en el diagnóstico y control de operación de un sistema de dispersión de gas ^[32].

Una fuente común de error de la estimación de gas retenido en sistemas de dispersión en equipos de flotación esta relacionado con el hecho de que el gas retenido estimado es un valor promedio del total del volumen contenido entre las dos tomas de presión; la carencia de una técnica confiable para estimar el gas retenido en línea, fue origen de amplia investigación ^[32].

Actualmente, se ha registrado en la literatura un nuevo método para estimar el gas retenido del sistema; empleando celdas de flujo de conductividad eléctrica, basándose en mediciones de conductividad de la dispersión de gas y del líquido, utilizando la relación de Maxwell para fases no conductoras dispersas en un medio conductor. ^[39,40].

2.9.3.- Diámetro de burbuja (d_b)

El tamaño de burbuja es expresado en términos de su diámetro (d_b), es muy importante en el proceso de flotación por espuma debido a que ellas constituyen el medio de transporte para la concentración de los componentes de valor.

Xu y Finch ^[41]., encontraron que en general el tamaño de burbuja generada a través de un burbujeador interno es función del flujo de aire por unidad de área superficial del burbujeador.

Clingan y McGregor ^[42]., obtuvieron la misma conclusión en pruebas con burbujeadores de cerámica, plástico o de acero; En términos de su importancia en el control de tamaño de burbuja, a un J_g dado, el factor mas importante es la concentración de espumante, por lo menos entre 10 y 30 ppm para casi todos los espumantes.

Estudios fundamentales mostraron que la optimización del tamaño de burbuja en el rango de $0.8 < d_b < 1.5$ mm. Maximiza la razón de área superficial de la burbuja maximizando de esta manera la colección en la columna. ^[43,44]., La razón es que para un cierto tamaño de burbuja se tiene un valor máximo de la velocidad superficial de aire y puede llegar a ser pequeño con altos caudales de líquido descendente ^[7].

La determinación del valor d_b implica un problema práctico debido a la intensa labor relacionada con las técnicas visuales, empleadas normalmente en laboratorio (técnicas fotográficas y análisis de imágenes). Esto se resuelve mediante la estimación directa ^[45,46]. o bien de manera indirecta que es como se realizará en el presente trabajo de investigación mediante análisis de flujo de arrastre o Drift Flux ^[7,47].

El análisis del flujo de arrastre, requiere conocer las variables de operación velocidad superficial de gas (J_g), velocidad superficial de líquido (J_l), y fracción volumétrica de gas en la columna (ε_g); J_g y J_l son variables de operación controladas, J_l está determinado por el flujo de colas de la columna, esto se debe a que la velocidad superficial del líquido es forzada a igualarse con la velocidad de desplazamiento de la corriente de colas, y ε_g es una variable medida usando los valores de presión colectados durante la operación de la columna [7].

La determinación de d_b mediante el análisis del flujo de arrastre se ha comparado en sistemas de dos fases (aire-agua) contra un método fotográfico de análisis de imágenes [48]. Los resultados de estas comparaciones han mostrado que las estimaciones de d_b entre ambos métodos presentan diferencias de $\pm 2\%$ sobre los resultados.

De resultados obtenidos de análisis estadísticos se ha determinado que variaciones de $\pm 10\%$ son aceptables sin afectar el comportamiento del sistema de flotación considerando que los resultados se basan en valores de diámetro promedio para cada una de las estimaciones efectuadas; de lo anterior, se desprende que la estimación de d_b a través del análisis de flujo de arrastre es confiable, por lo que se adoptó para la realización de este trabajo.

Del análisis de arrastre se estima la velocidad terminal de desplazamiento de las burbujas mediante la relación para sistemas de dos fases. La expresión principal es la siguiente:

$$U_t = \left[\frac{(J_g)}{(\varepsilon_g)} \pm \frac{(J_l)}{(1 - \varepsilon_g)} \right] \quad (21)$$

De observaciones experimentales se ha determinado que m es cercano al valor de 3 en todos los casos. Por lo cual el análisis de arrastre puede resolverse iterativamente de este procedimiento ^[43,49].

$$U_{sb} = \left[\frac{Jg}{\varepsilon g (1 - \varepsilon g)^m} \right] - \left[\frac{(Jg - JI)}{(1 - \varepsilon g)^m} \right] \quad (22)$$

$$Re_s = \frac{(d_b)(U_s)(\rho l)(1 - \varepsilon g)}{\mu l} \quad (23)$$

El diámetro de burbuja se aproxima con la relación:

$$d_b = \left[\left(\frac{(18)(\mu l)(U_t)}{(g)(\Delta P)} \right) (1 + 0.15 Re_s)^{0.687} \right]^{0.5} \quad (24)$$

donde $\rho l = 1 \text{ gm/cm}^3$; $\mu l = 0.01 \text{ gr/cm's}$ y $g = 981.6 \text{ cm/s}^2$.

Una vez obtenido el diámetro de burbuja (d_b), este valor es substituido por el valor estimado en el cálculo del número de Reynols (Re_s), y es substituido hasta que se iguala con el estimado despues de esto se calcula el valor de m con la siguiente expresión:

$$m = \left[(4.45 + 18) \left(\frac{d_b}{d_c} \right) (Re_b)^{-0.1} \right] \quad (25) \quad 1 < Re_s < 200$$

Donde

$$Re_b = \left[\frac{(d_b)(U_t)(\rho l)}{\mu l} \right] \quad (26)$$

El valor obtenido de m se sustituye en el cálculo de U_{sb} donde se estimó en un valor de 3. Se procede nuevamente a ajustar el valor de d_b calculado iterativamente con el valor de m , así hasta igualar el valor estimado con el calculado.

2.9.4.-Flujo de área superficial de burbujas (S_b)

La literatura presenta el término de flujo superficial de burbujas o densidad de flujo de burbujas S_b (seg^{-1}), como representante de las características químicas, hidrodinámicas y de máquina debido a que en su estimación se involucran parámetros como d_b que depende de la tensión superficial del seno del líquido en el que se producen las burbujas, la cual depende de la química del sistema y J_g el cual a su vez es función del flujo volumétrico de gas que representa las condiciones hidrodinámicas del sistema y del área transversal de la columna que a su vez representa las condiciones de máquina del equipo de flotación. Se ha mostrado que este término presenta una buena correlación lineal con respecto a la cinética del proceso ^[45,46].

S_b ; se define como la superficie de burbujas que fluye por unidad de tiempo a través del área transversal unitaria; y esta última se puede definir como el área de la sección transversal de la columna de flotación.

Si S es la superficie de burbuja, n el número de burbujas por unidad de tiempo que se mueven a través del área de la sección transversal de la columna, A ; entonces se tiene que:

$$S_b = (n) \left[\frac{S}{A} \right] \quad (27)$$

Donde n es el número de burbujas de superficie S

$$S = (\pi)(d_b)^2 \quad (28)$$

$$n = \left[\frac{6Qg}{\pi(d_b)^3} \right] \quad (29)$$

Donde n es el número de burbujas (la cual se obtiene del volumen contenido en una esfera simulando la burbuja de gas dada por: $V = \pi d^3/6$, S es la superficie de burbuja y A es el área de sección transversal unitaria en dirección normal al flujo de burbujas.

Sustituyendo ambas fórmulas

$$Sb = \left[\left(\frac{6Qg}{\pi(d_b)^3} \right) \left(\frac{\pi(d_b)^2}{A} \right) \right] \quad (30)$$

Reduciendo términos queda:

$$Sb = \left[\frac{6Qg}{(d_b)(A)} \right] \quad (31)$$

Por definición se tiene que $J_g = Qg/A$ por lo que S_b queda como:

$$Sb = \frac{6Jg}{d_b} \quad (32)$$

2.10.- Química de la flotación

En la actualidad; el proceso de flotación se ha constituido en la tecnología más empleada industrialmente para procesos de separación. La flotación es un proceso selectivo y puede ser usado para lograr separaciones específicas, inicialmente desarrollada para tratar minerales la flotación ha expandido su campo de acción el cual incluye tratamiento de aguas y también lo relacionado a la industria farmacéutica y la de alimentos ^[50].

2.10.1.- Colectores

Los colectores son moléculas o iones que se adsorben selectivamente en la superficie de la especie a coleccionar, reduciendo la estabilidad de la capa hidratada que separa a la burbuja de la especie de interés confiriéndole la característica de hidrofobicidad.

La mayoría de los colectores son ácidos débiles, bases o sus sales; los colectores son casi todos heteropolares es decir que tienen dos extremos funcionales, conteniendo la misma molécula el grupo hidrocarburo no polar, y un grupo polar ^[50]. Figura 2.9.,

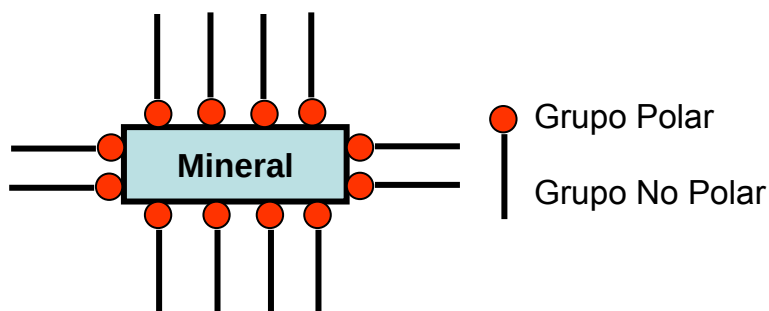


Figura 2.9.- Adsorción del colector sobre la superficie de una partícula.

El grupo polar es adsorbido en la superficie ya sea por reacción química con los iones de la superficie (quimiadsorción), o por atracción electroestática (adsorción física), mientras que el grupo orgánico no polar proporciona el carácter hidrofóbico. Por último, los colectores catiónicos tienen un grupo polar con carga positiva, mientras que los colectores aniónicos por su parte, tienen un grupo polar con carga negativa ^[51].

Se dispone de una gran variedad de colectores, los cuales se clasifican en base a su composición y a como existen en solución es decir si están presentes como cationes, aniones o especies moleculares en solución ^[51].

La flotación moderna inicio en 1923 cuando C. H. Keller descubrio el uso de xantatos como colectores ^[30]. El nombre de xantato proviene del griego "xantos" que significa amarillo y se refiere más al color de la sal, que a las sales de metal alcali, Zeise en 1822 los descubrió pero no fue sino hasta 1900 que los xantatos encontraron aplicación en la industria del plástico, caucho y goma usando el xantato en el curado y vulcanización de estos, más tarde se utilizarón en la manufactura de textiles sintéticos y como fungicidas.

En 1923 Cornelius Keller descubrió que debian tener una aplicación más amplia, en 1925 se empezó a usar los xantatos como colectores de flotación ^[30]. La acción del colector en flotación ha sido ampliamente estudiada, más que cualquier otra fase del proceso de flotación; actualmente permanecen pocas dudas sin embargo, el mecanismo de unión del colector en la especie es aún sujeto a debate y controversia ^[30].

Se ha puesto en discusión las fuerzas de atracción entre la porción polar del colector y la superficie de la especie de interés; las teorías propuestas incluyen la teoría de la solubilidad o química, y varias teorías de adsorción involucrando el enlace del colector como un ion, una molécula, una monocapa y/o multicapa.

La teoría química o de solubilidad postula la formación de un compuesto organometálico sobre la superficie., se ha reconocido que cuando los sulfuros de plomo y cobre son separados de sulfuros de zinc por flotación con xantatos, se forman sobre la superficie del cobre y plomo xantatos de metal muy insolubles.

La teoría de la solubilidad no es útil para todos los minerales ^[30]. La figura 2.10., muestra la teoría de enlace del xantato.

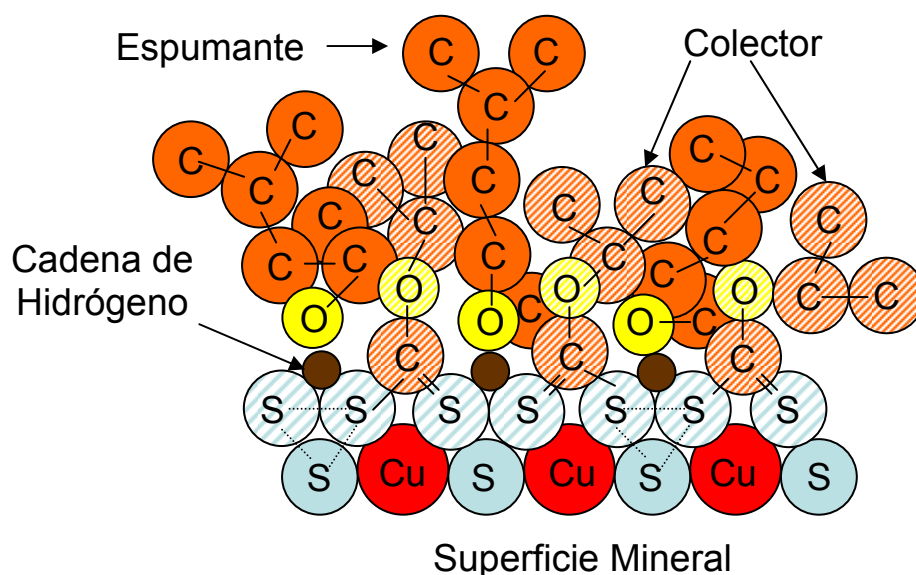
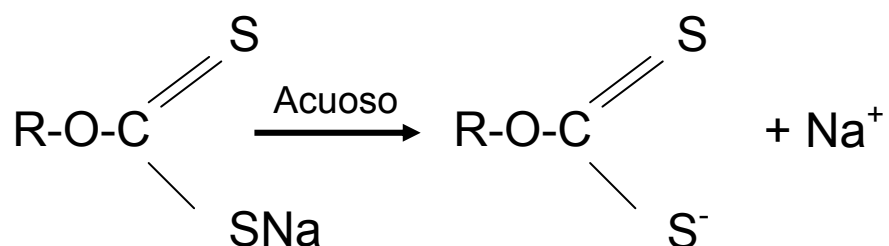


Figura 2.10.- Enlace teórico entre la especie mineral y la molécula de xantato ^[30].

Los xantatos son derivados del ácido carbónico; en el cual dos grupos de oxígeno son remplazados por azufre y un hidrógeno por un grupo alquil., el nombre del xantato depende del alcohol y el metal de hidroxido alcalino empleados, por ejemplo en el xantato amílico de potasio, se utilizan alcohol amílico e hidroxido de potasio además de bisulfuro de carbono ^[52].

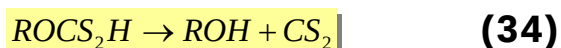
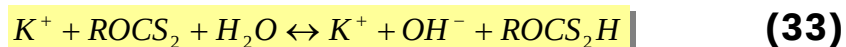
Los xantatos son compuestos heteropolares que contienen un grupo funcional inorgánico (iónico), unido a una cadena de hidrocarburo (no iónico). En medio acuoso el xantato se disocia en iones xantato e iones de metal alcalino que lo forma conforme a la siguiente reacción:



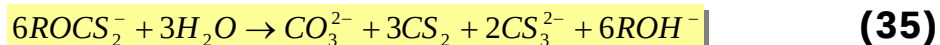
En la descomposición del ion xantato hay seis reacciones, en soluciones acuosas que están relacionadas con la flotación de minerales:

- Hidrólisis del ion xantato
- Descomposición del ácido xantico
- Descomposición hidrolítica
- Oxidación a dixantogeno
- Oxidación a monotiocarbonato
- Oxidación a perxantato

Las reacciones de hidrólisis y descomposición del ácido xántico son las principales reacciones de descomposición en soluciones ácidas; estudios realizados han mostrado que aproximadamente el 50% de la reacción de descomposición ocurre en una hora a pH cercano de 4.3 ^[52].

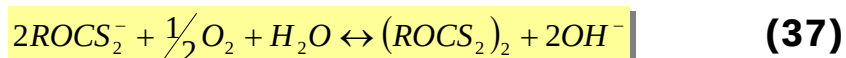
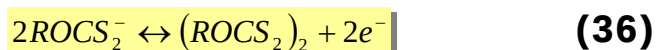


En soluciones altamente alcalinas pH>13, la reacción de descomposición resulta de los productos finales: ion carbonato, bisulfuro de carbono, tritio carbonato y alcohol., donde el tritio carbonato CS_3^{2-} , puede descomponerse a CS_2 y S^{2-} .



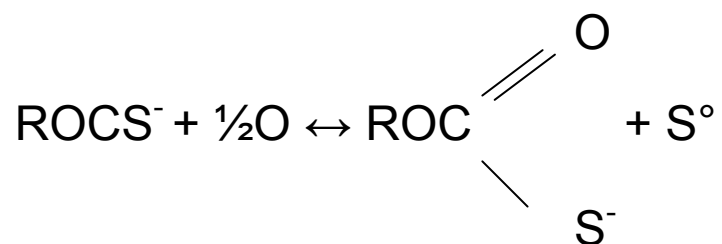
La oxidación a dixantogeno, es de las reacciones más importantes dentro del procesamiento de minerales, ocurren en el rango de pH entre 6-12.

Se ha demostrado que algún tipo de oxidación (causado por un agente oxidante del agua natural, u oxígeno del aire inyectado) es esencial antes que los xantatos puedan actuar como colectores, sea la oxidación del ion xantato a dixantogeno representada por la reacción 36., o la oxidación del sulfuro, reacción 37; la que provee los productos hidrofóbicos metal-xantato. La oxidación a dixantogeno es fácilmente observada en soluciones concentradas de xantato, donde el dixantogeno insoluble se separa de la solución como una emulsión.

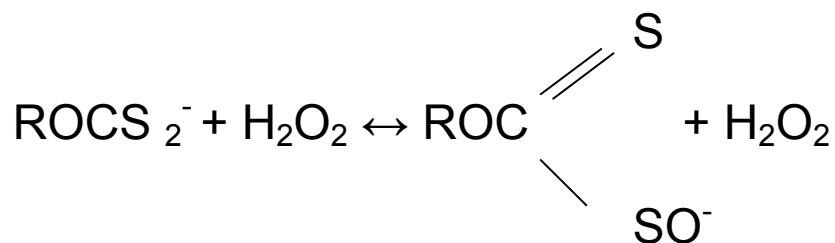


La oxidación del ion xantato se lleva a cabo por efecto de un gran número de agentes oxidantes en solución acuosa: yodo, cloro, hipoclorito de sodio y ácido nítrico.

Durante la descomposición del ion xantato a monotiocarbonato, se ha encontrado que la reacción requiere la participación de superficies de sulfuro, si se adsorben oxígeno y iones xantato sobre la superficie, es posible la formación del monotiocarbonato.



La reacción de oxidación del ion xantato a perxantato, se lleva a cabo bajo ciertas condiciones específicas de alcalinidad y niveles de oxidación como los que provee el peróxido de hidrógeno (H_2O_2).



Dentro del proceso de flotación iónica; la atracción del ion xantato con los iones de metales presentes en fase acuosa se da por atracciones electroestáticas o quimiadsorción.

2.10.2.-Micelización

La micelización es una característica de los colectores con cadena hidrocarburada, la cual asume un papel importante en los sistemas de flotación. Las micelas son agregados de iones de colector de tamaño coloidal que se forman por enlaces de van der Waals entre las cadenas hidrocarburadas de los colectores ^[51].

Las micelas se forman debido a que las cadenas hidrocarburadas no son naturalmente iónicas, generándose una mutua incompatibilidad entre las moléculas polares del agua y las cadenas hidrocarburadas no polares del colector.

Cuando se alcanza una cierta concentración de iones de colector en la solución, llamada concentración crítica de micelas (CCM), las cadenas hidrocarburadas del colector se asocian en agregados o micelas con la subsecuente pérdida de iones colectores en la solución. Figura 2.11.,

Estos agregados no son perceptibles por el ojo humano, pero su presencia puede notarse por su habilidad para dispersar la luz producida por un rayo que pasa a través de la solución ^[51].

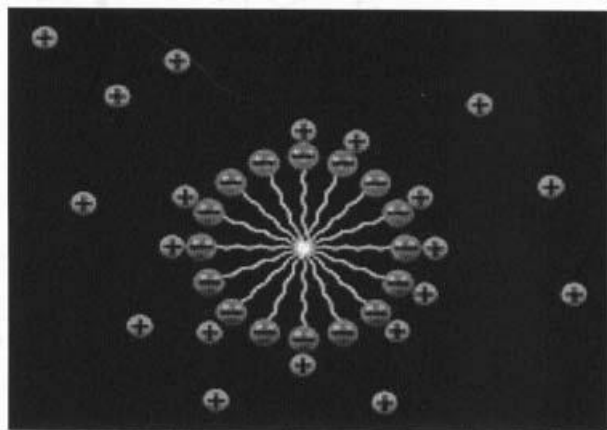


Figura 2.11.- Representación esquemática de una micela.

2.10.3.- Espumantes.

Cuando las superficies minerales se vuelven hidrofóbicas por el uso de un colector, las partículas se adhieren a las burbujas formando un agregado burbuja-partícula. Para que este agregado sea transportado hasta la zona de limpieza, la burbuja debe ser lo suficientemente fuerte o estable para no desintegrarse y evitar el retorno de los sólidos hacia la zona de colección. Este carácter de estabilidad a la burbuja es proporcionado por los espumantes.

Los espumantes son reactivos orgánicos solubles en agua que se adsorben en la interfase aire agua. Al igual que los colectores (aunque los espumantes no cambian significativamente el carácter hidrofóbico de las superficies), son moléculas heteropolas con un grupo polar que da solubilidad en agua reduciendo su tensión superficial (γ)^[50], y un grupo hidrocarbonado no-polar. La reducción en la tensión superficial del líquido trae como consecuencia la formación de burbujas más pequeñas aumentando con esto el área superficial de burbujas y por ende, la capacidad de concentración de las máquinas de flotación; en la figura 2.11.- El extremo no-polar de los reactivos espumantes se orienta hacia el interior de la burbuja, mientras que el extremo polar se orienta hacia la fase líquida.

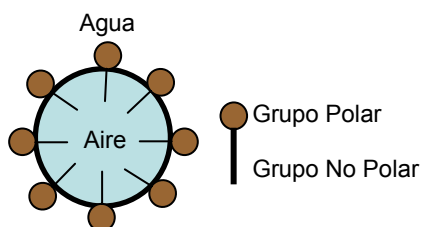


Figura 2.12.- Orientación de los grupos polar y no polar de los espumantes en la interfase aire-agua^[50].

La serie de experimentos desarrollados en el laboratorio se dividieron en tres etapas: caracterización de los medios porosos, establecimiento de los parámetros de operación de la columna para la flotación iónica (incluyendo los datos cinéticos como tiempo de residencia del líquido en la zona de colección, velocidad de flotación y régimen de mezclado) y la flotación de iones de cobre en solución. Lo anterior se llevó a cabo de acuerdo al siguiente desarrollo experimental.

3.1.- Construcción de una columna de flotación de laboratorio

La columna de flotación empleada en la ejecución del programa experimental, Figura 3.1, consta de secciones bridadas de tubo de material acrílico transparente de 9.41 cm. de diámetro interior y una altura de 407 cm. El extremo superior de la última sección, está abierta a la atmósfera para permitir la descarga del producto obtenido por el proceso de flotación; el cual es colectado en un vertedero de acrílico de 15 cm de diámetro interior con fondo inclinado y este a su vez se descarga a través de dos conexiones de 1.27 cm. de diámetro.

La entrada de la alimentación a la columna es mediante una conexión de 1.27, colocada a una distancia de 113.5 cm. del labio de rebose. El extremo inferior de la primera sección queda cerrado mediante una base de material de nylamid al cual se le adapta la conexión para el burbujeador y la salida de la corriente de colas a través de una conexión de 1.27 cm. de diámetro interior; el burbujeador es un tubo poroso de material acrílico de 2.54 cm. de diámetro exterior por 10 cm. de longitud con un área superficial de 80 cm^2 ; para el desarrollo de este programa experimental se fabricaron 5 burbujeadores con las características antes mencionadas y la variante entre ellos fue el número de capas de recubrimiento de tela de lona la cual se modifico en 2, 4, 6, 8 y 10 capas.

El flujo volumétrico de aire alimentado al burbujeador es controlado mediante un rotámetro con capacidad de 0-16 lts./min. (LPM) marca Gilmont, modelo GE717, calibrado a una atmósfera de presión.

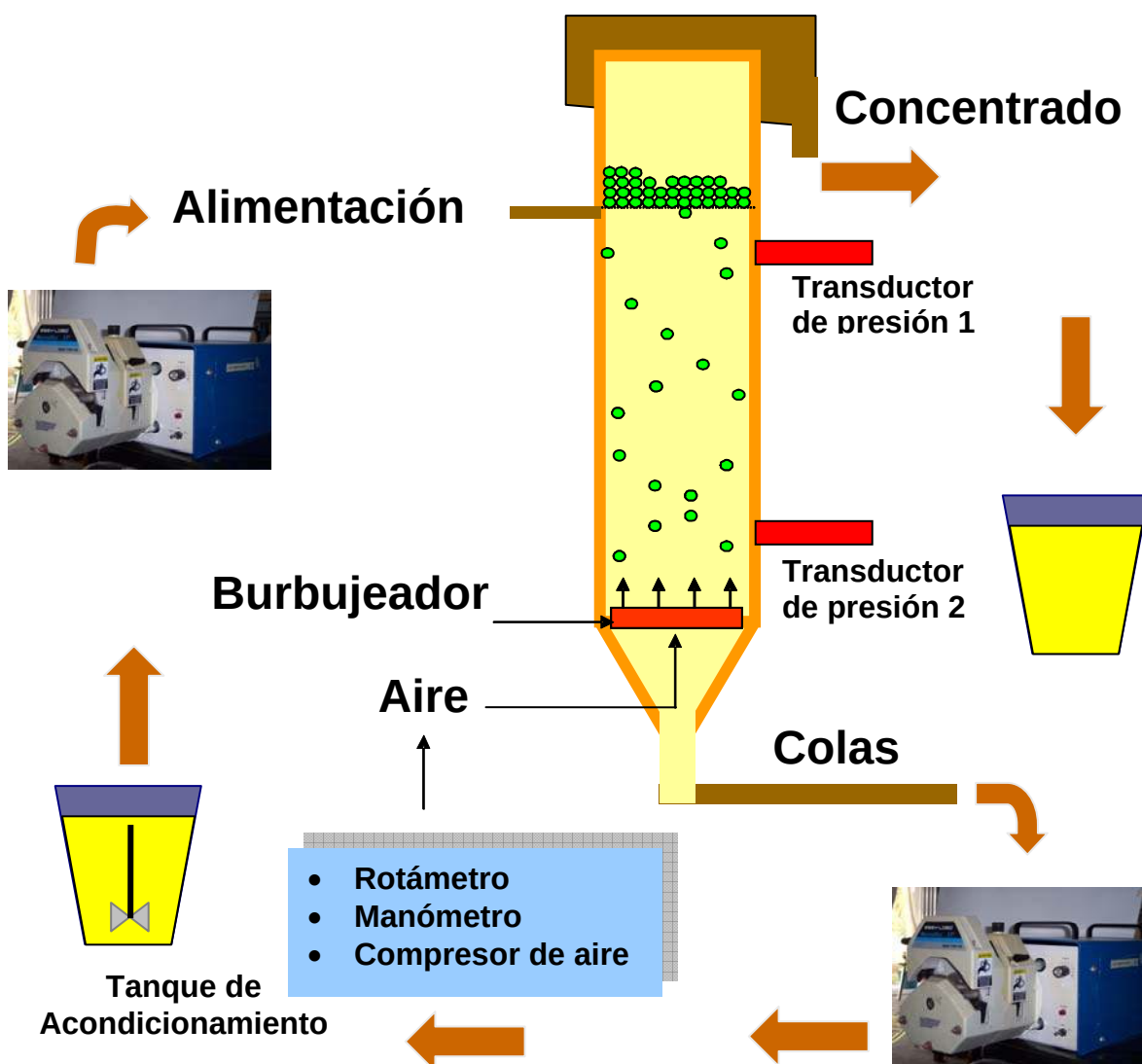


Figura 3.1.- Representación esquemática de la columna de flotación empleada para la flotación de iones en solución.

La alimentación a la columna se realiza desde un tanque de acondicionamiento de 75 litros. Para evitar la formación de gradientes de concentración de la solución problema se emplea un agitador de velocidad variable con motor Siemens de 1 HP., de 0-1720 r.p.m., equipado con un controlador de velocidad variable marca Telemecanique – Square D.

Los caudales en las corrientes de alimentación y colas se controlan mediante el uso de bombas peristálticas de velocidad variable marca Masterflex.

La presión hidrostática en tres puntos a lo largo de la columna se midió mediante el uso de transductores de presión marca Cole Parmer. La señal es recibida y mostrada en las respectivas pantallas digitales y procesadora de datos marca Cole Parmer modelo 94787.



Figura 3.2.- Pantalla digital Cole Parmer para lectura de caída de presión hidrostática en la columna

Durante todo el proceso experimental las variables monitoreadas fueron: flujo volumétrico de líquido en las corrientes de alimentación y colas ($Q_l = l/min$) y las caídas de presión en dos puntos de la columna ($\Delta p = cmH_2O$).

3.2.- Determinación de las variables de operación

Las características de la dispersión (db , ϵ_g y S_b) dependen de las características del burbujeador, de la tensión superficial del líquido y de la cantidad de aire inyectado al medio poroso.

3.2.1.- Selección del burbujeador cilíndrico recubierto con tela de lona

Se diseñaron una serie de experimentos para seleccionar la permeabilidad del burbujeador, de una serie de burbujeadores cilíndricos recubiertos con tela de lona, que representara una mayor área superficial de burbujas para transporte de masa fuera de la columna como concentrado, una mayor fracción volumétrica de gas y menores diámetros promedio de burbuja.

La permeabilidad de cinco burbujeadores se varió al forrar cada uno de ellos con diferentes capas de tela (dos, cuatro, seis, ocho y diez capas, respectivamente). En la Figura 3.3 se presenta la textura de la tela filtro por medio de una imagen obtenida utilizando la técnica analítica de microscopía electrónica de barrido.

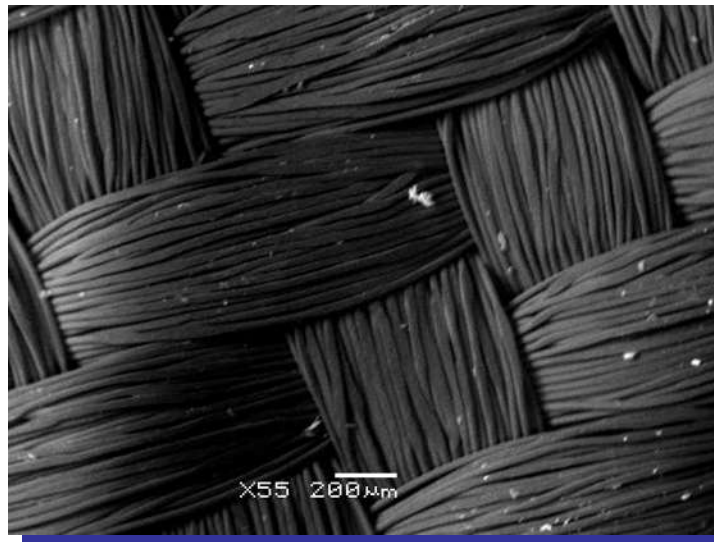


Figura 3.3.- Textura de la tela filtro utilizada para recubrir los burbujeadores utilizados en este trabajo.

Los ensayos para cada uno de los cinco burbujeadores se realizaron a diferentes valores de tensión superficial (72.4, 66.3, 55.3, 44.2 dinas/cm), sin adición y al adicionar 20, 40 y 60 ppm en volumen respectivamente, de aceite de pino como surfactante. El rango de aire suministrado a la columna fue de 2 a 12 lpm (0.5 a 2.5 cm/s), a intervalos de 1 lpm.

Para determinar la relación entre la permeabilidad del burbujeador y las características de la dispersión se llevaron a cabo experimentos que consistieron en alimentar la columna con agua acondicionada con la correspondiente adición de aceite de pino e inyectar aire comprimido a la misma a través del burbujeador. El nivel de la interfase se mantuvo constante a diez centímetros del tope mediante la manipulación del flujo de alimentación. El flujo en la corriente de colas se mantuvo constante. Las variables monitoreadas fueron la caída de presión (cm H₂O) en dos puntos de la columna separados 150 cm entre ellos y el flujo volumétrico de aire inyectado (l/min).

3.2.2.- Establecimiento de la tensión superficial del líquido.

De la serie de experimentos realizados para seleccionar el burbujeador a utilizar para las pruebas de remoción de iones de cobre de una solución acuosa, se estableció también la adición de surfactante que resultara en derivar el menor diámetro de burbuja, mayor fracción volumétrica de gas y la mayor área superficial de burbujas.

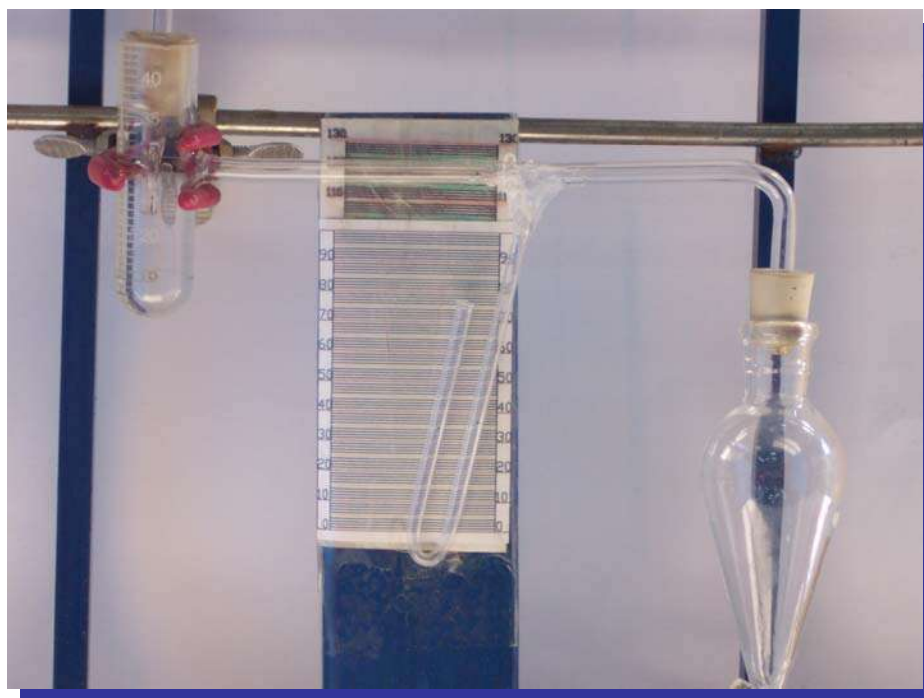


Figura 3.4.- Instrumento para medir la tensión superficial de líquido de acuerdo al principio de formación de gota

Al agua corriente se le adicionó aceite de pino en proporciones de 20, 40 y 60 ppm, y se llevó a cabo experimentación para el caso de agua sin espumante. La tensión superficial del líquido se determinó por medio de un instrumento de laboratorio el cual funciona bajo el principio de formación de la gota por caída de presión ^[53], dicho instrumento se ilustra en la Figura 3.4.

El principio de formación de gota por caída de presión para medir la tensión superficial de un líquido consiste en depositar el líquido motivo de la determinación, en el tubo de la parte izquierda del instrumento. En el extremo opuesto se localiza un segmento de pipeta con una llave dosificadora que permite la salida del líquido y la formación de la gota. La formación de esta gota depende de una cierta caída de presión que es registrada en la columna de líquido (normalmente hexano), y que se relaciona con la tensión superficial de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{Rg}{2} (\rho_m h_m - \rho h) \quad (38)$$

En donde

- Radio del capilar (R)
- Densidad del agua (ρ)
- Profundidad del extremo del capilar (h)
- Densidad del líquido manométrico (ρ_m)
- Diferencia de alturas en el manómetro (h_m)
- Aceleración de la gravedad (g)

La anterior ecuación supone una relación lineal entre la caída de presión y la tensión superficial del líquido. Los resultados estimados de tensión superficial para cada valor de caída de presión debido a las diferentes adiciones de espumante son:

Tabla 3.1.- Estimaciones de tensión superficial del líquido para diferentes adiciones de aceite de pino a agua corriente

Adiciones (mg/lit)	Tensión Superficial (γ) (dinas/cm)
0	72.44
20	66.38
40	55.32
60	44.25

Las relaciones entre el flujo superficial de aire y las características de la dispersión generada se discuten en el siguiente capítulo. Eventualmente se duplicaron algunos experimentos para evaluar la reproducibilidad de los resultados.

3.2.3.- Determinación del patrón de flujo de mezclado.

El tiempo de residencia se establece de las curvas de distribución de tiempo de residencia (DTR), pero también puede ser estimada con la ayuda de datos experimentales; la forma de las curvas obtenidas es el mejor indicativo del modelo de flujo en la columna de flotación.

La forma más común utilizada para determinación de la curva DTR es introduciendo un trazador y detectar la cantidad de este trazador en la descarga de colas en función del tiempo.

La flotación es un proceso de tipo dinámico y la eficiencia es relacionada directamente al tiempo que le lleva al material pasar por la columna de flotación desde su introducción hasta su salida.

La clase de estimación de la distribución del tiempo de residencia DTR, en una columna de flotación; reside en el hecho de que es un parámetro imprescindible para definir el proyecto de un nuevo dispositivo de flotación. El procedimiento experimental se llevo a cabo operando la columna de flotación en régimen continuo, usando una solución con una tensión superficial de 44.25 dinas/cm² (60 mg/l de espumante).

En un tiempo inicial cero se inyectó en la corriente de alimentación un volumen de 0.5 litros de una solución saturada de cloruro de potasio KCl, la relación molar manejada fue de 0.56 mol/lit. El registro de la variación de la conductancia se realizó por medio de una celda de flujo de conductividad instalada en la corriente de colas de la columna de flotación., determinando como el tiempo final cuando la conductividad se instalo en un valor sin variación; los registros de los valores obtenidos fueron valuados cada segundo utilizando el sistema lógico de adquisición de datos.

3.2.4.- Determinación de la relación molar Xantato Amílico de Cobre:Sal de Cobre.

Una vez establecidas las condiciones de operación de la columna se procedió a realizar las pruebas de agotamiento experimentales para determinar la factibilidad de flotar o separar iones de metales pesados de cobre en una solución acuosa, empleando la columna de flotación de laboratorio.

Debido a la naturaleza eléctrica de los iones de cobre en solución, se determinó utilizar un colector aniónico del tipo de los xantatos, por ser un reactivo comercial, económico y de uso común en la industria del procesamiento de minerales para la flotación de especies sulfuradas de cobre.

Se utilizó como colector xantato amílico de potasio ($C_5H_{11}OCS_2K$) en relaciones molares de 1:1, 1:0.5 y 1:1.3 de Colector – Metal. La Tabla 3.2 muestra la composición y propiedades físicas de este colector.

Tabla 3.2.- Propiedades físicas y químicas de xantato amílico de potasio (Alkemin S.A. de S.R.L. Morelia, Michoacán, México)

Composición	
Pureza Base Seca (HirschKind)	92%
Humedad (Kart Fisher)	7%
Propiedades Físicas	
Formula	$C_5H_{11}OCS_2K$
Solubilidad	43 g/100 ml. de H_2O
Gravedad Específica	0.825 gr./cm ³

Para establecer la concentración de colector adecuada para recuperar la especie iónica Cu^{2+} se llevaron a cabo experiencias; en cada una de las cuales la concentración molar de xantato amílico de potasio se fue modificando en proporciones previamente establecidas hasta lograr una máxima recuperación sin cambio con el aumento adicional del colector.

3.3.- Construcción de la celda de flujo de conductividad

Para determinar el tiempo de residencia de la fase continua en la zona de colección de la columna de flotación, se llevaron a cabo experimentos utilizando cloruro de sodio como trazador y las variaciones en concentración a la salida (corriente de colas) se monitorearon mediante el uso de celdas de conductividad.

Se fabricó una celda de flujo de conductividad eléctrica, de acrílico transparente de 2.54 cm. de diámetro, con tres anillos de grafito de 1.0 cm. de ancho; con una separación entre si de 2.5 cm. Los electrodos fueron aislados por la sección exterior del tubo para evitar el contacto con la solución acuosa, y por ende., salidas de corriente de la celda de flujo de conductividad. La figura 3.5 muestra un diagrama de la celda de flujo de conductividad eléctrica.

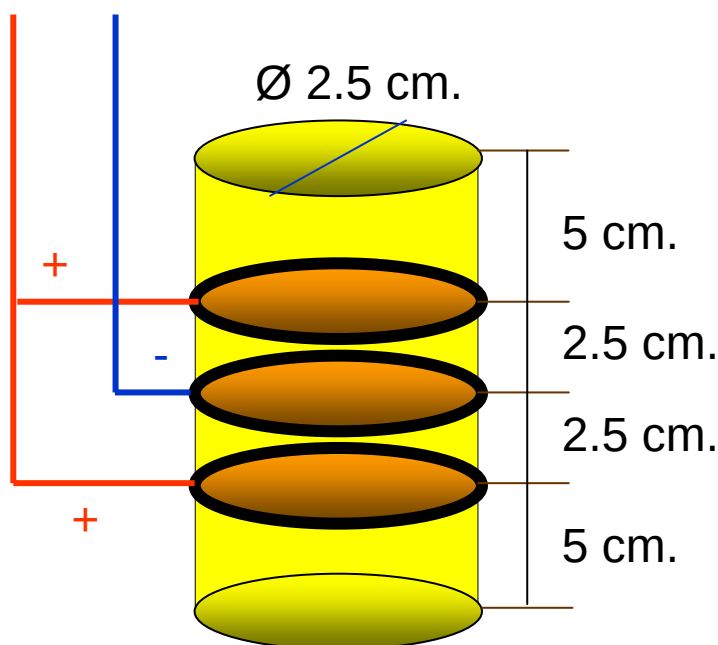


Figura 3.5.- Representación esquemática de la celda de conductividad eléctrica utilizada para medir el tiempo de residencia de la fase continua

Los electrodos de los extremos son de polaridad opuesta al que se localiza en medio; con el propósito de impedir la transferencia de energía eléctrica a los alrededores y conducirla por el interior de la celda. Se optó por el uso de anillos de grafito con la intención de evitar la interacción entre estos y las soluciones acuosas con metales pesados a tratar, si se utilizarán anillos de acero inoxidable es muy posible que se presente el proceso de cementación por intercambio de electrones entre el hierro y los iones de cobre lo cual afecta directamente en la obtención de resultados verídicos. La celda de flujo de conductividad se conectó a un conductivímetro marca Tacussel Electronic modelo CDRV62E el cual se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6.- Fotografía del conductivímetro Tacussel Electronic CDRV62E

La señal se transmitió a través de una interfase conectada a un sistema de adquisición de datos expuesta en la figura 3.7 y es una tarjeta Solartron Instruments 35951 I.M.P. la cual a su vez es dependiente de un computador.



Figura 3.7.- Tarjeta convertidora de señal y de adquisición de datos Solartron Instruments 35951 I.M.P.

3.4.- Flotación iónica.

En estas pruebas se ensayó la consecuencia de la concentración de colector amil xantato de potasio en la recuperación del ion metálico Cu^{2+} , para este caso de la experimentación se emplearon relaciones molares de colector : metal de 1:1, 1:1.3 y 1:0.5 Para la elaboración de estos experimentos se recirculo la solución durante toda la prueba y se conservó constante el valor de la velocidad superficial de gas (J_g), así como también el valor de la velocidad superficial de líquido (J_l), de la corriente de colas; las corrientes de alimentación y colas coincidían en un mismo tanque para ser alimentadas nuevamente a la columna de flotación y simular un sistema multietapas de flotación.

Se procedió a la recolección de muestras de las tres corrientes del sistema (concentrado, colas y alimentación), observando siempre este orden a la hora de tomar las muestras con el objeto de evitar lo mas posible los disturbios en el sistema, lo que es originado por la colección de muestras de la corriente de alimentación ya que esta se colecta interrumpiendo el flujo de liquido a la columna de flotación. Las muestras colectadas fueron tomadas por réplica procediendo a realizar un promedio de las dos mediciones, así mismo se inspeccionó el tiempo de muestreo recolectando a su vez el peso de la muestra para finalmente llevar a cabo un balance de masa de dichas muestras; la solución fue muestreada por un tiempo de 180 min. bajo estas condiciones fueron analizadas las tres corrientes (concentrado, colas y alimentación).

Las muestras reunidas fueron examinadas con la ayuda de un equipo de análisis instrumental de absorción atómica Perkin Elmer modelo 3100, figura 3.10, la calibración del espectrofotómetro se realizó por medio de la elaboración de estándares químicos en concentraciones de 1, 5, 10 y 15 mg./lt. de cobre.



Figura 3.8.- Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3100

4.1.- Caracterización de los burbujeadores de lona.

El sistema de generación de burbujas es una de las características que distingue a las columnas de flotación de las celdas mecánicas. La selección del burbujeador que genere la dispersión de gas con ciertas características (diámetro de burbuja, fracción volumétrica de gas y área superficial de burbujas) para una determinada aplicación es de vital importancia.

Como se mencionó anteriormente, el burbujeador debe de ser capaz de generar una dispersión con características tales que le permitan la eficiente remoción de iones de cobre en solución.

En este capítulo se presentan y discuten los resultados de caracterización de una serie de burbujeadores cilíndricos flexibles fabricados con tela de lona, de diferente permeabilidad. En una segunda parte se muestran y discuten los resultados de flotación de iones de cobre en solución una vez seleccionadas las mejores condiciones operativas de la columna. Los datos experimentales se muestran en el Anexo 4.1

4.1.1.- Sistema aire-agua sin espumante.

La Figura 4.1 muestra el aumento en la fracción volumétrica de gas con el flujo superficial de aire; para la serie de cinco burbujeadores, en un sistema sin espumante donde el líquido tiene una tensión superficial (γ) de 72.4 dinas/cm.

Para estas condiciones en particular, se observa que el número de capas de tela de lona o permeabilidad del burbujeador no tiene efecto en la fracción volumétrica de gas al producir aparentemente el mismo diámetro de burbuja para un determinado valor de velocidad superficial de gas (J_g) y se deduce que la máxima fracción de gas que se alcanza con estos burbujeadores para un J_g de 3.0 cm/seg es poco menos del 20 por ciento.

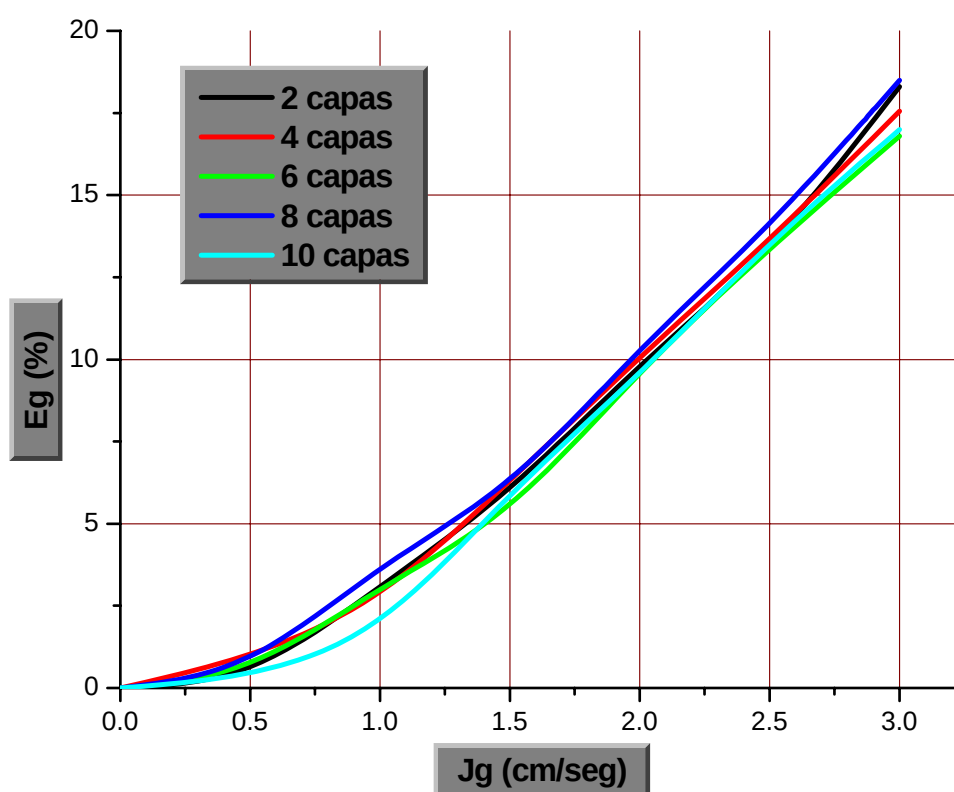


Figura 4.1.- Fracción de gas Vs. Velocidad superficial de gas para el sistema aire-agua sin espumante.

El cálculo de los diámetros promedio de burbuja para cada punto experimental y cada burbujeador es mostrado en la Figura 4.2.

A excepción del burbujeador con diez capas de tela de lona, el diámetro promedio es similar para todos los burbujeadores, siendo el rango de tamaños entre 0.25 y 0.35 cm para flujos de aire mayores a 1.0 cm/seg.

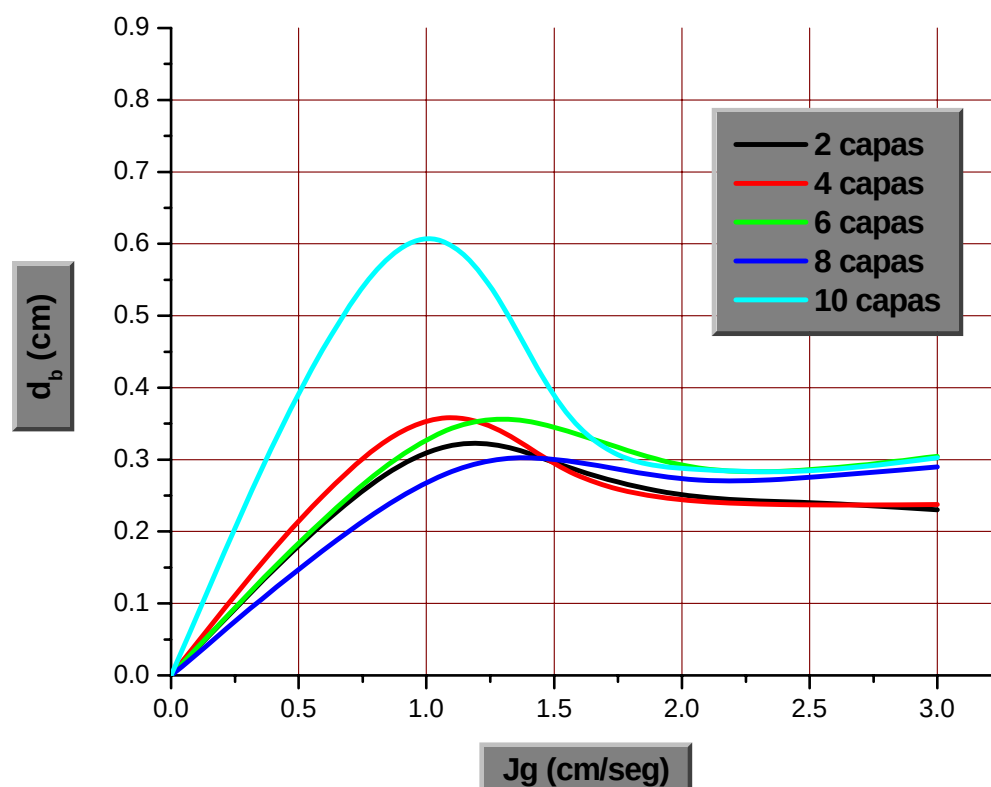


Figura 4.2.- Diámetro promedio de burbuja Vs. Velocidad superficial de gas para los datos de la Figura 4.1.

4.1.2.- Sistema aire-agua con espumante

En esta serie de experimentos para cada burbujeador de lona, se hizo variar la tensión superficial del líquido en valores de 66.3, 55.3 y 44.2 dinas/cm. al adicionar 20, 40 y 60 ppm respectivamente de aceite de pino como surfactante.

Con el objeto de elegir tanto el burbujeador como el valor de tensión superficial que contribuyeran a formar el menor diámetro de burbuja promedio.

La Figura 4.3 muestra el aumento de la fracción de gas con el flujo superficial de aire. En el caso de la adición de 20 ppm de espumante y para toda la serie de burbujeadores.

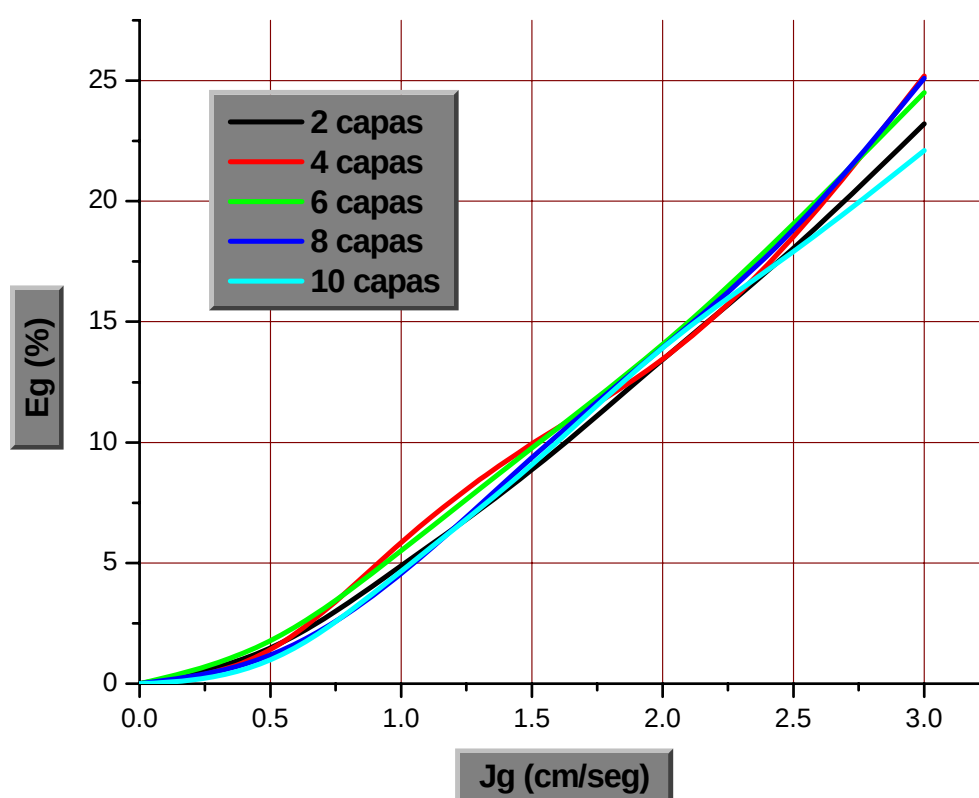


Figura 4.3.- Fracción volumétrica de gas contra la velocidad superficial de gas para el caso de 20 ppm de espumante ($\gamma = 66.3$ dinas/cm).

Como se puede apreciar de esta figura, para esta tensión superficial el número de capas de tela de filtro o permeabilidad no tiene efecto en la fracción de gas, debido a que los poros más abiertos o los caminos con menos tortuosidad son los orificios “activos” durante la formación de burbujas.

Al igual que en el caso del líquido sin espumante, el diámetro promedio de burbuja se mantiene similar para la serie de burbujeadores y sobre todo después de flujos superficiales de aire mayores a 1.7 cm./s como lo muestra la Figura 4.4. De esta misma figura se puede deducir el inicio de una incipiente coalescencia de burbujas producida por el incremento en el diámetro promedio de burbuja a partir de un J_g de 2.0 cm./s.

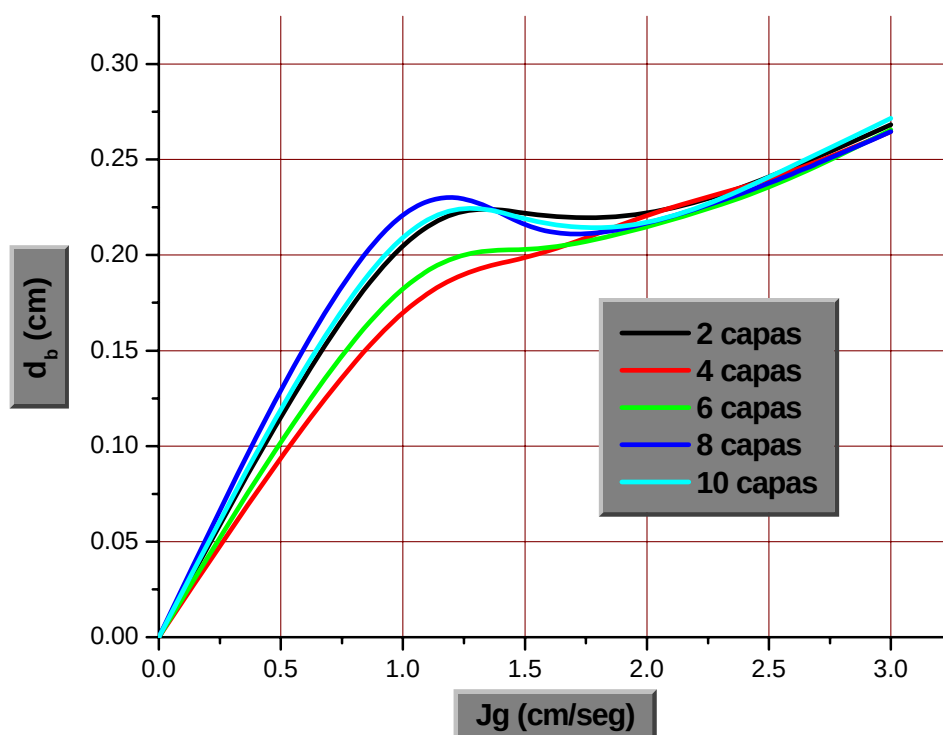


Figura 4.4.- Diámetro promedio de burbuja Vs. Velocidad superficial de gas.

Como es de esperarse, el fenómeno de coalescencia disminuye levemente el área superficial de burbujas al incrementarse el diámetro de burbuja, tal y como se observa en el leve cambio de pendiente a flujo de aire de 2.25 cm./s en la figura 4.5. Esta disminución en el área superficial de burbujas significa una menor área de burbujas disponible para transporte de masa.

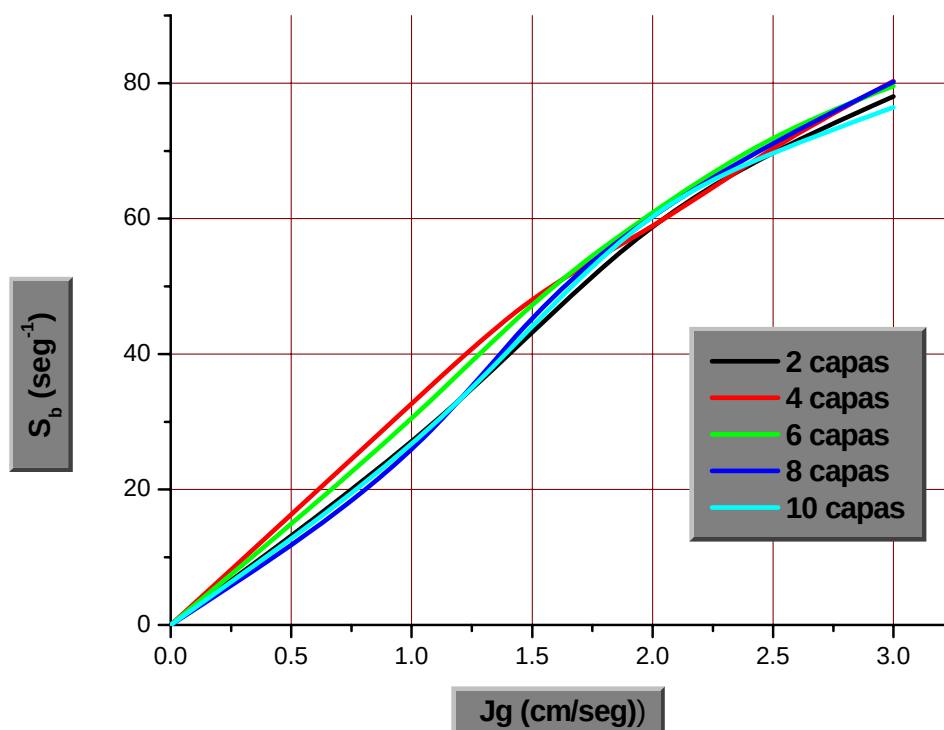


Figura 4.5.- Cambio en el flujo del área superficial de burbujas con la velocidad superficial de gas, para el caso de la adición de 20 ppm de aceite de pino.

Cambios en la tensión superficial del líquido al adicionar 40 ppm de espumante y disminuir la tensión superficial a 55.3 dinas/cm., tienen un efecto despreciable en la fracción de gas independientemente de la permeabilidad del medio poroso y se puede establecer que las burbujas continúan formándose primero en los poros de mayor diámetro ó por los caminos con menos tortuosidad. Lo anterior se muestra en la Figura 4.6.

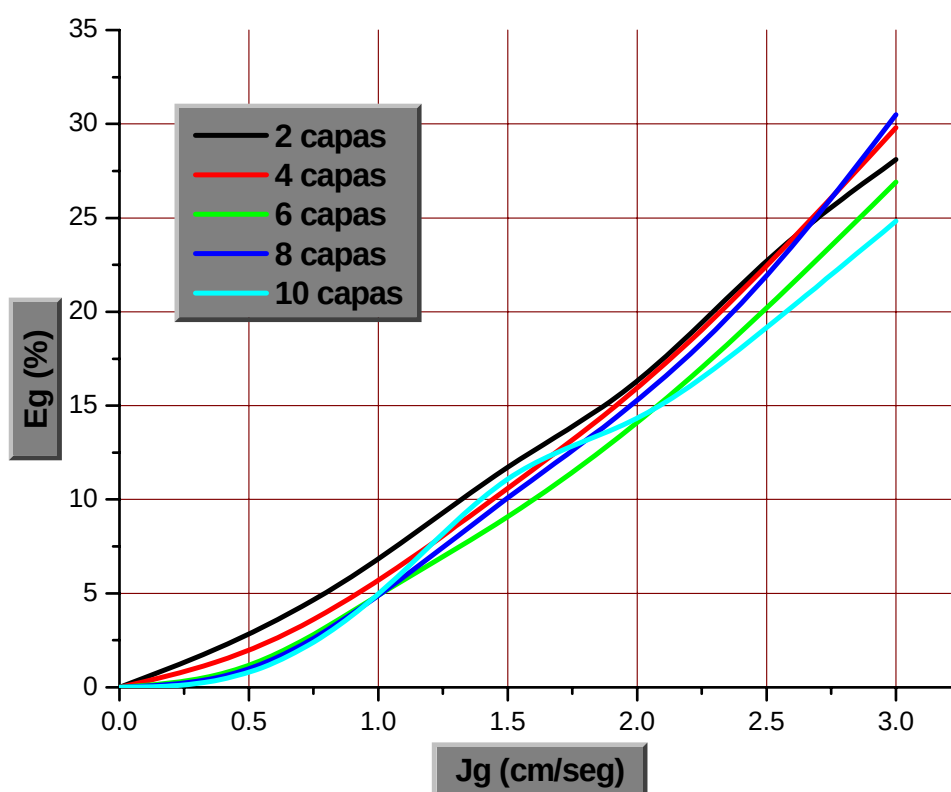


Figura 4.6.- Relaciones de fracciones volumétricas de gas y velocidades superficiales de aire para el caso de 40 ppm de espumante (55.3 dinas/cm.).

Lo anterior es respaldado por los resultados mostrados en la Figura 4.7 en donde la serie de dispersores generan burbujas con diámetros promedio similares. Tal comportamiento es más notable para flujos de aire superiores a 1.7 cm./s.

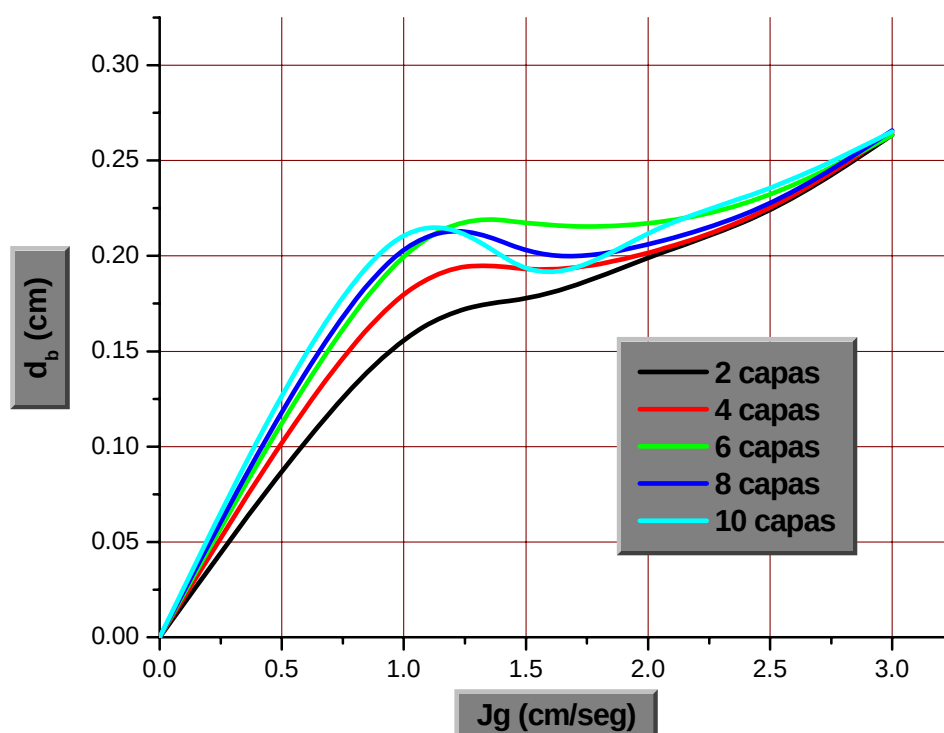


Figura 4.7.- Relaciones de diámetro de burbuja y velocidad superficial de gas para los datos de la figura 4.6.

A valores de flujo de aire mayores a 2.0 cm./s, se observa un notable incremento en el diámetro de burbuja provocado por la coalescencia de las mismas y por consiguiente un cambio de pendiente o valor en el área superficial de burbujas disponible para el transporte de masa como se evidencia en la figura 4.8.

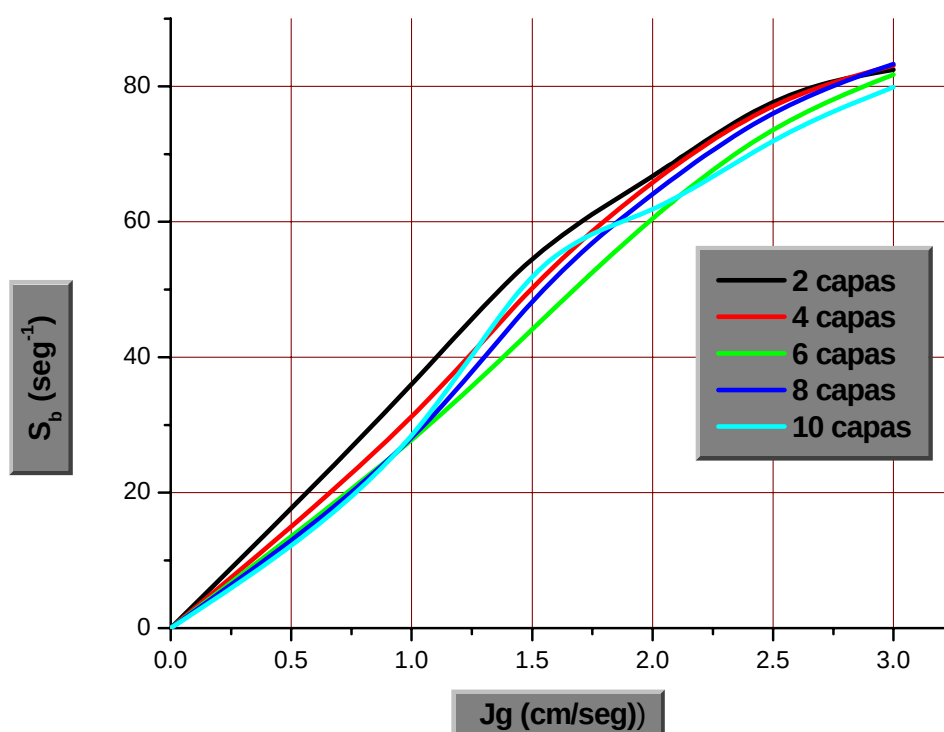


Figura 4.8.- Cambios en el área superficial de burbujas con la velocidad superficial de aire para el caso de 40 ppm de espumante (55.3 dinas/cm.).

Las características de la dispersión determinadas a partir de los datos experimentales al adicionar 60 ppm de aceite de pino (tensión superficial del líquido de 44.2 dinas/cm.) se muestran en las siguientes figuras. La Figura 4.9 muestra que la tensión superficial del líquido comienza a tener un leve efecto en la fracción de gas, al separarse las relaciones de fracción volumétrica de gas y flujo de aire inyectado, dependiendo del número de capas o permeabilidad del burbujeador.

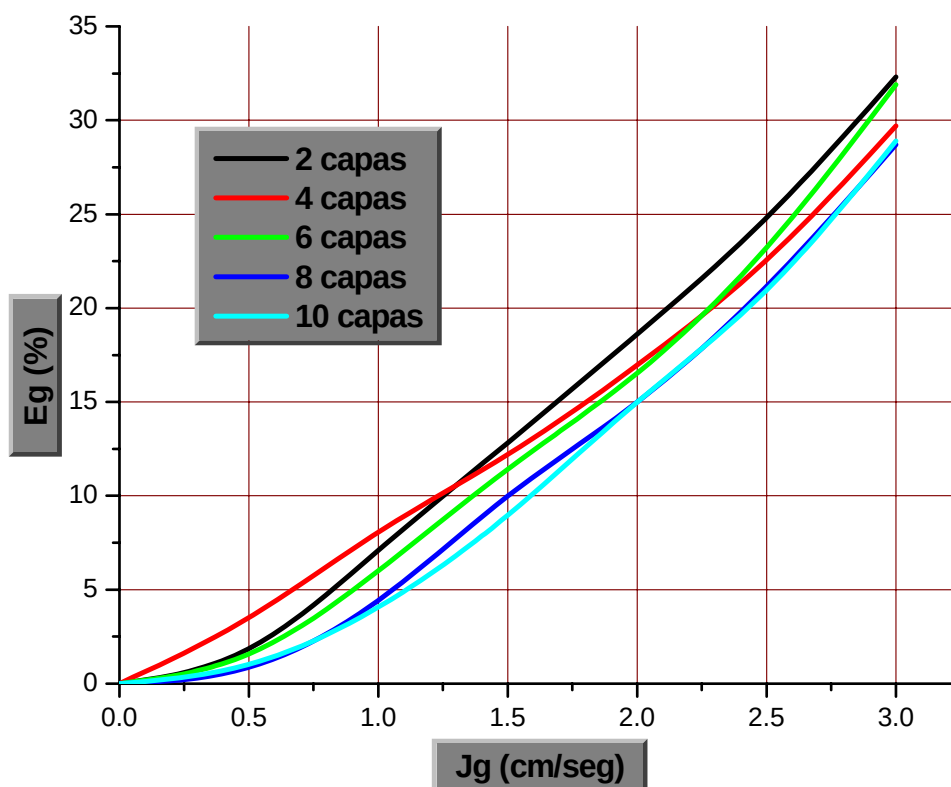


Figura 4.9.- Relación entre la fracción volumétrica de gas y la velocidad superficial de gas para el caso de una tensión superficial de 44.2 dinas/cm.

De la figura anterior, el burbujeador con dos capas de recubrimiento de tela de lona, observa aunque levemente, la mayor fracción volumétrica de gas, comparado con el burbujeador de 10 capas de revestido, aunque esta diferencia nunca es mayor a tres puntos porcentuales. En este punto se puede establecer que un mayor número de poros en el burbujeador de diez capas están activos, pero la distribución de tamaños de burbujas que se generan no refleja un diámetro promedio significativamente diferente al burbujeador con dos capas de lona.

Los diámetros promedio de burbuja generados en este experimento se muestran en la Figura 4.10. Como es de esperar, los mayores diámetros corresponden a los casos donde la fracción volumétrica de gas es menor y viceversa. Se aprecia también que para flujos superficiales de gas mayores a 2 cm./s, la coalescencia de burbujas promueve diámetros promedio de burbuja similares sin importar la permeabilidad del medio poroso.

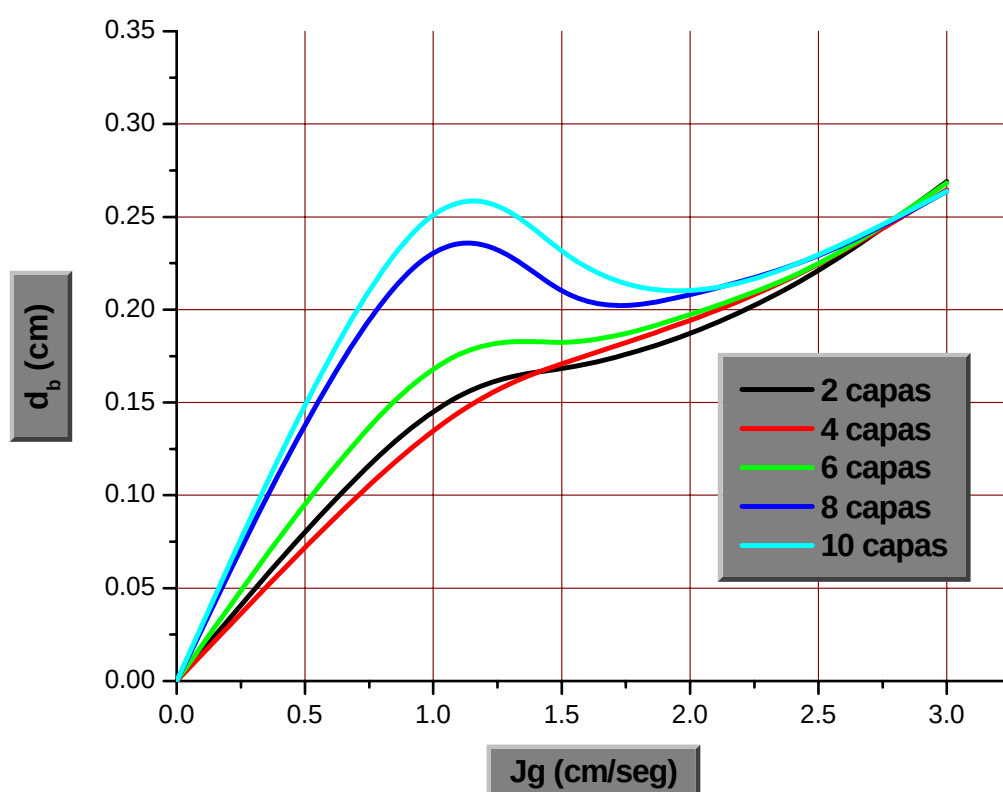


Figura 4.10.- Diámetro promedio de burbuja para el caso de adición de 60 ppm de espumante.

La Figura 4.11 respalda lo mencionado anteriormente al mostrar los cambios en el área superficial de burbujas y donde el fenómeno de coalescencia se refleja en un cambio de pendiente y en la disminución en esta característica de la dispersión.

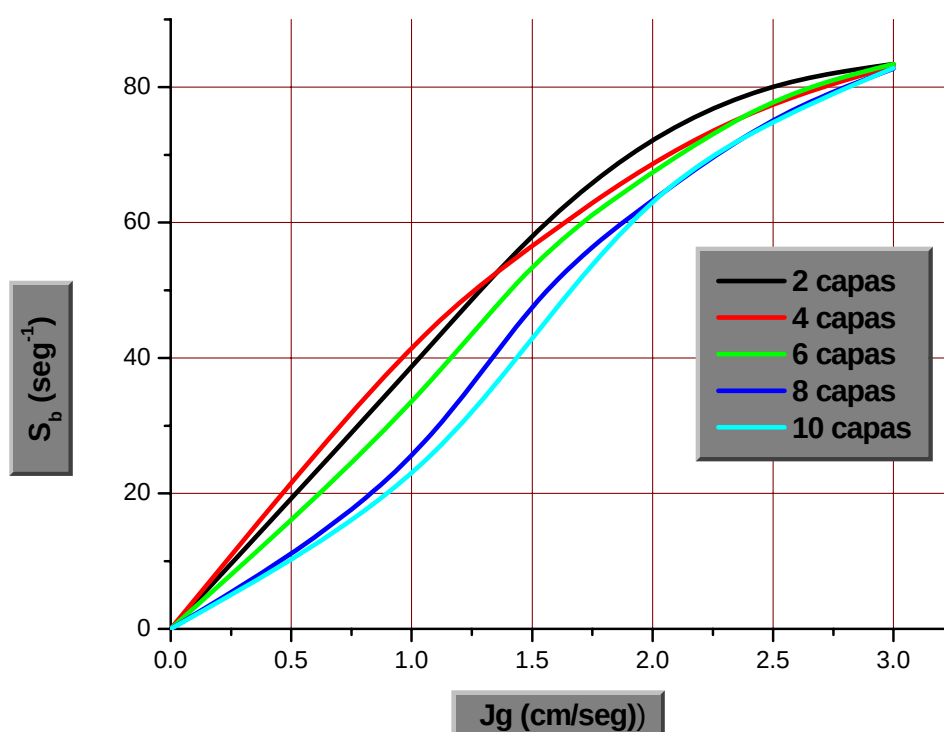


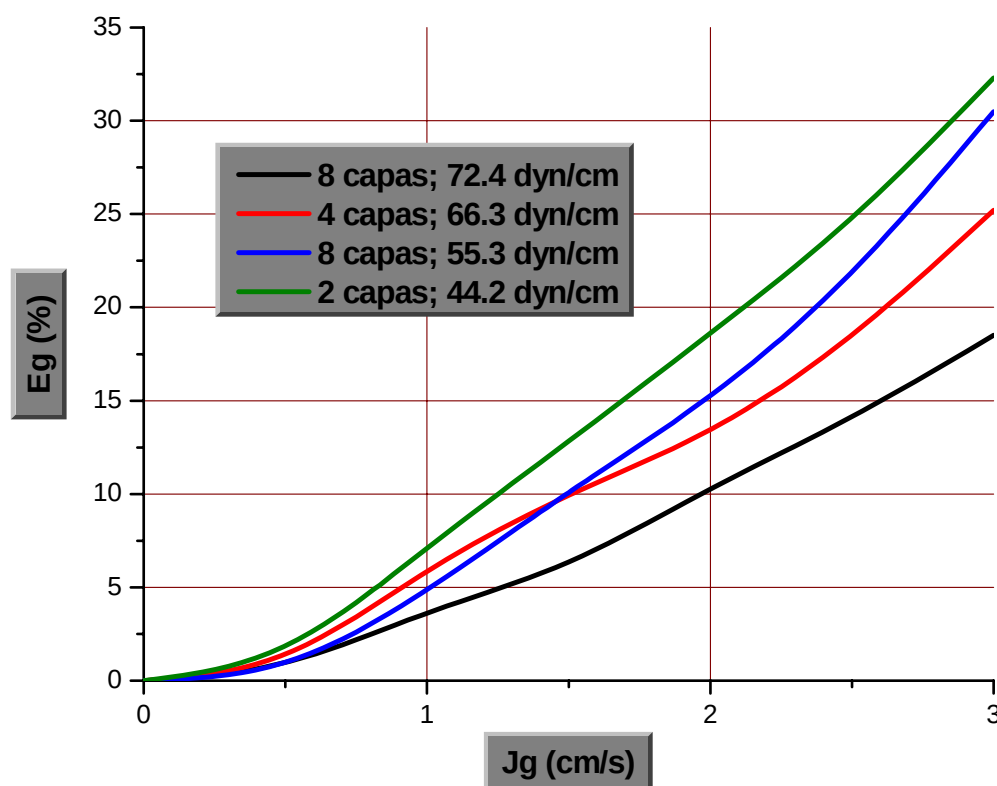
Figura 4.11.- Cambios en el área superficial de burbujas con la velocidad superficial de gas y la coalescencia de burbujas para los datos de la figura anterior.

Tomando en cuenta que el objetivo de esta serie de experimentos al variar tanto la tensión superficial del líquido y la permeabilidad del medio poroso, es el seleccionar el burbujeador y el valor de tensión superficial que signifiquen la mayor área superficial de burbujas para transporte de masa, se muestran las siguientes tres figuras que incluyen las características de la dispersiones generadas con los cinco burbujeadores.

Comparando solamente los valores máximos de fracción volumétrica de gas, diámetro de burbuja y área superficial de burbujas. La Tabla 4.1 corresponde a los datos mostrados en las siguientes figuras.

Tabla.- 4.1.- Valores máximos de fracción volumétrica de gas, diámetro de burbuja y área superficial de burbujas.

Fracción de Gas (%)	Flujo del Área Superficial de Burbuja (seg^{-1})	Tensión Superficial (dinas/cm.)	Burbujeador (# de Capas)	Diámetro de Burbuja (cm.)
18.5	69.73	72.4	8	0.2901
25.2	80.28	66.3	4	0.2646
30.5	83.27	55.3	8	0.2658
32.3	83.38	44.2	2	0.2691



La Figura 4.12 muestra las máximas fracciones de gas para cada caso de adición de espumante.

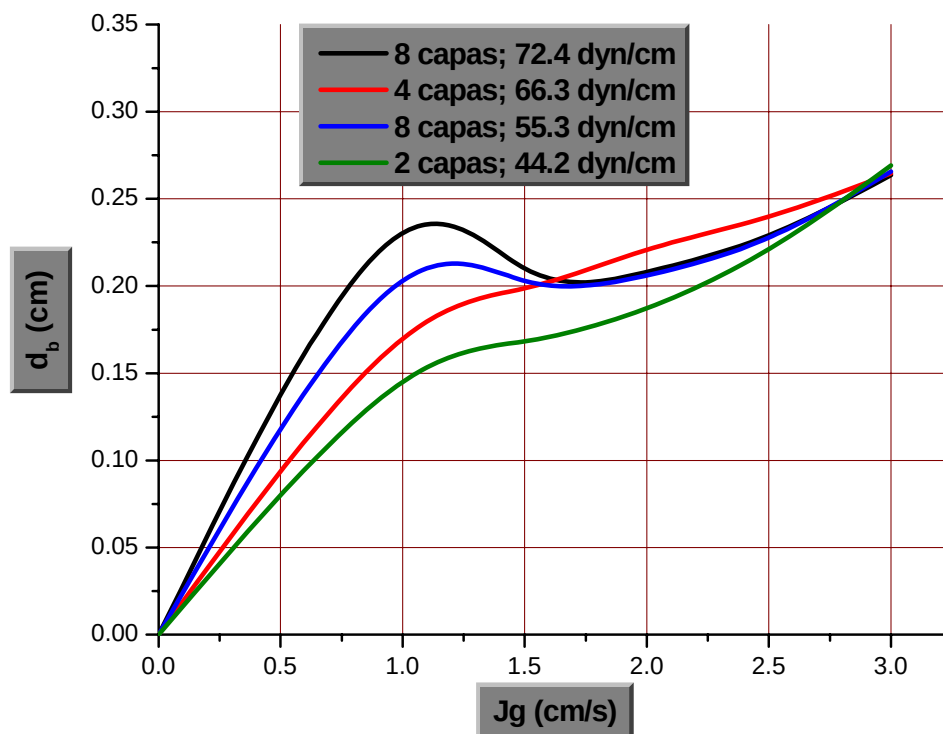


Figura 4.13 Diámetro promedio de burbuja para diferentes casos de adición de espumante.

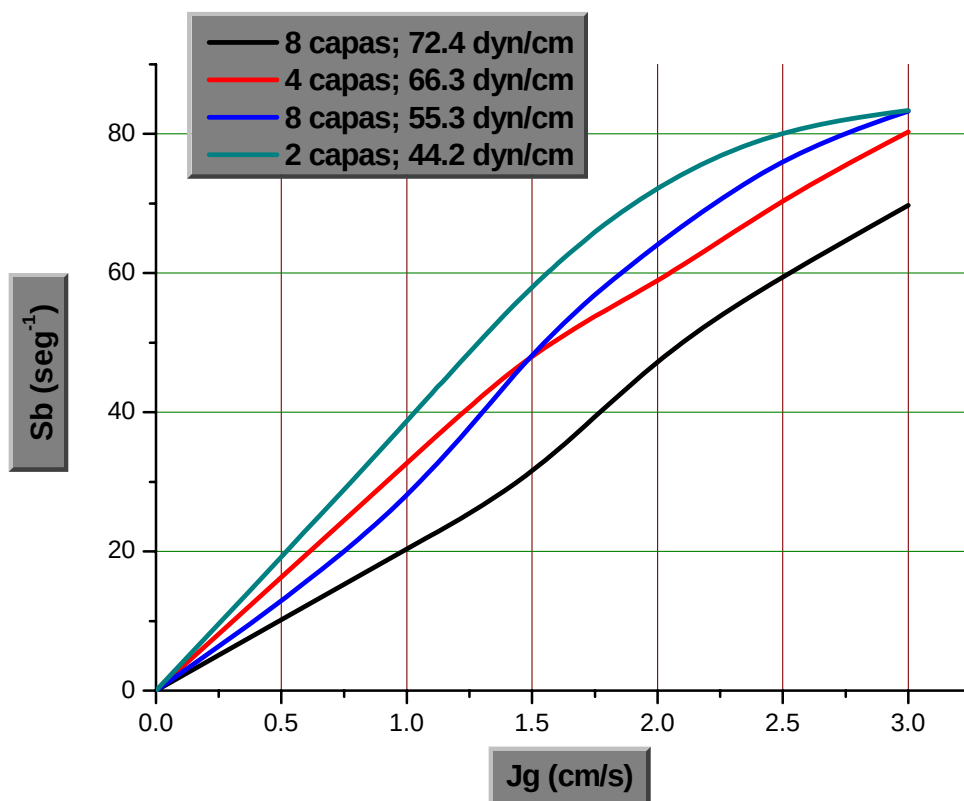


Figura 4.14 Máxima área superficial de burbuja para cada caso de adición de espumante.

De las anteriores figuras se establece que la permeabilidad o el número de capas con que están recubiertos los burbujeadores no tiene efecto sobre las características de la dispersión que se generan, ya que los valores máximos se observan ya sea en los burbujeadores de dos, cuatro u ocho capas de tela de lona.

En el caso de la tensión superficial del líquido, tiene un efecto significativo en el caso donde no se adiciona espumante por lo que el diámetro de burbuja aumenta y disminuyen tanto la fracción de gas como el área superficial de burbujas.

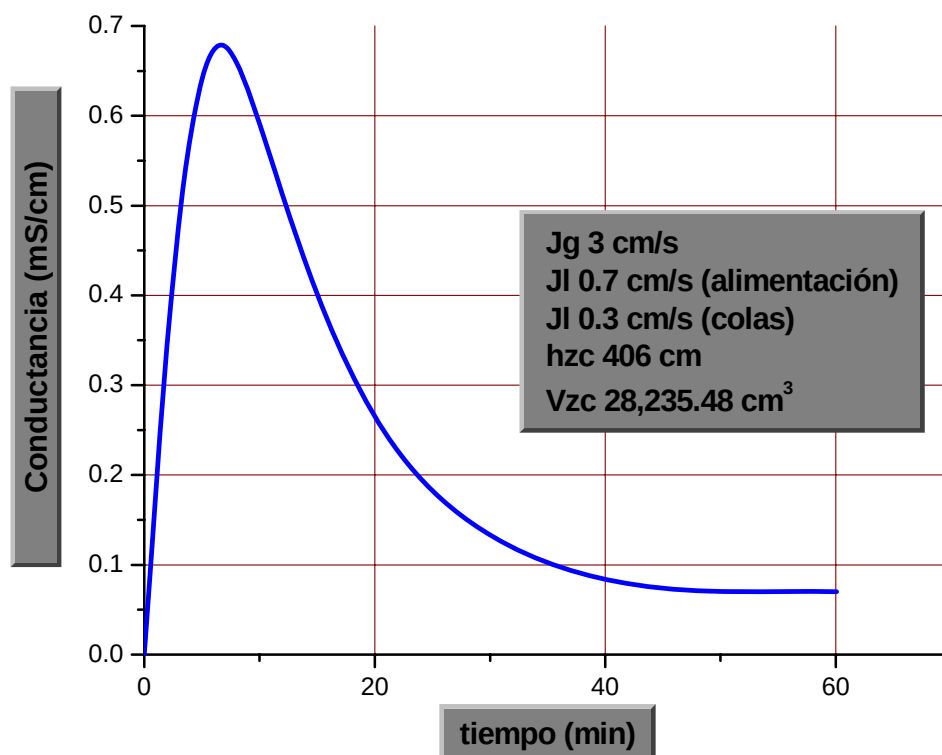
A partir de tensiones superficiales de 66.3 dinas/cm. (20 ppm de espumante adicionado) los ligeros cambios en el diámetro promedio de burbuja no afectan substancialmente los valores de fracción volumétrica de gas y área superficial de burbujas.

De los resultados experimentales de caracterización de los burbujeadores de 2, 4, 6, 8 y 10 capas de tela de lona se determinó utilizar el burbujeador de 4 capas de recubrimiento con una velocidad superficial de gas de 3 cm./s a una tensión superficial de líquido de 44.25 dinas/cm. al adicionar 60 ppm de aceite de pino como surfactante, a manera de obtener fracciones volumétricas de gas de alrededor del 30 porciento, diámetros de burbuja aproximado de 0.27 cm. y áreas superficiales de burbuja para transportar masa del orden de $82 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$.

4.2.- Determinación del tiempo de residencia y Patrón de Mezclado.

Tal y como se describe en el capítulo anterior, se midió el tiempo de residencia de la fase continua en la columna, utilizando un trazador salino y detectando los cambios en concentración en la corriente de colas mediante el uso de una celda de conductividad construida para tal fin. Con la información obtenida se estableció también el patrón de mezclado y la constante de velocidad de flotación (k) en la columna. El Anexo 4.1 incluye los datos experimentales durante la determinación del tiempo de residencia.

La Figura 4.15 es un comportamiento típico de cambios en la concentración del cloruro de potasio inyectado con el tiempo.



La Figura 4.15 es un comportamiento típico de cambios en la concentración del cloruro de potasio inyectado con el tiempo.

La forma de la curva de tiempo de residencia mostrado en la anterior figura corresponde a un tipo de patrón de mezclado que combina tanto el patrón del tipo pistón como el de mezclado perfecto (Finch y Dobby, 1990). Experimentalmente se determinó el tiempo de residencia y se calculó el número de dispersión (Nd) correspondiente. La Tabla 4.2 muestra los cálculos de Nd para diferentes valores de Jg.

Tabla 4.2 Cálculo del número de dispersión a diferentes valores de velocidad superficial de gas.

Jg (cm./s)	Nd
0.5	0.2720
1	0.4124
1.5	0.5261
2	0.6253
2.5	0.7148
3	0.7974

De acuerdo a los cálculos del tiempo de residencia para diferentes valores de J_g , empleando la expresión propuesta por Finch y Dobby (1990), mostrados en la Tabla 4.2, se concluye que el patrón de mezclado corresponde al tipo conocido como “Mezclado Real” que es una combinación del mezclado tipo pistón y del mezclado perfecto; esto, coincide con lo observado por Finch y Dobby (1990) donde establecen que las columnas de diámetros mayores a cinco centímetros; observan un patrón de mezclado que combina el de tipo pistón y el de mezclado perfecto.

4.3.- Flotación de iones de cobre en solución

Una vez establecidos los parámetros operativos de la columna se procedió a realizar experimentos con la finalidad de establecer la factibilidad de utilizar este sistema de dispersión para remover iones de cobre de una solución acuosa, simulando cierto tipo de contaminación de un manto freático. Se experimentó con tres diferentes relaciones Amil Xantato de Potasio:Sulfato de Cobre (1:1, 1:0.5 y 1:1.3) . Las condiciones experimentales para esta etapa se describen en el capítulo III. Los resultados de la prueba de agotamiento para las tres relaciones molares Amil Xantato de Potasio:Sal de Cobre, se muestran en la Figura 4.16. Por otra parte, en el Anexo 4.3 se muestran los datos experimentales correspondientes a las pruebas de flotación de iones de cobre en solución.

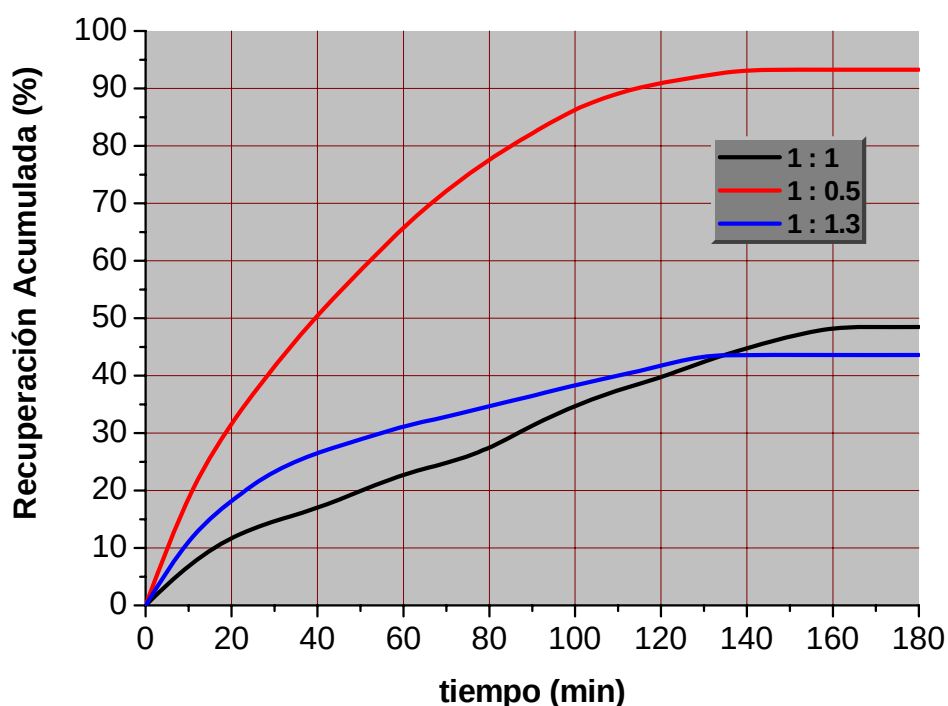
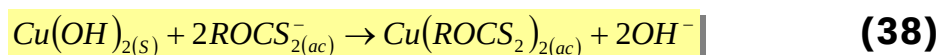


Figura 4.16.- Resultados de recuperación acumulada de iones de cobre en solución para tres diferentes relaciones molares colector:sal de cobre.

La figura muestra que la máxima recuperación se obtiene para relaciones molares de 1:0.5, esta recuperación acumulada de iones de cobre en forma de Amil Xantato Cuprico ó Amil Xantato de Cobre (II) es del orden del 93% después de un tiempo de 140 minutos.

Este valor máximo de recuperación para la relación molar 1:0.5 se explica por la relación estequiométrica de la reacción de formación del complejo organometálico siguiente:



En el caso de la relación 1:1 se obtuvieron recuperaciones acumuladas menores al 50% debido al hecho de que no se tiene el suficiente colector para la captura de los iones de cobre, o sea que se tiene la mitad de colector para la captura de los iones de cobre.

La anterior aseveración se refuerza al hacer más deficiente el contenido de colector disponible para la captura y recuperación de iones de cobre. Se observa de la anterior figura que para la relación 1:1.3 el complejo de cobre capturado y recuperado es similar al de la relación 1:1 al no haber colector suficiente para incrementar la recuperación.

4.3.1.- Cálculo de la constante de velocidad de flotación (k).

Considerando el patrón de mezclado discutido de la Figura 4.16 se calculó la constante de velocidad de flotación para los datos experimentales de la Figura 4.17. La constante de velocidad de flotación de iones de cobre en solución observa un valor promedio de 0.018 para la relación xantato:sal de cobre igual a 1:0.5; mientras que para las otras dos relaciones (1:1 y 1:1.3) los valores de la constante de velocidad es de 0.047 en promedio; los anteriores valores naturalmente corresponden con el hecho de que el máximo valor en la constante de velocidad de flotación pertenece al caso de la mayor recuperación acumulada o flotada de iones de cobre. Los valores menores de velocidad de flotación, por su parte, indican el menor rendimiento metalúrgico de la columna.

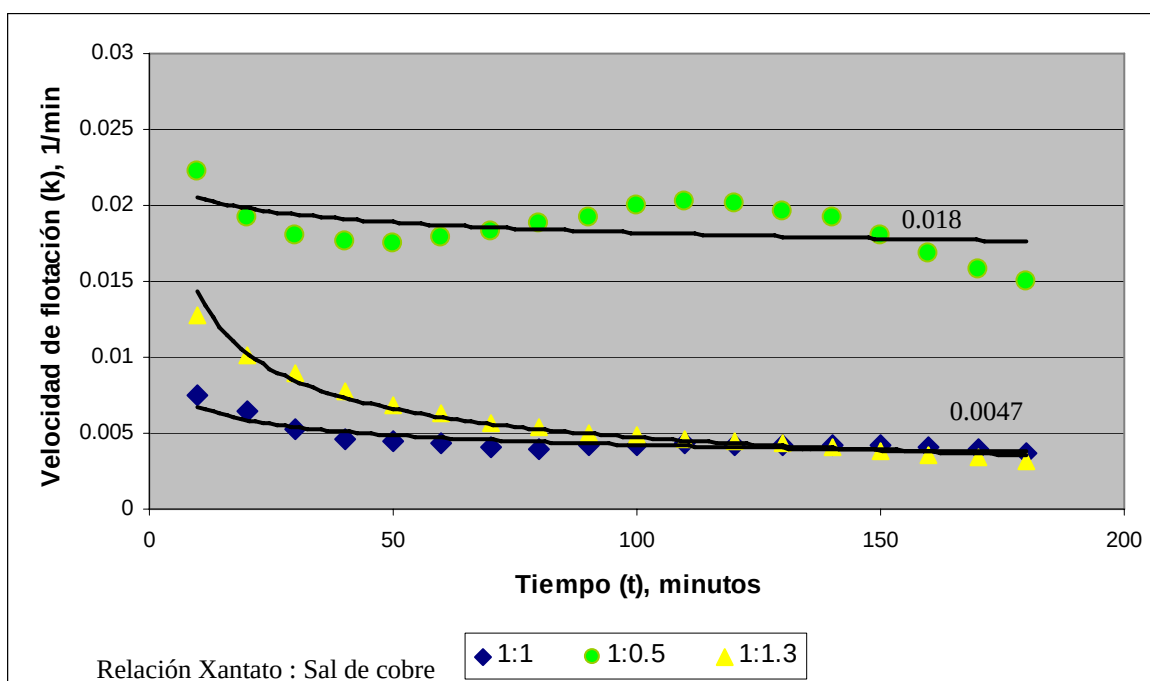


Figura 4.17.- Variaciones de la constante de la velocidad de flotación de iones de cobre para los datos de la Figura 4.16.

Los resultados experimentales de este trabajo de investigación permiten proponer el sistema de flotación en columnas para aplicaciones no minerales como el tratamiento de efluentes que se aborda aquí. Se incluye además lo referente a la utilización de materiales porosos fabricados con tela de lona, así como su correspondiente caracterización.

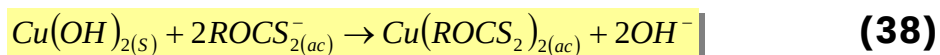
Las conclusiones derivadas de este trabajo se enlistan a continuación.

5.1.- CONCLUSIONES:

Del trabajo experimental desarrollado en este trabajo de tesis, con el objeto primeramente la determinación de la factibilidad de utilizar las columnas de flotación para el tratamiento de efluentes contaminados con iones de cobre, y en segundo lugar, para establecer las condiciones hidrodinámicas y químicas para la eficiente separación del cobre en solución, se derivan las siguientes conclusiones:

- 1.- Mediante la correcta operación de las columnas de flotación se pueden separar iones de metales pesados (p.e. cobre) que contaminan los mantos freáticos.
- 2.- Los burbujeadores fabricados con tela de lona empleados en este trabajo, la permeabilidad de los mismos (variada mediante el número de capas de tela con que son recubiertos) no influye en las características de la dispersión, para un sistema aire-agua sin espumante.
- 3.- La disminución en la tensión superficial del líquido al adicionar el espumante, resulta en un incremento en la fracción volumétrica el diámetro promedio de burbuja.
- 4.- El efecto de la tortuosidad en los medios porosos no permite observar una tendencia clara de aumento en la fracción de gas con la disminución de la permeabilidad de los burbujeadores.
- 5.- Independientemente de la permeabilidad del burbujeador y para valores de tensión superficial menores a 66 dinas/cm, a partir del flujo superficial de aire igual a 2.0 cm/s, se observa un aumento súbito del diámetro promedio de burbuja, aunque no afecta el valor creciente de S_b .

- 6.- Considerando los valores máximos de S_b que permitan la mayor área superficial para captura y transporte de masa, las condiciones de operación que se seleccionaron para llevar a cabo la flotación de cobre en solución son:
- Burbujeador de 4 capas de recubrimiento
 - Concentración de espumante 60 ppm (44.2 dinas/cm.)
 - Velocidad superficial de aire 3.0 cm./seg.
 - Diámetro de burbuja 0.26 cm.
 - Área superficial de burbujas 83.09 seg.⁻¹
 - Flujo superficial en la corriente de alimentación 0.70 cm./seg.
 - Flujo superficial en la corriente de colas de 0.30 cm./seg.
- 7.- De la curva de tiempo de residencia de una solución salina en la zona de colección (determinada experimentalmente) se establece que el patrón de mezclado para este sistema corresponde a una combinación entre el mezclado tipo pistón y el mezclado perfecto.
- 8.- Los cálculos del coeficiente de dispersión (N_d) indican que para este sistema el patrón de mezclado es muy semejante al patrón de mezclado tipo pistón.
- 9.- La flotación de la especie cobre en solución se llevó a cabo para tres casos de relación de concentraciones molares xantato: sal de cobre.
- 10.- La máxima recuperación de cobre en solución se observó en la relación molar 1:0.5, la cual corresponde a la relación estequiométrica marcada por la reacción de formación del complejo de cobre y xantato:



Para la más alta constante de velocidad de flotación, se obtuvo una recuperación de Cu del 93% después de 140 minutos de flotación.

- 11.- Las constantes de velocidad de flotación calculadas para cada relación molar, corresponden en valor con el rendimiento metalúrgico del proceso.
- 12.- La factibilidad del uso de las columnas de flotación para separar iones de cobre en solución, permiten plantear el caso del tratamiento de efluentes contaminados con iones de metales pesados, el tratamiento de las aguas ácidas de minas, entre otras. En otras palabras, lo aquí encontrado da lugar a la transferencia de tecnología económica y de fácil operación para resolver problemas de carácter ambiental.

5.2.- TRABAJO FUTURO

Los resultados experimentales de este trabajo de tesis, abren una amplia gama de temas de investigación que complementan el presente proyecto. Algunas de las tareas que se proponen desarrollar a partir de lo encontrado aquí son:

- Determinar los mejores diámetros de burbuja para la máxima recuperación de cobre en solución.
- Establecer el efecto del pH en la captura del cobre disuelto.
- Establecer el efecto de la presencia de otros iones de metales pesados en la separación de cobre y en la selectividad de la flotación.
- Llevar a cabo en estudio de flotación de cobre en solución, utilizando diferentes reactivos colectores.

1. Kennet J. Ives (1982) The Scientific Basis of Flotation, NATO ASI Series, pags. 1-48
2. G. S. Dobby and J.A. Finch, Chem. Engng. Sci. 40(7), 1061 (1985).
3. Rubio, J., Environmental applications of the flotation process. In Effluent Treatment in the Mining Industry, ed. S.H. Castro, F. Vergara and M. Sánchez, University of Concepción, Chile, 2000, pags. 335-364.
4. Ángel M.D., Moxon N.T., Nicol S.K., 1992. Process economics of gold ion flotation from alkaline cyanide solution. Proceedings, Randol Gold Conference 92, Vancouver Randol International Ltd., Golden, CO, pags. 305-313.
5. Rezza Editores, Tratado universal del medio ambiente. Tomos 4 y 8 pags. 31-37 : 489-512
6. Suoninen E.J., Forssberg K.S.E. y Buckley A.N. (editors) 1997. Application of surface science to advancing flotation technology. Int. J. of Mining Processing. Amsterdam, Elsevier.
7. Finch J. A. and Dobby G. S. 1990. Column Flotation. Pergamon Press, Oxford first edition.
8. Proa E. & Arreola J. 17 de febrero 2004. Alertan sobre ingesta de agua con arsénico. El Universal pag. 90
9. Cardoso L. 13 de enero 2000. Daña la salud el mal manejo de desechos. El Universal pag. 1
10. Vázquez B. A. 30 de diciembre de 2002. Contamina el plomo agua de chiconautla. El Universal pag. 6
11. López S. J. 17 de marzo de 2001. Contamina papelera dos ríos y una presa. El Universal pag. 23
12. Sastry, K.V.S. and Fuerstenau, D.W. (1970), Theoretical Analysis of a Countercurrent Flotation Column, trans, SME-AIME, No. 247, pags. 46-52

-
-
13. Rice, R.G., Oliver, A.D., Newman, J.P. and Wiles, R.J. (1974), Reducing Dispersion Using Baffles in Column Flotation, Powder Tech., 10 pags. 201-210
 14. Habashi F. 1980. Principles of extractive metallurgy. Ed Gordon & Breach Science publishers Ltd. Volume 2 (hydrometallurgy). pags. 289-295
 15. Yianatos, J.B. Marchese, M.M., Hutchinson, S. and Wiles, R.J., (1989) Characterization of Gas sparging Media in the Flotation column; 28th Annual Conference of Metallurgists of C.I.M., Halifax, Canada, Agust.
 16. Xu M., Finch, J.A. 1989. Effect of sparger surface area on bubble diameter in flotation columns. Canadian Metallurgy Quarterly. Vol. 28 No. 1 pags. 1-6
 17. Escudero R. 2004. Tópicos Selectos de Metalurgia Extractiva. Notas de curso, IIM. Morelia México
 18. Sebba, F. 1959. Concentration by ion flotation. Nature No. 164 pags. 1062-1063
 19. Doyle F. 2003. Ion flotation-its potential for hydrometallurgical operation. Int. J. Miner Process No. 72 pags. 387-399
 20. Sebba, F. 1962. Ion Flotation. Elsevier, New York.
 21. Filippov L. O., Hout R., Joussement R. 1997. Physicochemical mechanisms and ion flotation possibilities using columns for Cr^{6+} recovery from sulphuric solution. Application of surface science to advancing flotation technology. Suoninen E.J. Forssberg K.S.E. y Buckley A.N. (editors). Int. J. of Min Processing. Amsterdam, Elsevier. Pags. 229-239.
 22. Martínez L. A. 2003. Tratamiento de un efluente del proceso de cianuración mediante flotación: remoción de cobre y zinc. 2° encuentro regional de metalurgia. Editores F. Raúl Carrillo P. & M. J. Soria Aguilar Monclova, Coahuila.
 23. Hualing, D., Zhide, H. 1989. Ion flotation behavior of thirty-one metal ions in mixed hydrochloric/nitric acid solution. Talanta No. 36 pags. 633-637.

24. Zhendong L., Doyle. F. M. 2003. The effect of triethylenetetraamine (Trien) on the flotation of Cu^{2+} and Ni^{2+} Journal of Colloids and interface Science, No. 258 pags. 396-403.
25. Zhendong L., Doyle. F. M. 2001. A thermodynamic approach to Ion Flotation. I Kinetics of cupric ion flotation with alkyl sulfates. Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and engineering aspects. No. 178 pags 79-92.
26. Zhendong L., Doyle. F. M. 2000. A thermodynamic approach to Ion Flotation. II Metal ion selectivity in the SDS-Cu-Ca and SDS-Cu-Pb systems. Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and engineering aspects. No. 178 pags 93-103.
27. Pacheco, A.C.C., Torem, M.L. 2002. Influence of ionic strength on the removal of As^{5+} by adsorbing colloids flotation. Separation Science and Technology, 37 (15). pags. 3599-3610.
28. Zouboulis, A.I., Matis, K.A., Lazaridis, N.K. 2001. Removal of metal ions from simulated waste water by sccharomyces yeast biomass: combining biosorción and flotation processes. Separation Science and Technology, 36 (3). pags. 349-365.
29. Tavera F. J., Escudero R., Uribe A. & Finch J. A. Noviembre-Diciembre 2000. Flotación de Ni-DETA en medios acuosos: aplicación de columnas de flotación. Afinidad. LVII, 490. pags. 415-423.
30. The Dow Chemical Company 1981. Flotation fundamentals. Key to effective economical modern mining practice. pags. 1-16
31. Ityokumbol. M. T. 1993. Maximum gas velocity in column flotation. Minerals Engineering. Vol. 6, No. 12 pags. 1279-1286.
32. Tavera F. J. 2003. Temas selectos de metalurgia extractiva. Notas de curso. IIM, Morelia Michoacán, México.
33. Kelly E. G. y Spottiswood D. J., (1990), introducción al procesamiento de minerales, Noriega Editores.
34. Fuerstenau, D. W. (1985). Where we are in flotation chemistry after 70 years of research. Proceedings of the XIX Miner: Process. Congress. San Francisco, USA. SME-AIME, Vol. 3, pags. 3,17.

-
-
35. Rice, R. G. Tupperainen, J.M.I. and Hedge, R. M., (1981), Dispersion and Hold up in Bubble Columns, Comparison of Rigid and Flexible Spargers, Canadian J. Chem., 59 pags. 677-687.
 36. G. H. Luttrell, M. J. Mankosa and R-H Yoon, (1993), Design and Scale-Up criteria for Column Flotation. Proceedings of the XVIII International Mineral Processing Congress. Sidney, Australia, pags. 785-791.
 37. Levenspiel O., (1972), Chemical Reaction Engineering, Wiley. N. Y. Chapter 9.
 38. Klimpel, R. R., Dhansen, R., Fee, B. S., 1986. Selection of flotation reagents for improved sulphide mineral flotation. In: Mular, A. L., Anderson, M. A. (eds). Design and installation of concentration and dewatering circuit. pags. 384-404, chap 26.
 39. Uribe A. 1991. Process measurements in flotation columns using electrical conductivity. PH.D. Thesis. University Mc Gill, Canada.
 40. Tavera F. J., Colwell D., Escudero R. and Finch J. A. marzo-abril 2000. Estimation of gas hold up in froths by electrical conductivity: application of the standard addition method. Afinidad Tomo LVII, No. 486. pags. 138-142.
 41. Manqiu Xu and J. A. Finch (1989). Effect of Sparger Area on Bubble Diameter in Flotation Columns, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 28. No. 1 pags. 1-6
 42. Clingan, B. V. and McGregor, D. R., (1987) Column Flotation Experiences at Magma Copper Company, with Related Experiences of Other Minerals Processors; 116th Annual AIME-SME Meeting, Denver, USA, February.
 43. Dobby, G. S. and Finch J. A. (1986), Particle Collection in Columns-Gas Rate and Bubbles Size Effects, Canadian Metallurgical Quarterly, 25 (1). pags. 9-13.
 44. Dobby, G. S. and Finch J. A. (1986), Flotation Column Scale up and Modelling, CIM Bull., Vol. 79, No. 889, pags. 89-96.

45. Gorian, B. K. Manlapig, E. V. and Franzidis, J. –P.: 1996, The Effect of Gas Dispersion Properties on the Kinetics of Flotation, en Column 1996, C.O. Gomez and Finch eds., Proc. Of the International Symposium on Column Flotation, The Met. Soc. of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, pags. 299-313.
46. Gorian, B. K.: (1997), The Effect of Bubble Surface area Flux on the Kinetics of Flotation and its relevance to Scale-Up, Ph. D. Thesis, University of Queensland, Australia.
47. Banisi, S. and Finch, J. A. (1994), Reconciliation of Bubble Size Estimation Methods Using Drift Flux Analysis, Minerals Engineering, Vol. 7, No. 12, pags. 1555-1559.
48. Ecudero García, R.: (1988), Characterization of Rigid Porous Spargers by Permeability and its Relevance to Scale-up, Ph. D. Thesis, McGill University, Canada.
49. Dobby, G. S., Yianatos J. B. and Finch J. A. (1988). Estimation of Bubble Diameter in Flotation Columns from Drift Flux Analysis. Canadian Metallurgy Quarterly. Vol. 27, No. 2. pags. 85-90.
50. B. A. Wills. Mineral Processing Technology, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Pergamon Press, fourth Edition.
51. Fuerstenau M. C., Miller J. D. and Kuhn M. C. (1985), Chemistry of Flotation, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc.
52. Alkemin S. de R.L. de C.V. 2003 Xantatos en sistemas de flotación. Reacciones, Fenómenos y Mecanismos. Morelia, Michoacán, México.
53. Zarate Medina, J. 2004. Notas de curso: Química de Superficies y Coloides. IIM, Morelia, Michoacán. México.
54. Lelinski, D., Allen, J., Redden, L. & Web, A. 2002. Analysis of the residence time distribution in large flotation machines. Minerals Engineering. (15). Pags. 499 -505.