



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ESTUDIOS ELECTROQUÍMICOS DE IMPEDANCIA A ALTA  
FRECUENCIA APLICADOS AL MINERAL DE MALAQUITA EN  
AUSENCIA Y PRESENCIA DE AGENTE SULFIDIZANTE BAJO  
CONDICIONES DE FLOTACIÓN.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**GUILLERMO TAPIA GUERRERO**



**CIUDAD DE MÉXICO**

**AÑO 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>PRESIDENTE</b>     | <b>Profesor:</b> Antonio Huerta Cerdán.          |
| <b>VOCAL:</b>         | <b>Profesor:</b> Juan Manuel de la Rosa Canales. |
| <b>SECRETARIO:</b>    | <b>Profesor:</b> Vianey Torres Mendoza.          |
| <b>1er. SUPLENTE:</b> | <b>Profesor:</b> David Turcio Ortega.            |
| <b>2° SUPLENTE:</b>   | <b>Profesor:</b> Ceferina Ignacio Vicente.       |

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIOS 005, 006 Y 212 DEL EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA.**

**ASESOR DEL TEMA:**

**M. EN M. JUAN MANUEL DE LA ROSA CANALES**

**SUSTENTANTE:**

**GUILLERMO TAPIA GUERRERO**



# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN</b>  | <b>3</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                                     | <b>4</b>  |
| <b>HIPÓTESIS</b>  | <b>6</b>  |
| <b>OBJETIVO GENERAL</b>                                 | <b>6</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>               | <b>7</b>  |
| <b>1.1 COBRE: PROPIEDADES, EXPLOTACIÓN Y EXTRACCIÓN</b> | <b>7</b>  |
| 1.1.1 Propiedades físicas                               | 9         |
| 1.1.2 Propiedades químicas                              | 10        |
| 1.1.3 Explotación de cobre                              | 11        |
| 1.1.3.1 Explotación y Producción de cobre en México     | 13        |
| 1.1.3.2 Minerales de cobre                              | 18        |
| 1.1.3.3 Malaquita                                       | 21        |
| 1.1.4 Extracción de cobre                               | 22        |
| 1.1.4.1 Extracción vía pirometalúrgica                  | 22        |
| 1.1.4.2 Extracción vía hidrometalúrgica                 | 24        |
| <b>1.2 SULFURACIÓN</b>                                  | <b>26</b> |
| 1.2.1 Descripción del proceso                           | 26        |
| 1.2.2 Reactivos utilizados en la sulfuración            | 27        |
| <b>1.3 IMPEDANCIA DE ALTA FRECUENCIA</b>                | <b>29</b> |
| 1.3.1 Descripción de la técnica electroquímica          | 29        |
| 1.3.2 Circuitos equivalentes y de capacitancia          | 30        |
| 1.3.3 Dielectricidad                                    | 32        |
| 1.3.4 Constante dieléctrica                             | 33        |
| <b>1.4 FLOTACIÓN Y CELDA HALLIMOND</b>                  | <b>34</b> |
| 1.4.1 Proceso de flotación                              | 34        |



|  |           |
|--|-----------|
| 1.4.2 Variables del proceso  | 36        |
| 1.4.3 Eficiencia del proceso de flotación                              | 37        |
| 1.4.4 Reactivos utilizados en la flotación                             | 39        |
| 1.4.5 Celdas de flotación  | 40        |
| 1.4.6 Celda Hallimond  | 41        |
| <b>CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>                             | <b>43</b> |
| 2.1 METODOLOGÍA  | 43        |
| 2.2 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE IMPEDANCIA A ALTA FRECUENCIA             | 46        |
| 2.3 REALIZACIÓN DE MICROFLOTACIONES EN CELDA HALLIMOND                 | 48        |
| <b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS</b>  | <b>50</b> |
| 3.1 RESULTADOS A PARTIR DE LAS PRUEBAS DE IMPEDANCIA A ALTA FRECUENCIA | 50        |
| 3.2 RESULTADOS A PARTIR DE LAS MICROFLOTACIONES EN LA CELDA HALLIMOND  | 58        |
| <b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>                              | <b>64</b> |
| <b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES</b>  | <b>70</b> |
| <b>CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>71</b> |
| <b>CAPÍTULO 7. ANEXOS</b>  | <b>74</b> |



## Resumen

El proceso de flotación es ampliamente utilizado a nivel industrial para concentrar minerales sulfurados, sin embargo, con estos reactivos y las condiciones de trabajo establecidas no es posible flotar minerales del tipo oxidado, tal es el caso de la Malaquita  $\text{CuO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ . Para llevar a cabo una flotación en este tipo de minerales es necesario realizar una sulfuración en su superficie, como resultado al introducir un colector tipo Xantato se adsorberá en esta superficie sulfurada y de esta forma se podrá realizar la flotación de los mismos.

El objetivo principal del proceso de sulfuración es convertir la superficie de los minerales oxidados en sulfuros lo cual se logra al adicionar reactivos que aportan iones  $\text{S}^{2-}$  y  $\text{SH}^-$ . El papel de estos iones es modificar completamente la naturaleza físico-química de su estructura superficial, permitiendo la adsorción de colectores en ella, y su posterior flotación.

Por tal motivo este trabajo se encaminó a obtener las mejores condiciones de sulfuración y flotación, se utilizaron como reactivos al sulfuro de sodio como sulfurizante y el xantato isopropilico de sodio (XINa) como colector. Se estudió la interacción mineral-sulfurizante-colector aplicando la técnica de impedancia a altas frecuencias y finalmente se realizaron microflotaciones del sistema malaquita-sulfurizante- colector para obtener las condiciones adecuadas de flotación.

Los resultados más relevantes obtenidos en esta tesis muestran con respecto a las pruebas de impedancia una relación directa de la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) con el proceso de flotación del material, teniéndose las mejores condiciones de trabajo a pH 9, una concentración de agente sulfidizante de  $2 \times 10^{-3}$  M, concentración del colector XINa  $1.5 \times 10^{-3}$  M, 0.05 ml de espumante isobutilcarbonil y un tiempo de acondicionamiento de 5 minutos, las cuales se validaron realizando microflotaciones en celda Hallimond.



## Introducción

En la actualidad el proceso más aplicado en la concentración de minerales es la flotación ya que su rendimiento y costo son muy aceptables. El factor que determina si el proceso es aplicable es el carácter hidrofóbico del mineral, los minerales sulfurados presentan características de flotabilidad natural dado los ángulos de contacto obtenidos en el sistema S-L-G. Sin embargo, minerales del tipo óxido son inherentemente hidrófilos y es común que requieran modificación superficial con reactivos del tipo sulfuro de sodio o hidrosulfuro de sodio, a través de los cuales se promueva la adsorción de colectores. Los iones sulfuro forman una capa superficial en el mineral y con la adsorción de un colector adaptado sobre esta, los minerales pueden ser flotados. [7]

En los últimos años se han encontrado yacimientos con menas de carbonatos de cobre (malaquita) asociadas a minerales como son azurita, cuprita y limonita. En México se explotan 25 mil toneladas de cobre anuales vía lixiviación (Piedras Verdes, 2013) [10]. Este proceso tiene la desventaja de ser muy lento en comparación a otros para la obtención de cobre metálico, debido a que las leyes de estas pilas de lixiviación son bajas. Estas son rociadas con ácido sulfúrico para disolver el cobre presente, la solución obtenida pasa por un proceso de extracción por solventes y despojo electrolítico donde es purificada, se recolecta el sulfato de cobre purificado para su posterior procesamiento en plantas de electro-benefició.

El estudio de impedancia a alta frecuencia relaciona la respuesta de la pulpa (mineral + solución buffer) a diferentes condiciones con una corriente eléctrica, dando como resultado una constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ), que a su vez está ligada a la flotabilidad del mineral.



El presente trabajo se desarrolló en dos partes experimentales que constaron de 32 pruebas de impedancia a alta frecuencia, realizadas en un equipo de medición del vector de impedancia HP modelo HP4193A, en donde se determinaron las condiciones favorables para la flotación del mineral de malaquita. Para corroborar estas mediciones de impedancia se realizaron 32 microflotaciones en celda Hallimond.





## **Hipótesis**

La formación de pseudosulfuros en la superficie de un mineral de malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ) podrá coadyuvar a la adsorción de colectores sulfhidrilo para su posterior flotación.

## **Objetivo general**

Obtener y evaluar los efectos de concentración de  $\text{Na}_2\text{S}$  y pH en el mineral de malaquita a través de mediciones de impedancia a alta frecuencia.

## **Objetivo particular**

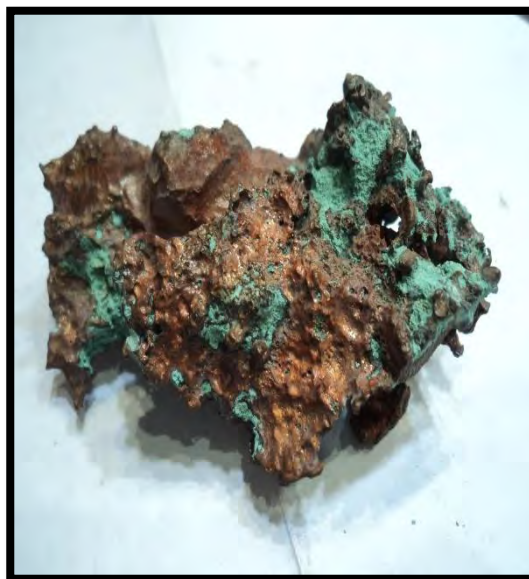
Obtener y evaluar los efectos de concentración de  $\text{Na}_2\text{S}$  y pH bajo los cuales un mineral de malaquita pueda flotar o ser deprimido a través de pruebas de flotación.



## CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 1.1 COBRE: PROPIEDADES, EXPLOTACIÓN Y EXTRACCIÓN

El cobre es considerado uno de los metales más utilizados desde la antigüedad ya que junto con el oro y la plata, aparece en forma de pepitas de metal nativo (figura 1), sus primeros usos pueden remontarse antes del 9000 AC. Se cree que su nombre proviene de la isla de Chipre, que en la antigüedad proporcionaba el metal a las ciudades griegas, al Imperio Romano y otras civilizaciones que se bañaban a orillas del mar Mediterráneo.[2]



*Figura 1. Cobre nativo [9]*

El objeto de cobre más antiguo conocido hasta el momento es un colgante oval procedente de Shanidar (actual Irán), que ha sido datado en el 9500 AC. Sin embargo, esta pieza es un caso aislado, ya que no es hasta 3000 años más tarde cuando las piezas de cobre martilleado en frío comienzan a ser habituales.

Varios siglos después se descubrió que el cobre podía ser extraído de diversos minerales (malaquita, calcopirita, etc.), por medio de la fusión en hornos especiales, en los que se insuflaba oxígeno (soplando por largos tubos o con fuelles) para superar los 1000° C de temperatura. El objeto de cobre fundido más antiguo que se conoce procede de los Montes Zagros, concretamente de Tal-i-Blis (Irán), y se data en el 4100 AC., junto a él se hallaron hornos de fundición, crisoles e incluso moldes.[2]



Las aleaciones más importantes de cobre son:

- El latón: es una aleación de cobre y zinc, además de otros metales en inferior proporción. El latón tiene un color amarillo brillante, con gran parecido al oro y por esa razón se utiliza preponderantemente en joyería para la fabricación de “bijouterie” y elementos decorativos. El latón es blando, fácil de mecanizar, grabar y fundir. Es altamente resistente al ambiente salino, por lo cual se lo emplea para accesorios en las construcciones de barcos. Existe una gran variedad de aleaciones de latón. Las más comunes contienen 30-45% de zinc, y se aplican en todo tipo de objetos domésticos: tornillos, tuercas, candados, ceniceros y candelabros. [13]

- El bronce: es el resultado de la aleación de cobre y estaño en una proporción variable, aunque ya se incorporan varios metales en los diversos tipos de bronce que existen en la actualidad, como el zinc y el plomo, creando los llamados bronce complejos. Los tipos de bronce más conocidos son: bronce fucustán, bronce fosforoso y bronce de campana. Dependiendo de los porcentajes de estaño, se obtienen bronce de distintas propiedades. Con un bronce de 5-10% de estaño, se genera un producto de máxima dureza, usado en el pasado para la fabricación de espadas y cañones. El bronce que contiene entre el 17-20% de estaño tiene alta calidad de sonido ideal para la elaboración de campanas (llamados “bronce campaniles”: a mayor cantidad de estaño, más tenacidad, pero también menos maleabilidad), y excediendo el 27%, se logra una óptima propiedad de pulido y reflexión, utilizado en la antigüedad para la fabricación de espejos. [13]

En la naturaleza ocupa el puesto 25 entre los elementos más abundantes de la corteza terrestre, se puede encontrar combinado con otros metales como son el oro, plata y plomo y entre sus principales características se puede indicar que el cobre:

- Es un metal de color rojizo, dúctil y maleable.
- Tiene alta resistencia a la corrosión.
- Cuenta con la capacidad de conducir electricidad y calor.
- Tiene alta capacidad de formar aleaciones metálicas.
- Posee propiedades bacterianas. [14]



### 1.1.1 Propiedades físicas

El cobre se encuentra localizado en la tabla periódica en el grupo de los metales de transición como todos los elementos de este grupo presentan buena conducción eléctrica y térmica, puntos de fusión y ebullición elevados y una dureza considerable. [14]

En la tabla 1.1 se muestra las propiedades físicas más significativas del cobre:

*Tabla 1.1 Propiedades físicas del cobre.*

| Propiedades físicas del cobre         |                                       |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Coeficiente de expansión</b>       | 17x10 <sup>-6</sup> m°C <sup>-1</sup> |
| <b>Esfuerzo de tensión (templado)</b> | 100-250 MPa                           |
| <b>Esfuerzo de tensión (recocido)</b> | 260-400 MPa                           |
| <b>Elongación</b>                     | 3-50 %                                |
| <b>Dureza Vickers</b>                 | 44-180 HV                             |
| <b>Tenacidad a la fractura</b>        | 30-90 MPam <sup>1/2</sup>             |
| <b>Masa atómica</b>                   | 63.54 g/mol                           |
| <b>Dureza Mohs</b>                    | 3                                     |
| <b>Densidad</b>                       | 8.96 g/mol                            |
| <b>Punto de fusión</b>                | 1083 °C                               |
| <b>Punto de ebullición</b>            | 2595 °C                               |
| <b>Calor latente de fusión</b>        | 214 x10 <sup>3</sup> J/kg             |
| <b>Calor latente de ebullición</b>    | 5410 x 10 <sup>3</sup> J/kg           |
| <b>Conductividad eléctrica</b>        | 58108 x10 <sup>6</sup> S/m            |
| <b>Resistencia eléctrica</b>          | 0.017 Ohmio/mm <sup>2</sup>           |
| <b>Conductividad térmica</b>          | 400 W/mK                              |
| <b>Contenido de energía</b>           | 56.8-62.8 MJ/Kg                       |
| <b>Huella de CO<sub>2</sub></b>       | 3.52-3.9 Kg/Kg                        |



### 1.1.2 Propiedades químicas

El cobre en su estado nativo es un sólido diamagnético de color rojizo poco reactivo en condiciones normales y con alta resistencia a la corrosión aunque es un poco susceptible a los ácidos oxidantes, forma aleaciones fácilmente. Las principales propiedades químicas se muestran en la tabla 1.2. [14]

*Tabla 1.2 Propiedades químicas del cobre.*

| Propiedades Químicas del cobre        |   |
|---------------------------------------|---|
| <b>Símbolo</b>                        | Cu                                      |
| <b>Numero atómico</b>                 | 29                                      |
| <b>Sistema Periódico</b>              | Grupo 11                                |
| <b>Valencias</b>                      | 1+, 2+                                  |
| <b>Electronegatividad</b>             | 1.29                                    |
| <b>Radio atómico</b>                  | 1.28 Å                                  |
| <b>Radio covalente</b>                | 1.38 Å                                  |
| <b>Radio iónico</b>                   | 0.69 Å                                  |
| <b>Estructura cristalina</b>          | Cúbica centrada en las caras (FCC)      |
| <b>Configuración electrónica</b>      | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$ |
| <b>Primer potencial de ionización</b> | 7.77 eV                                 |



### 1.1.3 Explotación de cobre

En la corteza terrestre, el cobre aparece asociado con los minerales no ferrosos en los llamados yacimientos polimetálicos, cuya constitución más frecuente es la de plomo-zinc-cobre, con porcentajes variables de minerales preciosos como el oro y plata. [17]

En forma general existen dos métodos de explotación minera de cobre en el mundo: el sistema subterráneo (figura 3) y el de tajo abierto (figura 2). La elección del método depende básicamente del tamaño, configuración, profundidad y porcentaje de cobre que contenga el cuerpo mineralizado, lo que determina la factibilidad y el costo de las operaciones. Sin embargo existen otros factores que influyen en la selección del método como: el relieve y clima del lugar, la infraestructura y sobre todo la disponibilidad de capital. [17]



Figura 2. Mina a cielo abierto [15]



Figura 3. Mina subterránea [16]

En la actualidad, el proceso de extracción de minerales a cielo abierto se ha convertido en el método más utilizado en las operaciones mineras de cobre en el mundo. Consiste a *grosso modo* en la barrenación, tumba y acarreo del mineral acumulado en depósitos de baja ley a nivel superficial.



Tal proceso da origen a una sima constituida por un sistema de terrazas concéntricas que se profundizan a medida que se agota el mineral.

Este método demanda el uso de maquinaria de tamaño gigante como son palas mecánicas y camiones de volteo, que extraen el mineral volado con grandes cantidades de explosivo para que, posteriormente sea conducido a las siguientes etapas de trituración, molienda y concentración. [17]

Desde el punto de vista geográfico, este tipo de minería ha producido una transformación radical en los paisajes donde se localizan los depósitos, por ejemplo las minas de Bingham Canyon en Utah, Estados Unidos, de las que se dice son la excavación más grande hecha por el hombre en la superficie terrestre; las minas de



*Figura 4. Mina a cielo abierto Cananea Son, México [18]*

Cananea y Nacozari en el estado de Sonora, México (figura 4), que han consumido cerros enteros; las minas de Chuquicamata y El Teniente en Chile las cuales han alterado profundamente su entorno, y Bougainville en Papua Nueva Guinea, que es la

cuarta mina más grande de cobre en el mundo, a pesar de encontrarse en una de las zonas más inaccesibles del planeta.



### 1.1.3.1 Explotación y Producción de cobre en México

La minería se ha caracterizado históricamente como una actividad que a partir de la existencia de depósitos minerales presentes en un lugar específico, organiza y articula espacios económicos destinados a la realización de la misma. Esta situación se evidencia en diversos lugares de América Latina, en particular México.

La distribución geográfica de los yacimientos cupríferos en México se asocia con los sistemas montañosos como la sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur que constituyen las provincias fisiográficas con mayor abundancia del mineral.

En México los depósitos de cobre se asocian con todo tipo de roca y se alojan en espacios preexistentes, tales como grietas o fracturas. La mayoría de los yacimientos mexicanos conocidos se presentan en estructuras de contacto entre rocas calizas (parte superior) y rocas ígneas (de composición diversa) que se encuentran en las partes inferiores. [17]

De acuerdo con su perspectiva económica, los depósitos cupríferos pueden clasificarse en dos tipos:

- Yacimientos en los que el cobre es el componente principal, asociado con oro, plata, molibdeno y tungsteno, que facilitan la obtención de mayores leyes por volumen de mineral extraído.
- Depósitos constituidos por asociaciones complejas que son muy comunes en la corteza terrestre, con predominio de minerales no-ferrosos (plomo, zinc, plata entre otros) en diferentes proporciones.

El último tipo de depósito demanda una inversión mayor en infraestructura, trabajo y capital para la separación del cobre. Los yacimientos mexicanos en explotación corresponden a este segundo tipo. En la figura 5 se observa la distribución de algunos de los minerales en explotación más importante. En consecuencia, las minas de cobre en México también son importantes productoras de plata, zinc y plomo.





En algunos de los principales depósitos de cobre en México están presentes los tres tipos más ricos de mineral de cobre: bornita, calcocita y calcopirita. Estos se encuentran en Sonora, Zacatecas, Baja California Sur, Aguascalientes y Michoacán (figura 5), dentro de los cuales destacan los sitios mineros de Cananea y Nacozari en el estado de Sonora. [17]

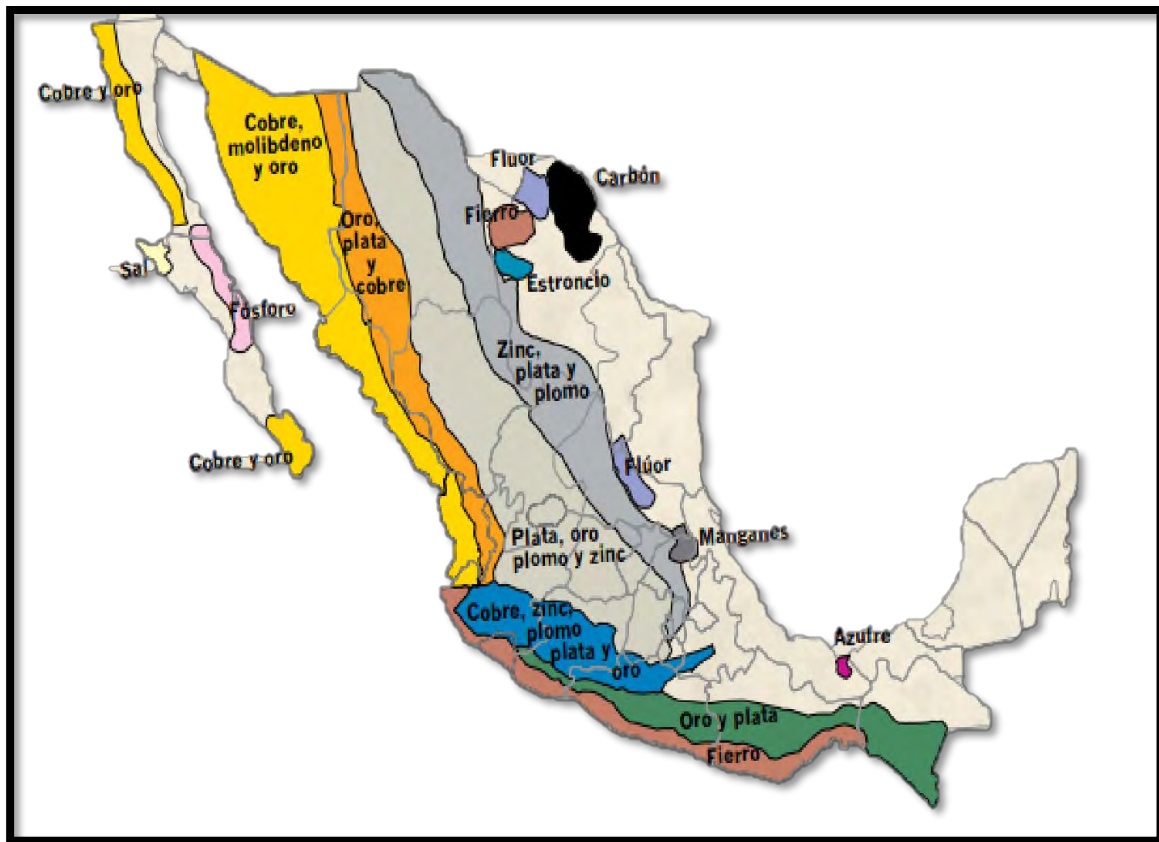


Figura 5. Mapa mineralógico de México [19]

La Minería en México constituye una de las actividades con mayor tradición, practicada desde la época prehispánica, es reconocida en la historia como un factor de avance y desarrollo económico para el país.



Durante el Porfiriato, la actividad minera se llevó a su máximo esplendor, ya que se comenzó a utilizar la energía eléctrica para las labores mineras; En el periodo de la Revolución de 1910, decayó la producción minera, sin embargo se recuperó rápidamente con la llegada de la Constitución de 1917, donde se establecieron los lineamientos jurídicos para la orientación de la minería.

En la segunda mitad del siglo XIX hubo un auge en la minería en la zona norte del país debido al descubrimiento de oro californiano. Gracias a la fiebre del oro hubo un florecimiento del comercio local en la zona norte de México. [20]

Esto no solo ayudo al crecimiento de la industria minera, sino también, las rutas comerciales de diferentes productos se reactivaron y provocó intercambios comerciales hacia a diferentes partes del mundo. Europa entre ellos, quienes exportaban oro e importaban diversos productos al país, como materiales para la vestimenta y manufactura de otras industrias. Durante ese periodo se buscó atraer capital extranjero para rescatar a todos los mineros que ya no contaban con el recurso o herramientas para seguir excavando y explotando sus minas.

En la parte de Sonora hubo una delimitación de territorio, debido a la presencia de los apaches, quienes no permitían que se acercaran a sus territorios, permitiendo solo la exploración de dos terceras partes del territorio sonorense.

En la actualidad México forma parte de la lista de los países con mayor producción minera en el mundo. Entre los estados mineros más importantes (tabla 1.4) y su producción minerometalúrgica (tabla 1.3) del país se encuentran:

- Sonora: La producción de cobre se lleva a cabo básicamente en Sonora con una participación de 79.8%. Cananea propiedad de Grupo México, es la mina de cobre más grande de México y una de las más importantes del mundo con una proyección de 528 mil toneladas anuales para el 2016 en la mina Buenavista del Cobre.



**Tabla 1.3 Producción minerometalúrgica en México**

**PRODUCCIÓN MINEROMETALÚRGICA**  
(Toneladas)<sup>\*/</sup>

| Mineral              | Diciembre |                    | Variación<br>% anual |
|----------------------|-----------|--------------------|----------------------|
|                      | 2013      | 2014 <sup>p/</sup> |                      |
| Cobre                | 26,559    | 38,732             | 45.8                 |
| Yeso                 | 378,312   | 419,805            | 11.0                 |
| Carbón no coquizable | 933,929   | 998,612            | 6.9                  |
| Oro                  | 8,490     | 8,828              | 4.0                  |
| Pellets de fierro    | 668,075   | 663,236            | (-) 0.7              |
| Plata                | 426,302   | 419,467            | (-) 1.6              |
| Fluorita             | 100,676   | 97,251             | (-) 3.4              |
| Plomo                | 16,766    | 16,051             | (-) 4.3              |
| Coque                | 192,771   | 180,188            | (-)6.5               |
| Zinc                 | 43,125    | 37,988             | (-)11.9              |
| Azufre               | 91,477    | 74,571             | (-)18.5              |

<sup>\*/</sup> Excepto el oro y la plata que son kilogramos.

<sup>p/</sup> Cifras preliminares.

Fuente: INEGI.

La caridad, es la mina más grande de México ya que se pueden obtener varios minerales a partir de ella: cobre (120 mil toneladas al año), molibdeno (19500 toneladas al año), oro y plata. Se ubica en el municipio de Nacozari, a unos 200 km de la ciudad de Hermosillo.

Piedras Verdes, se encuentra al sur de Sonora, utiliza minado a cielo abierto, lixiviación de óxidos de cobre, malaquita y chalcocita, extracción por solvente y electro obtención. [21]

- Zacatecas: El estado tienen un total de 2537 concesiones mineras, las principales regiones mineras son:

San Julián, productor de Oro, plata zinc y cobre, siendo el 8.6% su aporte a la producción nacional de cobre. El tipo de yacimiento es relleno de fisura y su principal mina es San Julián.

Concepción del Oro, productor de plata, plomo, zinc, hierro y oro. Los tipos de yacimientos presentes en esta región son vetas, mantos, brechas, chimeneas, reemplazamientos y cuerpos diseminados. Las principales minas son: Peñasquito, Melchor Ocampo, Providencia y el Salvador. [22]



**Tabla 1.4 Principales estados de producción minera en México**

**PRODUCCIÓN MINERA SEGÚN  
PRINCIPALES ESTADOS PRODUCTORES DURANTE DICIEMBRE  
(Toneladas)<sup>v</sup>**

| Mineral/Estado                  | 2013             | 2014 <sup>vi</sup> | Variación<br>% anual |
|---------------------------------|------------------|--------------------|----------------------|
| <b>Oro</b>                      | <b>11,447</b>    | <b>11,410</b>      | <b>(-)0.3</b>        |
| Zacatecas                       | 2,066            | 3,015              | 45.9                 |
| Sonora                          | 3,322            | 2,768              | (-) 16.7             |
| Chihuahua                       | 2,101            | 1,980              | (-) 5.8              |
| Durango                         | 1,354            | 1,278              | (-) 5.6              |
| Guerrero                        | 1,173            | 859                | (-) 26.8             |
| <b>Plata</b>                    | <b>552,076</b>   | <b>546,544</b>     | <b>(-) 1.0</b>       |
| Zacatecas                       | 214,041          | 247,230            | 15.5                 |
| Chihuahua                       | 84,357           | 93,068             | 10.3                 |
| Durango                         | 62,013           | 64,057             | 3.3                  |
| Sonora                          | 90,442           | 32,860             | (-) 63.7             |
| <b>Plomo</b>                    | <b>23,856</b>    | <b>20,299</b>      | <b>(-) 14.9</b>      |
| Zacatecas                       | 13,841           | 10,660             | (-) 23.0             |
| Chihuahua                       | 4,420            | 5,142              | 16.3                 |
| Durango                         | 2,363            | 2,166              | (-)8.3               |
| <b>Cobre</b>                    | <b>43,719</b>    | <b>44,188</b>      | <b>1.1</b>           |
| Sonora                          | 33,420           | 35,276             | 5.6                  |
| Zacatecas                       | 4,612            | 3,781              | (-)18.0              |
| San Luis Potosí                 | 2,108            | 2,168              | 2.8                  |
| <b>Zinc</b>                     | <b>58,700</b>    | <b>54,193</b>      | <b>(-) 7.7</b>       |
| Zacatecas                       | 24,977           | 22,205             | (-) 11.1             |
| Chihuahua                       | 10,642           | 11,711             | 10.0                 |
| Durango                         | 7,859            | 8,781              | 11.7                 |
| Estado de México                | 3,581            | 3,419              | (-)4.5               |
| <b>Coque</b>                    | <b>192,771</b>   | <b>180,188</b>     | <b>(-)6.5</b>        |
| Coahuila de Zaragoza            | 158,236          | 150,085            | (-)5.2               |
| <b>Fierro</b>                   | <b>1,679,178</b> | <b>1,416,125</b>   | <b>(-)15.7</b>       |
| Michoacán de Ocampo             | 685,265          | 419,469            | (-)38.8              |
| Coahuila de Zaragoza            | 282,074          | 312,587            | 10.8                 |
| Colima                          | 235,507          | 212,863            | (-)9.6               |
| <b>Azufre</b>                   | <b>91,477</b>    | <b>74,571</b>      | <b>(-) 18.5</b>      |
| Chiapas                         | 25,101           | 23,594             | (-)6.0               |
| Tabasco                         | 27,244           | 20,765             | (-) 23.8             |
| Veracruz de Ignacio de la Llave | 9,995            | 9,968              | (-) 0.3              |
| Nuevo León                      | 8,594            | 8,073              | (-) 6.1              |
| Tamaulipas                      | 10,325           | 5,071              | (-)50.9              |
| <b>Fluorita</b>                 | <b>100,676</b>   | <b>97,251</b>      | <b>(-) 3.4</b>       |
| San Luis Potosí                 | 94,434           | 93,490             | (-) 1.0              |
| Coahuila de Zaragoza            | 6,202            | 3,721              | (-) 40.0             |

<sup>v</sup>/ Excepto el oro y la plata que son kilogramos.

<sup>vi</sup>/ Cifras preliminares.

Fuente: INEGI.

- San Luis Potosí: los minerales que se extraen son: oro, plata, plomo, zinc, cobre y manganeso, el 4.9% de la producción en México de cobre proviene de este estado.

- Guanajuato: A fines del siglo XVIII, Guanajuato fue el principal productor de plata a nivel mundial. La mina de Valenciana fue la más rica de la ciudad y aún sigue en operación. [17]

- Chihuahua: Desde tiempos de la colonia, el estado de Chihuahua ha sido relevante por su producción de minerales metálicos. Durante su historia minera se han explotado yacimientos mineros importantes como los de Santa Bárbara, Parral, Santa Eulalia, San Francisco del Oro, Naica, La Perla, Piedras Verdes, El Sauzal, Plomosas y Ocampo. Actualmente el estado aporta el 3.5% de la producción de cobre en el país. [17]



### 1.1.3.2 Minerales de cobre

En la naturaleza son muy escasos los metales puros, casi todos se encuentran asociados químicamente con otros elementos formando compuestos conocidos como minerales. En las menas los minerales se encuentran combinados con elementos como azufre, cloro u oxígeno para formar sulfuros, silicatos, cloruros, carbonatos u óxidos. [23]

El cobre por ejemplo se encuentra naturalmente en la corteza terrestre en una variedad de formas. Se puede encontrar en depósitos de sulfuros (como calcopirita, bornita, calcosina, covelita), en depósitos de carbonatos (como la azurita y malaquita), en depósitos de silicatos (como chrysocolla y dioplasa) y en forma “nativa”, algunos de los principales minerales del cobre se observan en la tabla 1.5

Acorde a su origen, se distinguen los minerales primarios y secundarios. Los primarios se formaron como resultado de la intrusión, es decir, de la penetración del magma líquido en fusión, al formarse el cuerpo mineralizado, en las capas superiores de la corteza terrestre. Los minerales secundarios se obtuvieron de los primarios bajo influencia de los procesos lentos de meteorización y lixiviación.

Entre los minerales sulfurados, la calcopirita, la bornita y la calcosina (figura 6), son las que se encuentran con mayor frecuencia en los yacimientos de menas cupríferas.



Figura 6. Minerales sulfurados de cobre



Entre los minerales oxidados los más difundidos son la malaquita, azurita, cuprita y la crisocola (figura 7).



*Figura 7. Minerales oxidados de cobre*

Las menas de cobre sulfuradas se dividen en dos grandes grupos: las ricas en azufre y las pobres en azufre. Las menas cupríferas con gran contenido de azufre tienen como mineral primario la pirita y se llaman menas de piritas de cobre o calcopirita estas menas tienen contenidos de cobre 1.08 - 3.0 %. Las menas pobres en azufre comprenden: las porfíricas y las de estructura estratificada. Las menas de cobre porfíricas se encuentran con un contenido de cobre igual a 0,6 - 1,0%.



**Tabla 1.5 Principales mineral de cobre**

| Mineral            | Formula Química                               | % Cu |
|--------------------|---|------|
| <b>Sulfuros</b>    |   |      |
| <b>Calcopirita</b> | $\text{CuFeS}_2$                              | 34.2 |
| <b>Bomita</b>      | $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$                     | 63.3 |
| <b>Calcocita</b>   | $\text{Cu}_2\text{S}$                         | 79.9 |
| <b>Covelita</b>    | $\text{CuS}$                                  | 66.5 |
| <b>Oxidados</b>    |   |      |
| <b>Malaquita</b>   | $\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$         | 57.5 |
| <b>Azurita</b>     | $2\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$        | 55.3 |
| <b>Crisocola</b>   | $\text{CuOSiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   | 36.2 |
| <b>Atacamita</b>   | $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$           | 59.5 |
| <b>Cuprita</b>     | $\text{Cu}_2\text{O}$                         | 88.8 |
| <b>Tenorita</b>    | $\text{CuO}$                                  | 79.9 |
| <b>Antlerita</b>   | $\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$ | 53.7 |
| <b>Brocantita</b>  | $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ | 56.2 |

De los minerales mostrados en la tabla anterior son de mayor interés los carbonatos, como la malaquita y azurita que presentan una constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) baja de 4.4 y 6 respectivamente, ya que esta propiedad es importante para los procesos de flotación de los que se hablara posteriormente.



### 1.1.3.3 Malaquita



Figura 8. Mineral malaquita [25]

La malaquita es un mineral de carbonato de cobre oxidado de color verde intenso, su nombre procede del vocablo griego que denomina a la malva en alusión a su color verde. En la antigüedad era usada como colorante (verde montano), hoy en día su uso es decorativo como piedra semipreciosa, las variedades anatómicas se utilizan para la fabricación de objetos de decoración y en bisutería. Es el mineral más conocido de los productos de oxidación atmosférica de minerales de cobre y suele

aparecer en forma de pátinas o costras, debido al cobre el color suele ser un verde intenso, y aparece en zonas curvas claras y oscuras. Los cristales de malaquita son prismáticos y la malaquita se encuentra con mayor frecuencia en forma granular o masiva. [26]

La malaquita se forma en las regiones que poseen cobre, es semidura y frágil. El agua de superficie rica en ácido carbónico disuelve el cobre contenido en las rocas y se junta al carbonato de cobre básico y soluble en el agua. El valor de este mineral es siempre elevado ya que el trabajo de extracción suele ser complicado por la escasa dureza del material y su fragilidad.

Generalmente se presenta en forma de cristales prismáticos aciculares dispuestos en agregados radiales (rosetas) que rara vez superan el centímetro; como pátinas o costras sobre otros minerales de cobre; formando masas botrioidales o estalactitas; o bien, pseudomorfizando a los cristales de azurita.





De acuerdo a la tabla 1.5 la malaquita tiene un alto contenido de cobre dentro de los minerales oxidados. La importancia industrial de este mineral se debe a su facilidad en el procesamiento, es usado en los procesos de lixiviación por su “efervescencia” en contacto con ácido sulfúrico, sin embargo se encuentra naturalmente combinado con otros minerales tipo óxido y sulfuro.

#### *1.1.4 Extracción de cobre*

La metalurgia del cobre está en función de la naturaleza del mineral, si es del tipo sulfuro, se utiliza la vía pirometalúrgica en la que se producen ánodos y cátodos. Si se presenta en forma de óxidos, se utiliza la vía hidrometalúrgica a través de la cual se producen directamente cátodos. También existe una nueva vertiente de la hidrometalurgia llamada biohidrometalurgia donde se utilizan bacterias capaces de oxidar los minerales de cobre.

##### *1.1.4.1 Extracción vía pirometalúrgica*

Los procesos pirometalúrgicos del cobre se dividen en varias etapas como lo son:

- Concentración
- Tostación
- Fusión
- Oxidación de la mata o conversión
- Afino

El mineral de sulfuro de cobre en la mina tiene un contenido entre el 0.5 - 2 % de cobre, por lo que hay que concentrarlo mediante flotación, para su posterior fundición, obteniéndose un concentrado de cobre que contiene entre 20 y 30 % de cobre, los otros dos componentes principales son el azufre y el hierro, además de otros metales entre los cuales se encuentran el oro y la plata como positivos y el plomo, arsénico y mercurio como impurezas.



El concentrado de cobre se lleva a la fundición en el horno de fusión, allí se recupera el cobre, eliminando el azufre y el hierro mediante oxidación en estado fundido a una temperatura entre 1200 y 1300 ° C.

En el horno el azufre se convierte en gas  $\text{SO}_2$ , mientras que el cobre y el hierro, conjuntamente con sílice procedente de la arena que se introduce en el horno, permanecen en estado líquido. El cobre líquido se deposita en la parte inferior y se extrae del horno formando parte de un producto que se denomina mata de cobre, con un contenido de entre 50-70% de cobre.

La mata de cobre pasa a la sección de convertidores, para incrementar la riqueza en cobre del producto, donde se le somete a una gran oxidación adicional en un proceso discontinuo "batch", consiguiendo un producto intermedio denominado blister con un contenido en cobre del 99%, gases con  $\text{SO}_2$  que se unen a los gases anteriores del horno y escorias con un contenido del 6% de cobre. El blister pasa al horno de afinado donde incrementa su contenido en cobre hasta el 99,5% y posteriormente a la rueda de moldeo de ánodos, donde se da a los ánodos la forma geométrica, semejante a una camiseta de mangas cortas extendidas "T-shirt", necesaria para su utilización en la refinación.

Los ánodos pasan a la refinación, que es la fase final del proceso de producción de los cátodos con un contenido del 99,9% de cobre. El proceso utilizado es el electro refinado de los ánodos, que consiste en disponer en celdas (balsas) los ánodos que actúan como electrodo positivo, separados por una placa inerte que actúa como electrodo negativo, sumergidos en una disolución de sulfato de cobre denominada electrolito y utilizar una corriente eléctrica de bajo voltaje, que al ser selectiva para el cobre disuelve los ánodos en el electrolito y los iones de cobre resultante se depositan sobre la placa inerte obteniendo los cátodos (figura 9). [27]



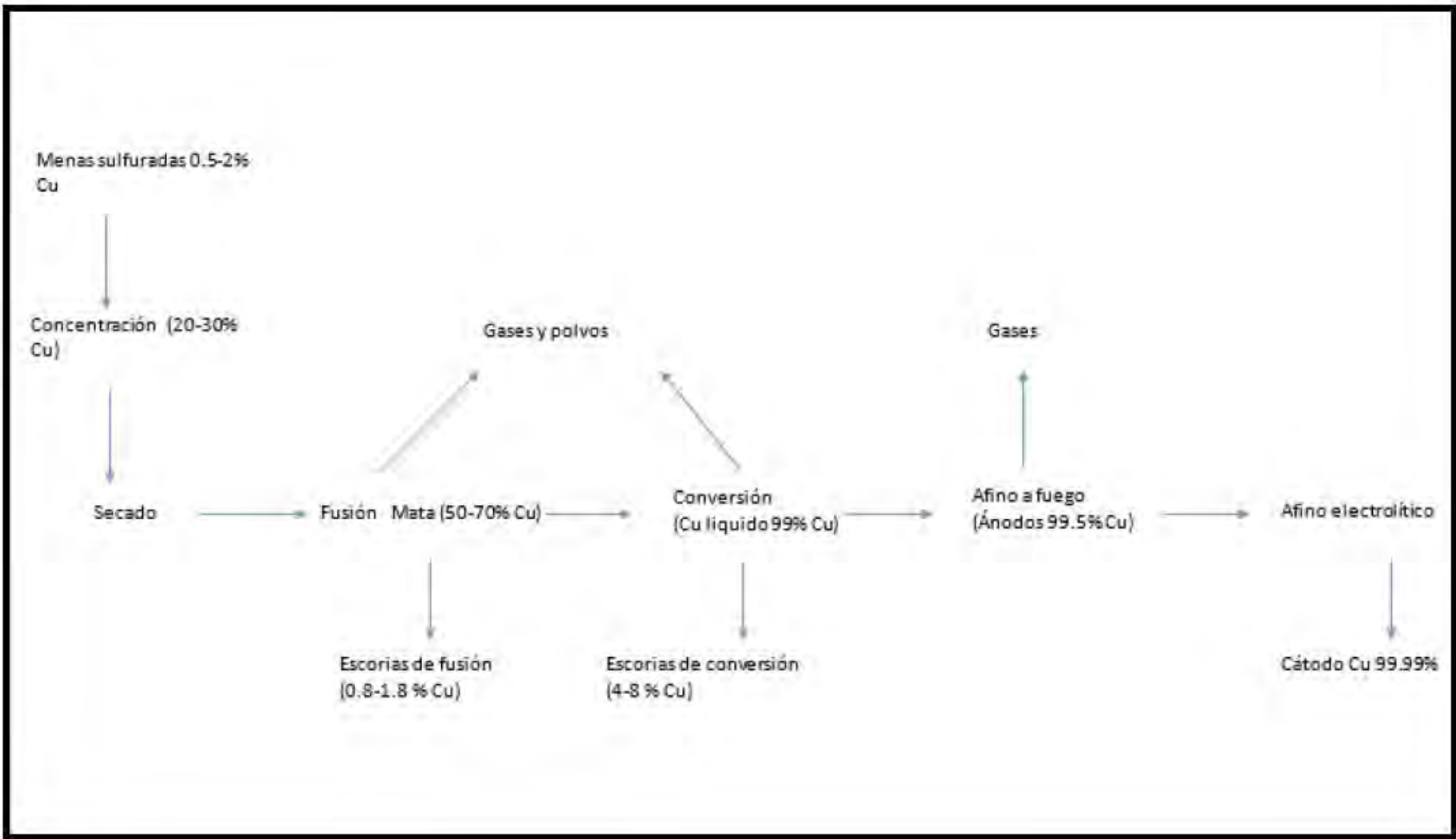


Figura 9. Proceso pirometalúrgico del cobre [27]

#### 1.1.4.2 Extracción vía hidrometalúrgica

La hidrometalurgia del cobre también llamada lixiviación, consiste en la separación del metal o metales beneficiables con un disolvente selectivo. Este proceso se basa en la sensibilidad de los minerales oxidados al ataque de soluciones ácidas.

Los procesos hidrometalúrgicos se emplean para el cobre en el caso de las menas en las cuales predominan minerales oxidados de Cu o mixtos (oxidados y sulfurados) puesto que el coste de obtención del mineral a partir de tales menas aplicando otros métodos es alto.

El mineral de cobre extraído de la mina es transportado a la planta, donde es tratado para extraer el cobre del mineral produciendo cobre catódico de alta calidad. La planta hidrometalúrgica, ajena e integrada a la mina, comprende las instalaciones necesarias para las siguientes etapas básicas del tratamiento del mineral de cobre:

- Trituración y molienda: El mineral procedente de la mina se tritura en seco y, posteriormente pasa a un circuito de molienda húmeda, con molino de bolas, para producir una pulpa de mineral fino, con un tamaño de partícula específico.
- Lixiviación: la pulpa pasa al circuito de lixiviación produciéndose la disolución del cobre contenido en el mineral, pasando el cobre a la solución acuosa. El residuo de lixiviación, que contiene los componentes no lixivados, es filtrado obteniéndose un residuo sólido seco (estériles de tratamiento).
- Extracción por disolventes orgánicos: la solución acuosa con cobre disuelto pasa al circuito de extracción con disolventes, donde, por medio de un agente de extracción selectivo para el cobre, se logra su purificación y concentración.
- Electrodeposición: la solución acuosa con cobre, concentrada y purificada, pasa a las celdas de electrodeposición, en donde el cobre se deposita sobre los cátodos de acero inoxidable. Los cátodos de cobre de alta pureza (LME Grado "A": 99,9935% Cu) resultantes son desplazados y enviados directamente a la industria de transformación (figura 10). [27]



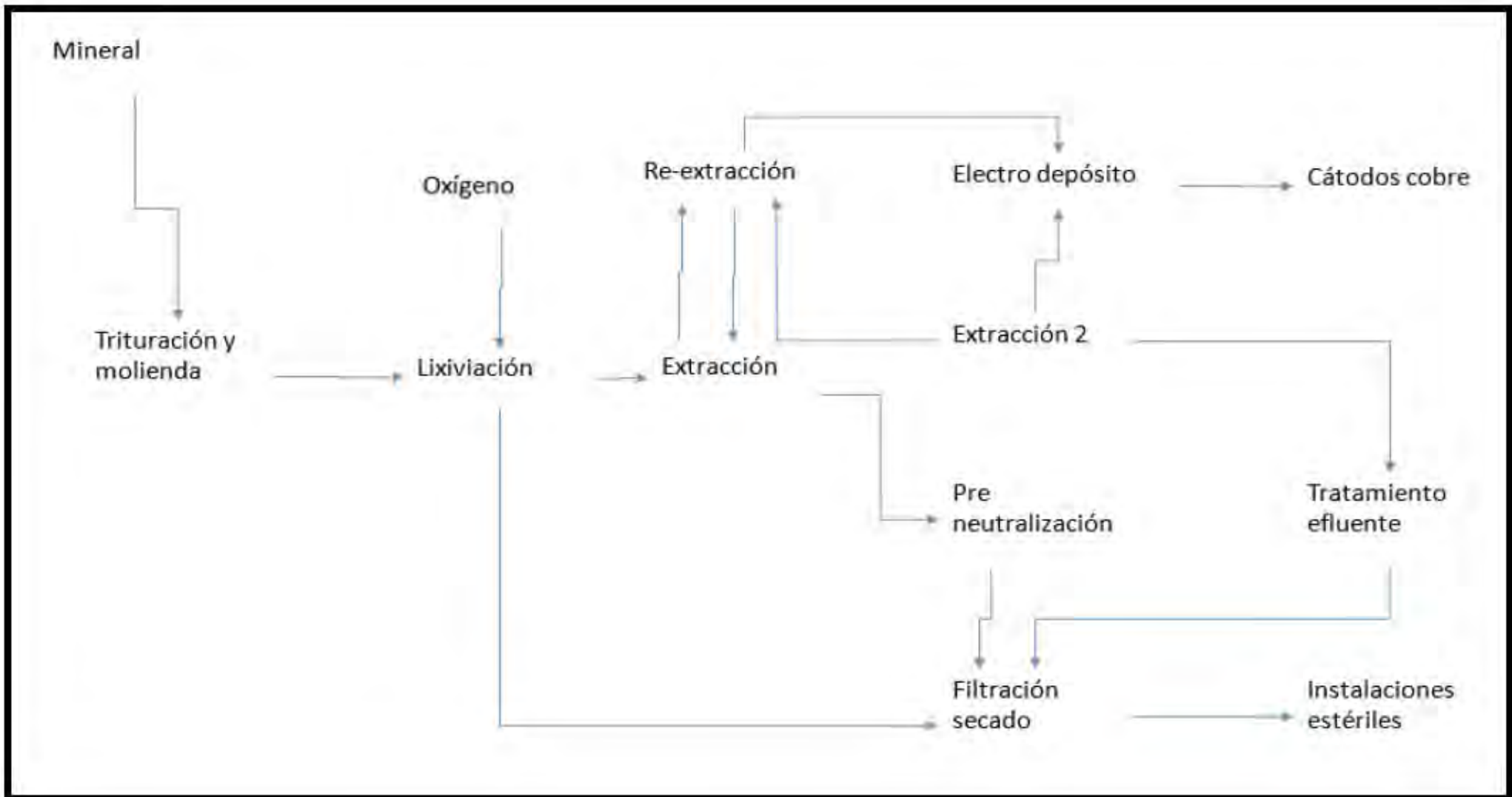


Figura 10. Proceso Hidrometalúrgico del cobre. [27]

## 1.2 SULFURACIÓN

### 1.2.1 Descripción del proceso

En la metalurgia del cobre, los minerales sulfurados han sido extensamente estudiados y se tienen diferentes procesos probados. Sin embargo en las operaciones mineras, a medida que se van explotando los recursos, el tipo de roca va cambiando, presentándose alteraciones mineralógicas, como minerales oxidados superficialmente, generando problemas metalúrgicos.

En flotación de minerales oxidados de cobre como malaquita  $\text{CuO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ , azurita  $2\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ , crisocola  $\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  y cuprita  $\text{Cu}_2\text{O}$ , que tienen una oxidación profunda, el procedimiento más ampliamente usado es la sulfuración de sus superficies, después de este tratamiento, colectores tipo xantatos: amil, isopropil, isobutil, pueden emplearse satisfactoriamente. [3]

El objetivo principal del proceso de sulfuración es convertir la superficie de los minerales oxidados en sulfuros lo cual se logra al adicionar reactivos que aportan iones  $\text{S}^{2-}$  y  $\text{SH}^-$ , para mejorar la recuperación del cobre. El papel de estos iones es modificar completamente la naturaleza físico-química de su estructura superficial, permitiendo la adsorción de colectores en ella, y su posterior flotación. [3]

Las reacciones de sulfuración comúnmente se llevan a cabo en medio alcalino, donde la especie predominante es el ion bisulfuro ( $\text{HS}^-$ ), puesto que en soluciones alcalinas, las superficies de los minerales presentan un alto grado de hidratación. Se usa el sulfhidrato de sodio ( $\text{NaSH}$ ) como un agente para activar las especies alteradas en la flotación de sulfuros de cobre. Existen antecedentes técnicos en la industria donde las condiciones, dosis de adición y los puntos de adición óptimos del sulfhidrato de sodio varían según la especie mineralógica, la roca madre, las alteraciones y la mineralización del mineral a procesar. [4]



Los minerales oxidados de cobre son más difíciles de flotar que sus correspondientes sulfuros, esta dificultad está íntimamente asociada a la gran hidratación de carbonatos, sulfatos y silicatos, lo que a su vez, se debe a la interacción de las moléculas de agua con los sitios polares que se crean en las superficies de estos minerales durante su fractura; como resultado de la adsorción de moléculas de agua en la superficie se forman grupos hidroxilo, siendo la superficie mucho más hidrofílica comparada con la superficie de los sulfuros.

Estas superficies hidrofílicas tienen una gran tendencia a reaccionar con las moléculas de agua y las burbujas de aire no se adhieren a estas superficies. Por otro lado la concentración de grupos hidroxilo en la superficie de minerales oxidados, favorecen el inicio y crecimiento de nuevas capas de moléculas de agua adsorbidas.

Estas capas de agua tienen un efecto significativo en la humectación físico-química de la superficie del sólido y en la naturaleza de la adsorción, creando condiciones desfavorables para la flotación, ya que la adsorción (interface mineral / agua) de colectores para pasar de un estado hidrofílico a hidrofóbico es fundamental para que flote un mineral, en secuencia cambiar las condiciones de esta interface es muy importante y a veces difícil lograrlo en minerales oxidados. [4]

### *1.2.2 Reactivos utilizados en la sulfuración*

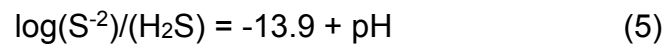
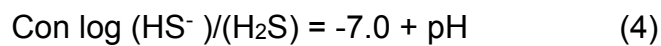
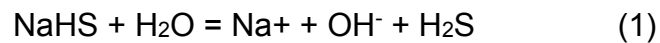
Los reactivos utilizados para la sulfuración de minerales oxidados son:

- Sulfhidrato de Sodio ( $\text{NaHS}$ )
- Sulfuro de Sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ )
- Sulfuro de amoníaco ( $\text{NH}_4)_2\text{S}$ , en un medio reductor.

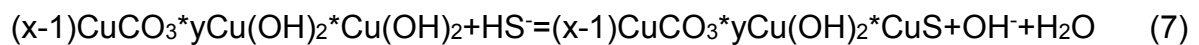
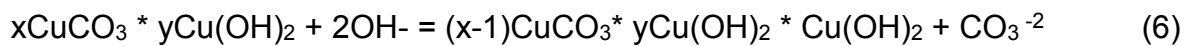


El enmascaramiento de las partículas hace que se comporten como mineral sulfurado, para efectos de ser flotados, utilizando colectores y espumantes habituales para sulfuros de cobre, esto permite tratar con mayor efectividad minerales oxidados de cobre, mediante flotación convencional.

En la práctica industrial se realiza para especies mineralógicas tales como: malaquita, azurita, brochantita, atacamita y cuprita. La adición de NaHS a una pulpa de flotación alcalina conduce a las reacciones siguientes [5]:



Como resultado de la hidrólisis y disociación del NaHS, aparecen los iones  $\text{OH}^-$ ,  $\text{HS}^-$  y  $\text{S}^{2-}$  en la pulpa donde ellos reaccionan con la superficie del mineral, los iones  $\text{HS}^-$  y  $\text{S}^{2-}$  son los más activos. La disociación del  $\text{H}_2\text{S}$  ocurre entre pH 7.0 y 13.9 con una predominante formación de iones  $\text{HS}^-$ . La sulfuración superficial de la malaquita y atacamita puede ser descrita por las siguientes reacciones [5]:





### **1.3 IMPEDANCIA DE ALTA FRECUENCIA**

La técnica de impedancia a alta frecuencia, es una técnica electroquímica no destructiva, mediante la cual es posible obtener información acerca de fenómenos físico químicos superficiales en la interface S-L-G, como es el caso de las pulpas minerales usadas en los procesos de beneficio de minerales.

El termino impedancia es utilizado para relacionar el voltaje y la corriente en un circuito eléctrico cuando éste es perturbado por el paso de corriente eléctrica alterna o bien en forma generalizada.

La impedancia se representa por un número complejo que no varía con respecto al tiempo, para cada valor de frecuencia corresponde un ángulo de fase y un valor absoluto de impedancia, con los cuales se determina el vector impedancia en coordenadas polares. [6]

#### *1.3.1 Descripción de la técnica electroquímica*

La técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés), es un método electroquímico el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna que es aplicada al material de estudio y se determina la respuesta correspondiente.

Se aplica una señal de potencial (E) a un electrodo y se mide la respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. Es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial-tiempo y corriente- tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondiente a cada frecuencia estudiada.



Haciendo analogía con la ley de Ohm

$$Z = dE/dI$$

Se define como la diferencia de voltaje con respecto a la diferencia de corriente y se mide en unidades de resistencia (ohm).

La impedancia se representa con un número complejo, el cual consta de una parte real ( $Z_r$ ) resistencia (R), y una parte imaginaria ( $Z_i$ ) reactancia (X) ambos determinan el vector de impedancia.

$$Z = R + jX$$

En donde la resistencia es la oposición que tiene el sistema al paso de voltaje, y la reactancia representa un ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente de respuesta. [6]

### *1.3.2 Circuitos equivalentes y de capacitancia*

Existen dos formas de interpretar la impedancia, la primera es con circuitos equivalentes, y la segunda es por medio de ecuaciones diferenciales; en los circuitos equivalentes se construye un circuito que ajuste su respuesta con la impedancia obtenida en el experimento, por medio de elementos eléctricos como son condensadores, resistencias, e inductancias.

En los valores de impedancia, la reactancia (X) (oposición al paso de corriente alterna) puede tener signo positivo o negativo, y en cada caso particular el sistema se puede relacionar con un circuito inductor o un circuito capacitor respectivamente, esto ayuda a identificar qué tipo de circuito equivalente usar.



Los circuitos equivalentes intentan representar con elementos eléctricos los fenómenos que suceden en el proceso por ejemplo:

- La resistencia reduce o regula el paso de corriente eléctrica, representa un obstáculo dentro del sistema por lo cual cualquier elemento dentro del sistema que reduzca o regule el flujo del componente estudiado se puede representar con una resistencia.
- El condensador o capacitor es un elemento eléctrico que acumula carga, por lo que en un sistema todo aquel mecanismo que acumule el componente estudiado se representa en un circuito equivalente con esta unidad.

Los capacitores son los elementos más utilizados en los circuitos eléctricos, constan de dos placas paralelas separadas por un dieléctrico (este puede ser vacío o aire). Se emplean para bloquear una corriente alterna, en combinación con resistores e inductores suavizan o filtran una corriente continua.

Cuando las placas de un capacitor entran en contacto con una fuente de voltaje los electrones de la terminal positiva se mueven hacia la fuente de poder, lo que provoca que la placa quede cargada positivamente, por su parte la terminal negativa de la fuente mueve un número igual de electrones hacia la otra placa dejando esta placa cargada negativamente, esta carga sigue hasta que se alcanza el equilibrio con la fuente, es decir hasta que las placas tengan el mismo voltaje que la fuente.

Cuando un capacitor está completamente cargado existe un campo electrostático entre las placas; si la fuente es retirada y el circuito es cerrado comenzara un flujo de electrones en sentido contrario de la placa negativa a la positiva, cuando el voltaje de las placas disminuye a cero el capacitor se descarga completamente.



Los capacitores permiten el flujo de corriente alterna, pero tienen una resistencia a ella, esta resistencia se denomina reactancia capacitiva ( $X_c$ ) y se denomina como:

$$X_c = \frac{1}{2(\pi f C)}$$

En donde

f=frecuencia (Hz)

C=capacitancia

Esta relación de la reactancia es importante ya que relaciona la capacitancia con la frecuencia a la que funciona un circuito. [6]

### *1.3.3 Dielectricidad*

Se denominan dieléctricos a aquellos materiales generalmente no metálicos, con una alta resistividad, es decir que son malos conductores de electricidad, por lo cual pueden ser utilizados como aislantes.

Por definición los cuerpos que mantienen ligados los electrones a sus átomos son aislantes, sin embargo por encima del cero absoluto en todos los materiales existen electrones libres por lo que se habla de buenos o malos conductores, así como buenos o malos aislantes.

Los dieléctricos pueden ser polarizados, esto hace que el dieléctrico tenga un campo eléctrico, existen dos tipos de dieléctricos los polares y los no polares en ambos casos la perturbación de un campo eléctrico orienta las moléculas en dirección de este. [8]



### 1.3.4 Constante dieléctrica

La permitividad también llamada constante dieléctrica es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. La permitividad está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa forma anular parcialmente el campo interno del material. Está directamente relacionada con la susceptibilidad eléctrica. Por ejemplo, en un condensador una alta permitividad hace que la misma cantidad de carga eléctrica se almacene con un campo eléctrico menor y, por ende, a un potencial menor, llevando a una mayor capacitancia del mismo.

En electromagnetismo se define un campo de desplazamiento eléctrico **D**, que representa cómo un campo eléctrico **E** influirá la organización de las cargas eléctricas en el medio, por ejemplo, redistribución de cargas y reorientación de dipolos eléctricos.

La relación de ambos campos (para medios lineales) con la permitividad es

$$D = \varepsilon \cdot E$$

Donde  $\varepsilon$  es un escalar si el medio es isótropo o una matriz de 3 por 3 en otros casos.

La permitividad, tomada en función de la frecuencia, puede tomar valores reales o complejos. Generalmente no es una constante ya que puede variar con la posición en el medio, la frecuencia del campo aplicado, la humedad o la temperatura, entre otros parámetros. En un medio no lineal, la permitividad puede depender de la magnitud del campo eléctrico.

La unidad de medida en el Sistema Internacional es el faradio por metro (F/m). El campo de desplazamiento **D** se mide en culombios por metro cuadrado (C/m<sup>2</sup>), mientras que el campo eléctrico **E** se mide en voltios por metro (V/m).

**D** y **E** representan el mismo fenómeno, la interacción entre objetos cargados. **D** está relacionado con las densidades de carga asociada a esta interacción. **E** se relaciona con las fuerzas y diferencias de potencial involucradas. [8]



La permitividad de un material se da normalmente en relación a la del vacío, denominándose permitividad relativa  $\epsilon_r$  la permitividad absoluta se calcula multiplicando la permitividad relativa por la del vacío:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 = (1 + X_e) \epsilon_0$$

Donde  $X_e$  es la susceptibilidad eléctrica del material. [8]

## **1.4 FLOTACIÓN Y CELDA HALLIMOND**

### *1.4.1 Proceso de flotación*

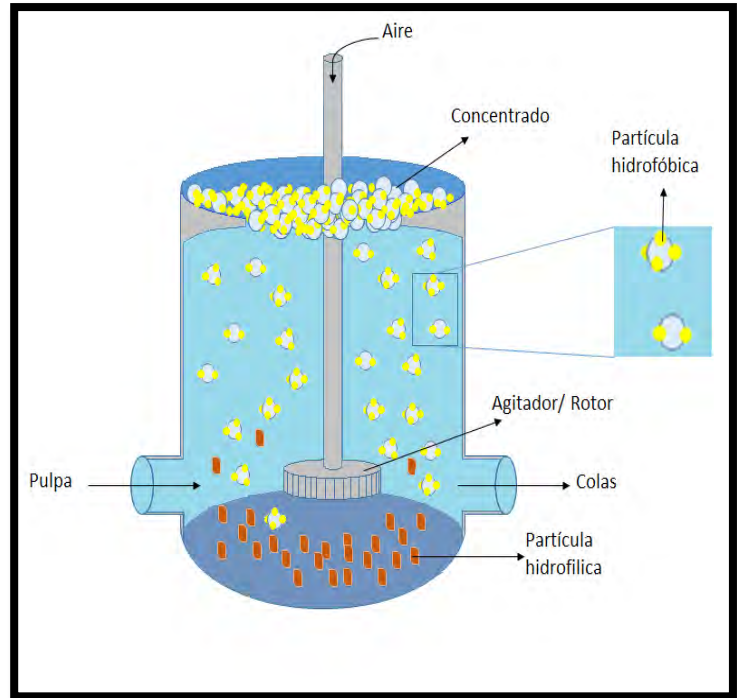
Se define flotación al proceso selectivo de separación de minerales complejos en el cual se busca apartar partículas útiles de estériles mediante un tratamiento físico-químico que modifica su tensión superficial. Es el método de procesamiento de minerales más eficaz y con mayores aplicaciones de todos los existentes, aunque en muchos aspectos, es el más complejo de ellos (Figura 11).

La separación de las especies a través del proceso de flotación, se produce gracias a la diferencia en las propiedades fisicoquímicas de la superficie de cada una de ellas.

Este proceso se basa en las propiedades hidrofóbicas de los materiales sólidos a separar ya que éstas determinan la flotabilidad natural de los minerales.



Durante la flotación se inyecta aire a una pulpa acuosa de mineral y las partículas hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire las cuales ascenderán a la superficie siempre y cuando el conjunto de partículas adheridas a las burbujas de aire tenga una densidad global inferior a la del medio de separación, estas podrán viajar junto con las burbujas hacia la superficie, no obstante se requiere que la burbuja tenga la resistencia suficiente para llegar a la superficie sin romperse.



*Figura 11. Esquema básico proceso de flotación*

Una vez que las burbujas de aire alcanzan la superficie, se requiere que se forme una espuma que mantenga retenida las partículas, porque de lo contrario las burbujas se reventarán y las partículas flotadas viajarán de nuevo hacia el fondo de la celda de separación. [28]

Por el contrario, las partículas no hidrofóbicas que tengan una densidad superior a la del medio en el que ocurre la separación se hundirán.

El proceso de flotación se divide en tres etapas:

- Fase sólida: Está representada por los sólidos a separar (minerales) que tienen generalmente una estructura cristalina. Esta estructura es una consecuencia de la comparación química de las moléculas, iones y átomos componentes que son cada uno, un cuerpo completo. Los factores de importancia en el proceso de flotación, en lo que se refiere a los sólidos, son los siguientes:



- a) Carácter de la superficie aireada en la ruptura del sólido (tipo de superficie, fuerzas residuales de enlaces)
  - b) Imperfecciones en la red cristalina
  - c) Contaminantes provenientes de los sólidos, líquidos y gases.
- Fase líquida: Es el agua debido a su abundancia y bajo precio; y también debido a sus propiedades específicas, constituye un medio ideal para dichas separaciones. La estructura de una molécula de agua investigada por espectroscopia es bastante compleja; aparece que aproximadamente el 46% de los enlaces es covalente y 54% es iónico. Finalmente hay que subrayar la importancia de las impurezas y contaminaciones que tiene toda agua natural o industrial. En primer lugar hay que mencionar la dureza del agua ósea la contaminación natural causada por sales de calcio, magnesio y sodio. Estas sales y otro tipo de contaminaciones no solo pueden cambiar la naturaleza de la flotabilidad de ciertos minerales sino también son casi siempre causa de un considerable consumo de reactivos de flotación con los cuáles a menudo forman sales solubles.
  - Fase gaseosa: Es el aire que se inyecta en la pulpa neumática o mecánicamente para poder formar las burbujas que son los centros sobre los cuales se adhieren las partículas sólidas.

#### *1.4.2 Variables del proceso*

El proceso de flotación, está gobernado por una gran cantidad de variables las cuales interactúan entre sí, y cuyo conocimiento contribuirá a comprender mejor el proceso en sí y obtener finalmente un mejor rendimiento en las aplicaciones prácticas.





Entre las variables que afectan de mayor forma el proceso de flotación se encuentran:

- Granulometría de la mena: Existe la relación tamaño de partícula-recuperación metalúrgica, la cual indica que a menor tamaño de partícula menor recuperación, esto debido a la dificultad de adhesión partícula/burbuja.
- Tipo de reactivo: La elección adecuada de los colectores, espumantes y modificadores, así como el tiempo de acondicionamiento determinara la eficiencia del proceso.
- Porcentaje de sólidos en la pulpa: Se determina desde la etapa de molienda y se considera un factor importante, ya que la flotación de los minerales ocurre de forma eficiente cuando la pulpa presenta un valor adecuado de porcentaje de sólidos.
- Tiempo de residencia: Para la optimización de los circuitos de flotación el tiempo óptimo de cada etapa se determina través de pruebas cinéticas de flotación.
- pH: Es una variable de control muy utilizada, cada mineral requiere de un pH específico para que su flotación sea efectiva.
- Calidad del agua: Es un aspecto importante de analizar debido a la gran cantidad de interacciones que se producen entre las variables del proceso.[29]

#### *1.4.3 Eficiencia del proceso de flotación*

Es importante mencionar que uno de los principales retos en el proceso de concentración es incrementar la eficiencia y tener un control integrado. Esto se logra controlando las diferentes variables que están relacionadas con el proceso.



Los índices de evaluación del proceso de flotación son los siguientes:

- Recuperación metalúrgica ( $R_m$ ): es la razón entre la masa del material útil obtenido en el concentrado y la masa del material útil en la alimentación.
- Recuperación en peso ( $R_p$ ): es la razón entre la masa del concentrado y la masa de la alimentación.
- Razón de concentración ( $R_c$ ): es la razón entre la masa de alimentación ( $F$ ) y la masa de concentrado ( $C$ ): En términos prácticos, se refiere a las toneladas de mineral necesarias para obtener una tonelada de concentrado.
- Razón de enriquecimiento ( $R_e$ ): es la razón entre la ley del componente deseado en el concentrado y la ley del mismo componente en la alimentación:

$$\text{Razón de concentración: } R_c = \frac{F}{C}$$

$$\text{Recuperación metalúrgica: } R_m = \frac{Cc}{Ff} \times 100$$

Haciendo un balance másico se obtiene lo siguiente:

$$F = C + T \text{ (Balance de flujos másicos)}$$

$$Ff = Cc + Tt \text{ (balance de finos)}$$

$$T = F - C$$

$$Ff = Cc + (F - C)t$$

$$Ff = Cc + Ft - Ct$$

$$F(f - t) = C(c - t)$$

$$R_c = \frac{c - t}{f - t}$$

$$R_m = \frac{(f - t)c}{(c - t)f} \times 100$$



Donde F, C y T son los pesos de alimentación, concentrado y relave, respectivamente, mientras que, f, c y t son las leyes del componente útil en la alimentación, concentrado y relave, respectivamente. [29]

#### *1.4.4 Reactivos utilizados en la flotación*

Para lograr un proceso de flotación exitoso es necesario añadir diferentes ingredientes a la pulpa, los cuales se dividen de acuerdo a la función que desempeñan en:

- **Colectores:** Proporcionan características hidrofóbicas a los minerales, en este grupo se encuentran los xantatos que son sales sódicas o potásicas, los cuales tienen gran uso debido a su bajo costo, sus fuertes propiedades colectoras y su alta selectividad. Son apropiados para colección de sulfuros, minerales nativos y minerales oxidados previamente sulfurados.
- **Modificadores de pH:** El pH indica el grado de acidez o de alcalinidad de la pulpa. El pH 7 es neutro correspondiente al agua pura. De 0 a 6 es ácido y de 8 a 14 es alcalino. Cada sulfuro tiene su propio pH de flotación, donde puede flotar mejor. Esta propiedad varía según el mineral y su procedencia.
- **Depresores:** La función específica de los depresores es la de disminuir la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrofílica, o impidiendo la adsorción de colectores que puedan hidrolizarla.
- **Activantes:** Sirven para aumentar la adsorción de los colectores o para fortalecer el enlace entre el colector y la superficie mineral.
- **Espumantes:** Son agentes tensoactivos que se adicionan con objeto de: estabilizar la espuma, disminuir la tensión superficial del agua, mejorar la cinética de la interacción burbuja- partícula disminuir el fenómeno de unión de dos o más burbujas (coalescencia) así mismo permiten la formación de una espuma estable y por lo general son sustancias orgánicas. [29]



#### 1.4.5 Celdas de flotación

El proceso de flotación se lleva a cabo en celdas que poseen mecanismos de agitación y dispositivos de inclusión de aire a la pulpa o al líquido de separación ya que la agitación favorece la separación y suspensión de las partículas, mientras que la inclusión de aire promueve la formación de burbujas.

Las funciones más importantes de las celdas de flotación son:

- Mantener todas las partículas, aún las más gruesas o las más densas, en suspensión dentro de la pulpa. Para conseguir lo anterior, la pulpa debe ser mezclada o sometida a circulación dentro de la celda a altas velocidades, de modo de superar las velocidades de sedimentación de las partículas más gruesas.
- La aireación, que involucra la diseminación de finas burbujas de aire dentro de toda la celda.
- Promover la colisión entre las partículas de mineral y las burbujas de aire, con la finalidad de permitir la adhesión selectiva y el transporte de las partículas de mineral deseado en la columna de espuma.
- Mantener la pulpa en condiciones de quietud, inmediatamente debajo de la columna de espuma. Las celdas se diseñan de modo de prevenir la turbulencia en las cercanías de la espuma, puesto que produce una pérdida de estabilidad de la espuma y baja la recuperación.
- Proveer un eficiente transporte de la pulpa alimentada a la celda y de la salida del concentrado y del relave desde el circuito.
- Proveer un mecanismo de control de la profundidad de la pulpa y la profundidad de la columna de la espuma; la aireación de la celda e idealmente del grado de agitación de la pulpa.



#### 1.4.6 Celda Hallimond

La celda Hallimond es un dispositivo modificado que se utiliza para realizar microflotaciones, el mineral utilizado para trabajar en el dispositivo es una muestra de mineral puro de 1 gramo aproximado, por lo que su uso ha ido en aumento ya que permite realizar el muestreo de diferentes minerales reduciendo la cantidad de materia prima que se utiliza en una celda de flotación completa. [29]

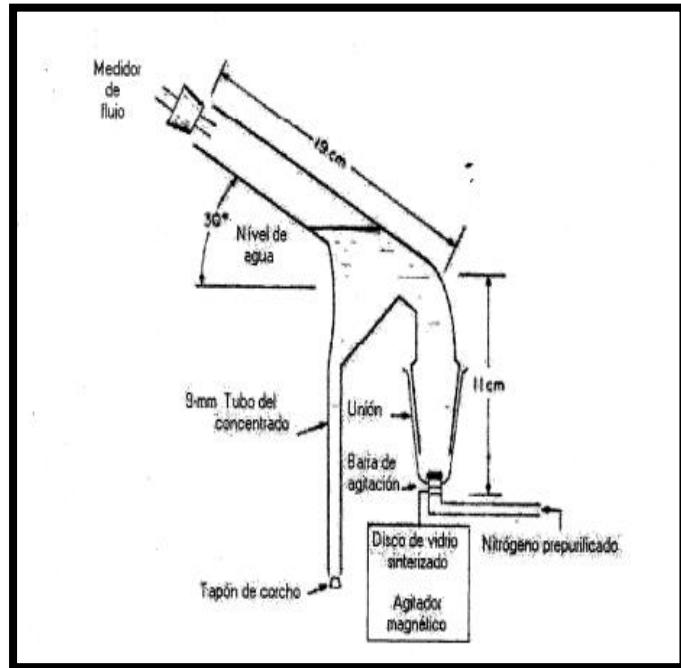


Figura 12. Esquema de la Celda Hallimond [29]

La parte inferior de la celda consiste en una caja de vidrio con un tapón poroso adherido al fondo, con un tamaño de poro uniforme de no menos de 40  $\mu\text{m}$ .

La parte superior de celda es un tubo de vidrio doblado con un ramal vertical justo encima del doblado (figura 12). Un agitador magnético se coloca en el interior de la caja de vidrio para mantener las partículas de mineral en suspensión, dicho agitador debe activarse junto con la válvula que controla el flujo de aire de tal modo que se obtenga una buena suspensión antes de iniciar el flujo de gas o aire.

Normalmente, el acondicionamiento del mineral se realiza fuera del tubo Hallimond, con un agitador magnético por un determinado periodo de tiempo. Al término del acondicionamiento, se mide el pH de la pulpa y se transfiere al tubo y se agrega el espumante en caso de ser necesario.



Las partículas hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire que se elevan a la parte superior de la celda. El producto flotado cae por el ramal vertical o permanece adherido a la parte superior de la celda de donde se recupera fácilmente. [30]

El uso de esta celda puede ser aplicada para experimentos cuantitativos ya que las variables hidrodinámicas importantes como el flujo de aire, la intensidad de agitación y el tiempo de flotación pueden ser controlados con precisión.



## CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 2.1 METODOLOGÍA

En la figura 14 se muestra el procedimiento experimental, el cual consta de dos etapas principales: a) Pruebas de impedancia a alta frecuencia y b) Pruebas de flotación en celda Hallimond.

Previo a estas etapas se efectuó la preparación del mineral de malaquita y los reactivos empleados para la sulfuración y flotación. El mineral fue caracterizado vía Espectroscopia de Absorción Atómica obteniendo un porcentaje de cobre de 47.63%

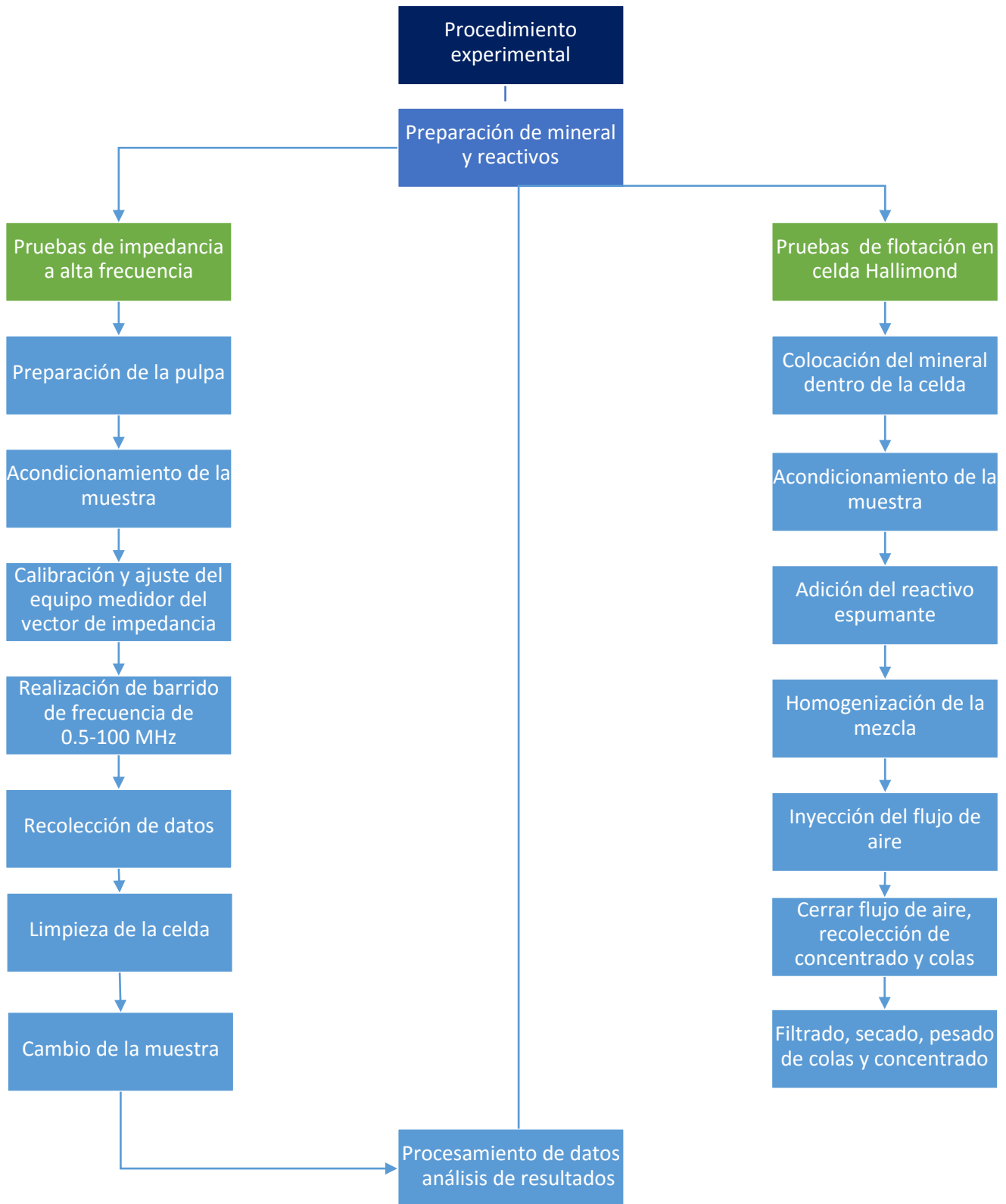
- Preparación del mineral.

El mineral utilizado para la realización de las dos fases experimentales es una muestra de mano de malaquita pura (Figura 13). Esta fue triturada para separar la malaquita de su mineral de ganga, para posteriormente ser molida en un mortero de Agata y cribada a tamaños de partícula menor a 75  $\mu\text{m}$ , siendo esta la materia prima de este trabajo.



*Figura 13. Muestra de mano del mineral de malaquita.*





**Figura 14 Diagrama de flujo del procedimiento experimental**





- Preparación de reactivos

Para la preparación de la solución buffer se utilizó ácido bórico y cloruro de potasio, ya que el intervalo de amortiguación para esta solución abarca desde un pH de 7 hasta un pH de 11. La cantidad de electrolito que se preparó fue de 1 litro.

- Se preparó una solución de ácido bórico 0.4 M con ayuda de una parrilla magnética y un agitador magnético.
- El electrolito fue vertido y aforado en un matraz.
- Se preparó una solución de cloruro de potasio 0.4 M.
- Se vertió y aforó en un matraz.
- Ambas soluciones se vertieron en un vaso de precipitado con una relación 1:1 y se mantuvieron en agitación durante 5 min con ayuda de una parrilla magnética y un agitador magnético.
- La solución se reservó para su posterior uso.

Para la sulfuración del mineral de malaquita se utilizó sulfuro de sodio con concentraciones de  $1 \times 10^{-3}$ ,  $1.5 \times 10^{-3}$  y  $2 \times 10^{-3}$  M, se prepararon 100 ml de las soluciones para lo cual:

- Se pesó el sulfuro de sodio necesario para cada concentración.
- El reactivo se disolvió en un vaso de precipitado con solución buffer.
- El electrolito fue vertido en un matraz y aforado con solución buffer.
- Se reservó para su posterior uso.

Con respecto al proceso de flotación en celda Hallimond se manejó como reactivo colector al xantato isopropílico de sodio (XINa), a una concentración de  $1.5 \times 10^{-3}$  M.

- El reactivo fue disuelto en solución buffer con ayuda de una parrilla magnética y un agitador magnético.
- La solución se vertió en un matraz y aforó con solución buffer.
- Se reservó para su posterior uso.



## 2.2 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE IMPEDANCIA A ALTA FRECUENCIA

Como se mencionó en el capítulo uno tema 1.3, las pruebas de impedancia a alta frecuencia permiten obtener información sobre el comportamiento de las interfaces sólido-líquido. Los datos relevantes a obtener son la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) y conductividad, el cálculo de estas se presenta en el capítulo 3.

Las condiciones de experimentación para la medición de impedancias se presentan en la tabla 2.1:

*Tabla 2.1 Condiciones de experimentación fase 1*

| pH | Caso 1  | Caso 2                                   | Caso 3  | Caso 4   |
|----|---------|--|---|--|
| 7  | Mineral | Mineral + XINa<br>$1.5 \times 10^{-3}$ M | Mineral +<br>$\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$<br><br>$1 \times 10^{-3}$ ,<br>$1.5 \times 10^{-3}$ , $2 \times 10^{-3}$ M | Mineral + XINa<br>$1.5 \times 10^{-3}$ M +<br>$\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$<br><br>$1 \times 10^{-3}$ ,<br>$1.5 \times 10^{-3}$ , $2 \times 10^{-3}$ M |
| 8  |         |  |   |  |
| 9  |         |  |   |  |
| 10 |         |  |   |  |

Una vez establecidas las condiciones experimentales se procedió a realizar la experimentación:

- i. Se pesaron las cantidades necesarias de reactivos para llevar a cabo las mediciones de impedancia.
- ii. Se pesó 1 gr de malaquita y se colocó en un vaso de precipitado con 5 ml de solución buffer para llevar a cabo su acondicionamiento (figura 15), el cual consto de 5 minutos de agitación magnética, la adición de los reactivos de acuerdo a la tabla 2.1 y el ajuste de pH.



- iii. Una vez acondicionado el mineral se colocó en la celda medición de impedancia (figura 16) y se realizaron barridos de frecuencias de 0.5 a 100 MHz.



*Figura 15. Acondicionamiento del mineral*



*Figura 16. Izq celda de medición, Der. Equipo de medición del vector de impedancia marca HP modelo HP4193A.*

Se realizaron 32 mediciones de acuerdo a las condiciones observadas en la tabla 2.1 y los datos fueron registrados en un programa elaborado previamente en Excel el cual tuvo como objetivo facilitar el cálculo de la conductividad y constante dieléctrica.

- iv. Una vez terminadas las mediciones se vació el contenido de la celda en un recipiente para su posterior tratamiento y correcto deshecho, finalmente se limpió y seco perfectamente la celda.
- v. El paso anterior se repitió para los diferentes valores de pH así como para la concentración de los reactivos, tabla 2.1.



## 2.3 REALIZACIÓN DE MICROFLOTACIONES EN CELDA HALLIMOND

Las condiciones de experimentación para las microflotaciones en celda Hallimond se presentan en la siguiente tabla:

*Tabla 2.2 Condiciones de experimentación fase 2*

| pH | Caso 1  | Caso 2                                   | Caso 3  | Caso 4   |
|----|---------|--|---|--|
| 7  | Mineral | Mineral + XINa<br>$1.5 \times 10^{-3}$ M | Mineral +<br>$\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$<br>$1 \times 10^{-3}$ , $1.5 \times 10^{-3}$ ,<br>$2 \times 10^{-3}$ M | Mineral + XINa<br>$1.5 \times 10^{-3}$ M +<br>$\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$<br>$1 \times 10^{-3}$ , $1.5 \times 10^{-3}$ ,<br>$2 \times 10^{-3}$ M |
| 8  |         |  |   |  |
| 9  |         |  |   |  |
| 10 |         |  |   |  |

Una vez establecidas las condiciones experimentales el procedimiento realizado se describe a continuación:

- i. Se pesó 1 gr de mineral el cual se colocó en la parte inferior de la celda junto con un agitador magnético, que tiene como función mantener la pulpa en suspensión.
- ii. Una vez colocado el mineral en la celda se le agregaron 100 ml de solución buffer la cual estaba ajustada a los pH requeridos (tabla 2.2) y se agito durante 2 minutos.
- iii. Al minuto 2 se agregó el la cantidad necesaria del colector XINa (tabla 2.2)
- iv. En el minuto 3 se colocó una gota de espumante (Isobutilcarbonil) y se continuó la agitación hasta completar 5 minutos.
- v. Simultáneamente se fijó un flujo de  $180 \text{ mm}^3$  de aire el cual se inyectó al minuto 5. (figura 17)
- vi. La pulpa se dejó flotar durante 2 minutos y al concluir el tiempo se apagó el flujo de aire.



- vii. Se esperó el tiempo necesario para permitir que el mineral flotado cayera por el tubo vertical de la celda Hallimond.(figura 18)
- viii. Por separado se recolecto el mineral flotado y colas para ser filtrado.
- ix. Después de filtrado el mineral fue etiquetado y secado en mufla a 150 °C.
- x. Se pesó el concentrado.
- xi. Finalmente se calculó el porcentaje de recuperación obtenido.



**Figura 17. Inicio de la flotación en la celda Hallimond**



**Figura 18. Final de la flotación en la celda Hallimond**



## CAPÍTULO 3. RESULTADOS

Los resultados se presentan en este apartado a partir de la realización de:

- a) pruebas de impedancia en las cuales se determinó la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) del mineral.
- b) pruebas de flotación en celda Hallimond donde se obtuvo el porcentaje de recuperación de la malaquita.

### 3.1 RESULTADOS A PARTIR DE LAS PRUEBAS DE IMPEDANCIA A ALTA FRECUENCIA

A continuación se presenta la metodología de cálculo para determinar la constante dieléctrica y la conductividad eléctrica del sistema de estudio.

Es importante mencionar que el equipo empleado durante la experimentación cuenta con un par de expresiones que corrigen las resistencias internas del equipo y el ruido interno que se genera durante las pruebas, proporcionando un valor confiable de impedancia real, con base a la resistencia y reactancia. Dichas expresiones son:

Parte real:

$$R_x = \frac{(|Z_0| \cos \theta_m - |Z_m| \cos \theta_0) * |Z_m| * |Z_0|}{(|Z_0| \cos \theta_m - |Z_m| \cos \theta_0)^2 + (|Z_m| \sin \theta_0 - |Z_0| \cos \theta_m)^2} - |Z_s| \cos \theta_s$$

Parte imaginaria:

$$X_x = \frac{(|Z_0| \sin \theta_m - |Z_m| \sin \theta_0) * |Z_m| * |Z_0|}{(|Z_0| \cos \theta_m - |Z_m| \cos \theta_0)^2 + (|Z_m| \sin \theta_0 - |Z_0| \cos \theta_m)^2} - |Z_s| \sin \theta_s$$

Estas ecuaciones son válidas siempre que  $Z_0 \gg Z_s$



Donde  $Z_m$  y  $\theta_m$  Son la magnitud de la impedancia y el ángulo de fase del sistema que se mide respectivamente,  $Z_0$  y  $\theta_0$  es la medida de la impedancia y el ángulo de fase del circuito abierto(aire),  $Z_s$  y  $\theta_s$  son las magnitudes de impedancia y ángulo de fase de un circuito cerrado(mercurio)

Con los componentes reales de impedancia se procede a calcular la magnitud y el ángulo de fase real del vector de impedancia, mediante las siguientes ecuaciones.

$$Z_x = \sqrt{R_x^2 + X_x^2}$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \frac{X_x}{R_x}$$

Las lecturas utilizadas de estos parámetros son:

**Tabla A,1 Valores de impedancia y ángulo de fase obtenidos para circuito abierto y cerrado**

|            | aire       |        | Mercurio   |       |
|------------|------------|--------|------------|-------|
| Frecuencia | $\Theta_0$ | $Z_0$  | $\Theta_s$ | $Z_s$ |
| MHz        |            |        |            |       |
| 0.5        | -90        | 65000  | 10.9       | 0.5   |
| 1          | -90        | 33000  | 14.4       | 0.5   |
| 2          | -89.8      | 16413  | 23.3       | 0.5   |
| 5          | -89.8      | 6593.3 | 44.3       | 07    |
| 10         | -89.8      | 3300   | 62         | 1.1   |
| 20         | -89.5      | 1657.3 | 74         | 2.1   |
| 30         | -89.5      | 1244.1 | 77.5       | 3.05  |
| 40         | -89.6      | 831    | 81         | 4     |
| 50         | -89.6      | 691.3  | 82.2       | 4.95  |
| 60         | -89.6      | 551.7  | 83.4       | 5.9   |
| 70         | -89.6      | 481.5  | 84.1       | 6.9   |
| 80         | -89.6      | 411.3  | 84.9       | 7.9   |
| 90         | -89.4      | 368.8  | 85.4       | 8.5   |
| 100        | -89.3      | 236.3  | 86         | 9.1   |



Se calcula resistencia real y capacitancia real con las siguientes ecuaciones

$$R_x = \frac{|Z_x|}{\cos \theta_x} = (\Omega)$$

$$C_x \frac{\sin \theta_x}{\omega |Z|} * 1 \times 10^{-12} = (pF)$$

Donde  $R_x$  resistencia real,  $C_x$  capacitancia real,  $Z_x$  magnitud de impedancia real,  $\theta_x$  ángulo de fase real,  $\omega$  frecuencia angular.

Una vez determinada la resistencia y la capacitancia real se determina la permitividad compleja ( $\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon''$  donde  $\epsilon'$  es la constante dieléctrica y  $\epsilon''$  son pérdidas de dielectricidad) las ecuaciones aquí presentadas son obtenidas del trabajo de Gottman en 1984:

$$\text{Constante dieléctrica } \epsilon' = \frac{-C_a + \sqrt{C_a^2 + 4C_a K f^2 C_a}}{2C_a K f^2}$$

$$\text{Pérdidas de dielectricidad } \epsilon'' = \frac{1}{R_x \omega C_a (1 + 2\epsilon' K f^2)}$$

Donde  $C_a$  y  $K$  son constantes de celda

$f$ =Frecuencia

$C_x$ = capacitancia del sistema

$R_x$ = resistencia del sistema

$\omega$ =frecuencia angular





Para el cálculo de la conductividad eléctrica:

$$\sigma = \varepsilon_0 \varepsilon'' \omega = (\Omega^{-1}m^{-1})$$

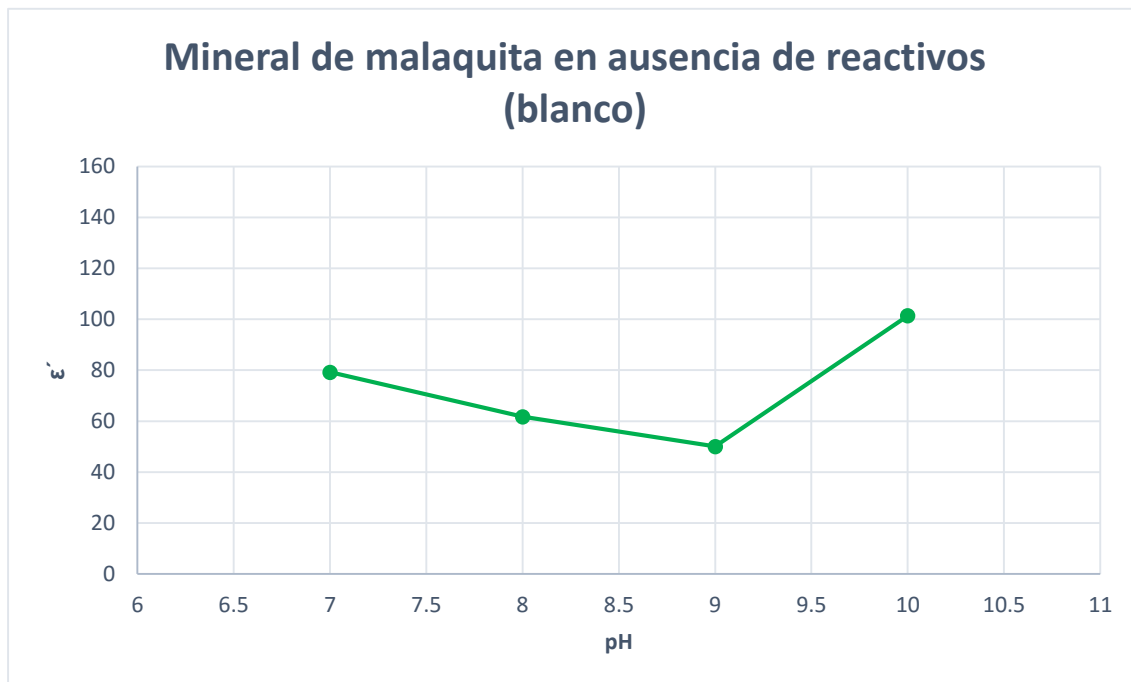
Donde  $\varepsilon_0=8.854187818 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$  constante de permitividad (constante dieléctrica en el vacío)

En las tablas y graficas que se muestran a continuación se presentan los resultados de la constante dieléctrica y conductividad de la malaquita en diferentes condiciones ver tabla 2.1.

**Tabla 3.1 Resultados de impedancia a alta frecuencia del mineral de malaquita en ausencia de reactivos.**

| pH | $\varepsilon'$<br>Constante dieléctrica | Conductividad (S/m) |
|----|---|---------------------|
| 7  | 79.2                                    | 0.02                |
| 8  | 61.7                                    | 1.38                |
| 9  | 50.03                                   | 1.32                |
| 10 | 101.38                                  | 0.08                |





**Figura 15. Gráfica de la constante dieléctrica vs pH del mineral de malaquita en ausencia de reactivos**

**Tabla 3.2 Resultados de impedancia a alta frecuencia del mineral de malaquita en presencia de XINa  $1.5 \times 10^{-3} M$**

| pH | ε'                    |                     |
|----|-----------------------|---------------------|
|    | Constante dieléctrica | Conductividad (S/m) |
| 7  | 81.01                 | 1.22                |
| 8  | 77.62                 | 1.21                |
| 9  | 42.93                 | 0.97                |
| 10 | 55.01                 | 1.07                |



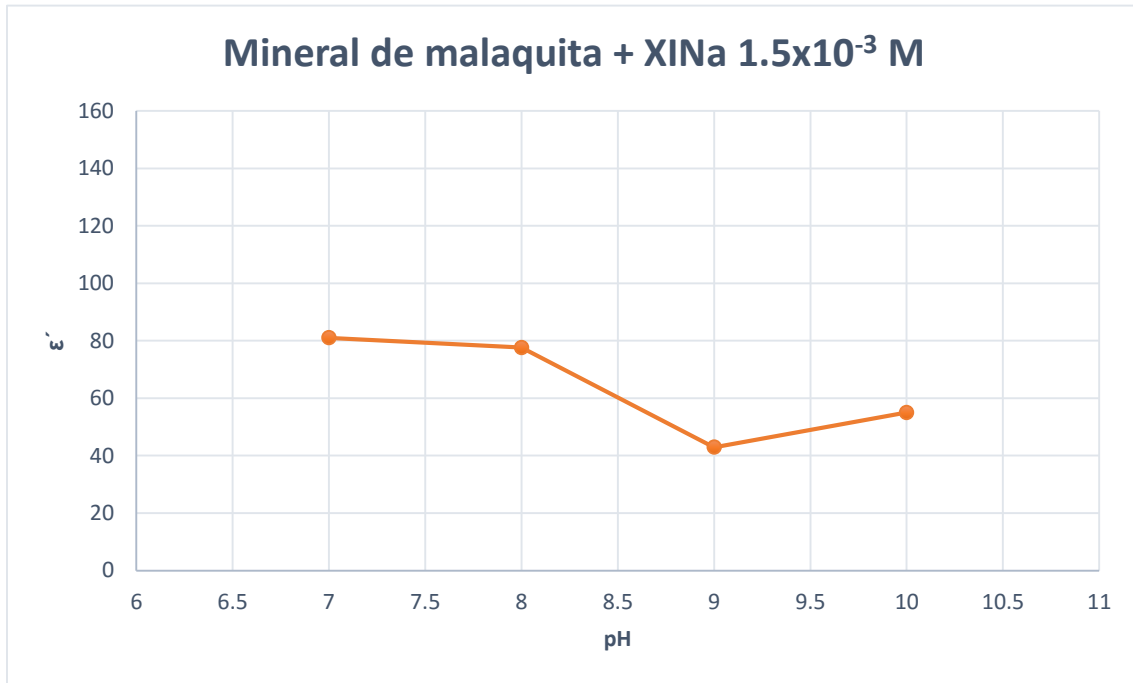


Figura 16. Gráfica de la constante dieléctrica vs pH del mineral de malaquita en presencia de XINa  $1.5 \times 10^{-3}$  M

Tabla 3.3 Resultados de impedancia a alta frecuencia para el mineral de malaquita en presencia de  $\text{Na}_2\text{S}$  a diferentes concentraciones

| pH | $1 \times 10^{-3}$ M $\text{Na}_2\text{S}$ |                     | $1.5 \times 10^{-3}$ M $\text{Na}_2\text{S}$ |                     | $2 \times 10^{-3}$ M $\text{Na}_2\text{S}$ |                     |
|----|--|---------------------|--|---------------------|--|---------------------|
|    | ε' Constante dieléctrica                   | Conductividad (S/m) | ε' Constante dieléctrica                     | Conductividad (S/m) | ε' Constante dieléctrica                   | Conductividad (S/m) |
| 7  | 146.96                                     | 1.48                | 98.17  | 1.37                | 101.09                                     | 1.38                |
| 8  | 52.14                                      | 1.18                | 72.43  | 1.28                | 55.6                                       | 1.19                |
| 9  | 41.13                                      | 1.11                | 75.07  | 1.29                | 69.88                                      | 1.26                |
| 10 | 42.03                                      | 1.11                | 76.16  | 1.29                | 89.93                                      | 1.34                |



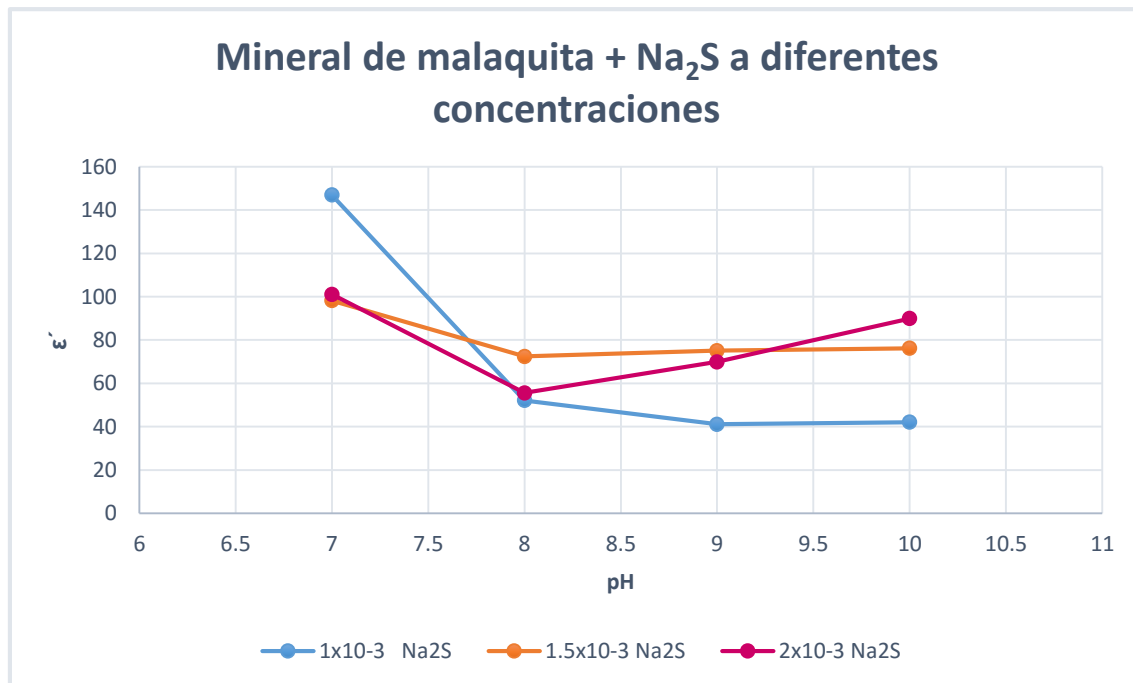


Figura 17. Gráfica de la constante dieléctrica vs pH del mineral de malaquita en presencia de Na<sub>2</sub>S a diferentes concentraciones

Tabla 3.4 Resultados de impedancia a alta frecuencia para el mineral de malaquita en presencia de XINa 1.5X10<sup>-3</sup> M y Na<sub>2</sub>S a diferentes concentraciones

| pH | 1x10 <sup>-3</sup> M Na <sub>2</sub> S |                     | 1.5x10 <sup>-3</sup> M Na <sub>2</sub> S |                     | 2x10 <sup>-3</sup> M Na <sub>2</sub> S |                     |
|----|--|---------------------|--|---------------------|--|---------------------|
|    | ε' Constante dieléctrica               | Conductividad (S/m) | ε' Constante dieléctrica                 | Conductividad (S/m) | ε' Constante dieléctrica               | Conductividad (S/m) |
| 7  | 6.58                                   | 0.57                | 12.29                                    | 0.67                | 2.7                                    | 0.49                |
| 8  | 1.57                                   | 0.46                | 7.47                                     | 0.59                | 2.62                                   | 0.49                |
| 9  | 8.6                                    | 0.61                | 2.48                                     | 0.49                | 0.34                                   | 0.43                |
| 10 | 2.41                                   | 0.48                | 2.79                                     | 0.49                | 10.08                                  | 0.63                |



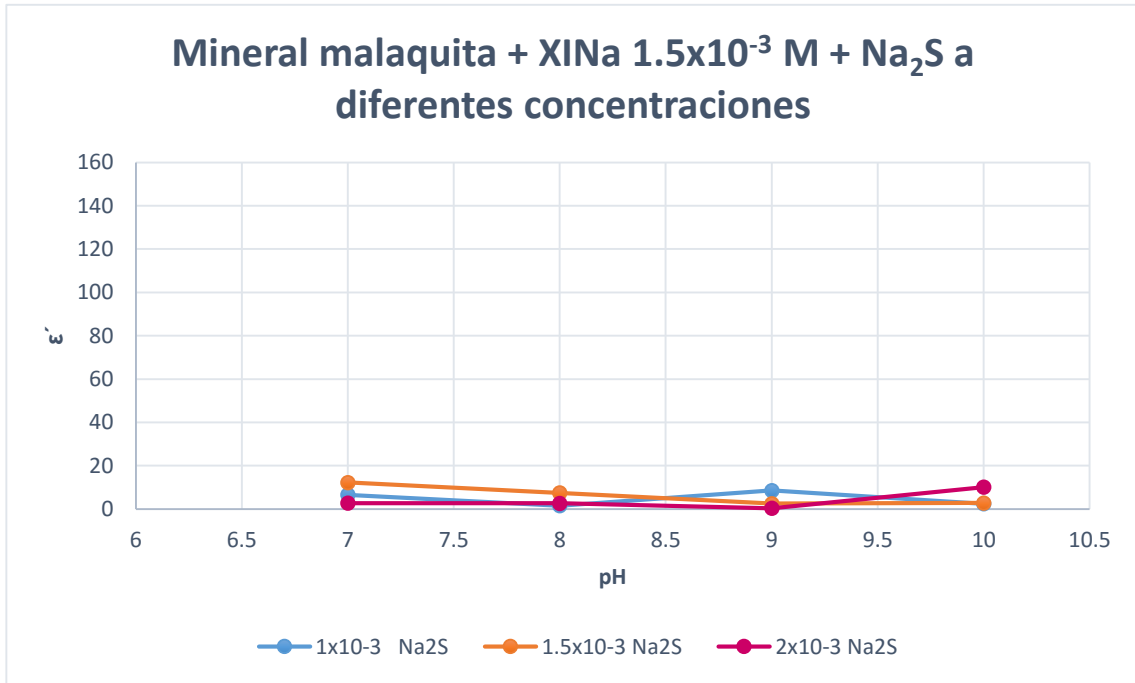


Figura 18. Gráfica de la constante dieléctrica vs pH del mineral de malaquita en presencia de XINa  $1.5 \times 10^{-3}$  M y Na<sub>2</sub>S a diferentes concentraciones

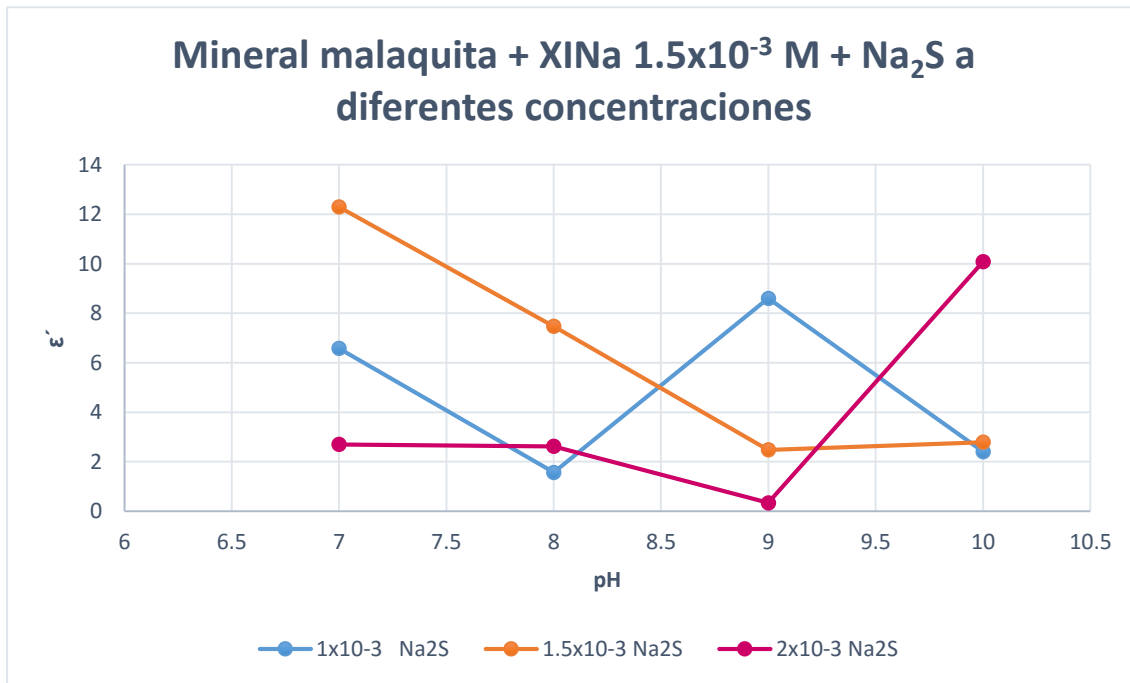


Figura 19. Gráfica de la constante dieléctrica vs pH del mineral de malaquita en presencia de XINa  $1.5 \times 10^{-3}$  M y Na<sub>2</sub>S a diferentes concentraciones (aumentada)

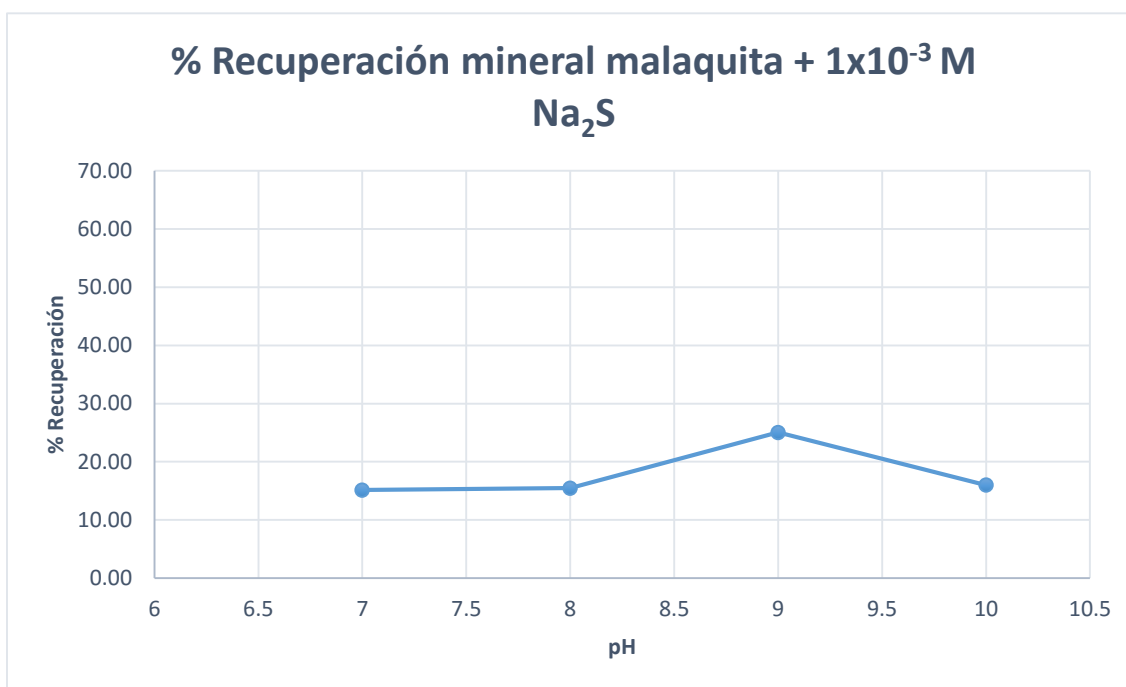


### 3.2 RESULTADOS A PARTIR DE LAS MICROFLOTACIONES EN LA CELDA HALLIMOND

Los resultados obtenidos en las microflotaciones en la celda Hallimond se presentan a continuación:

*Tabla 3.5 Porcentaje de recuperación obtenido del mineral de malaquita en presencia de  $\text{Na}_2\text{S}$   $1 \times 10^{-3}$  M*

| pH | Concentrado (g) | Colas (g) | % Recuperación |
|----|-----------------|-----------|----------------|
| 7  | 0.151           | 0.849     | 15.13          |
| 8  | 0.155           | 0.845     | 15.48          |
| 9  | 0.251           | 0.749     | 25.05          |
| 10 | 0.160           | 0.840     | 16.00          |

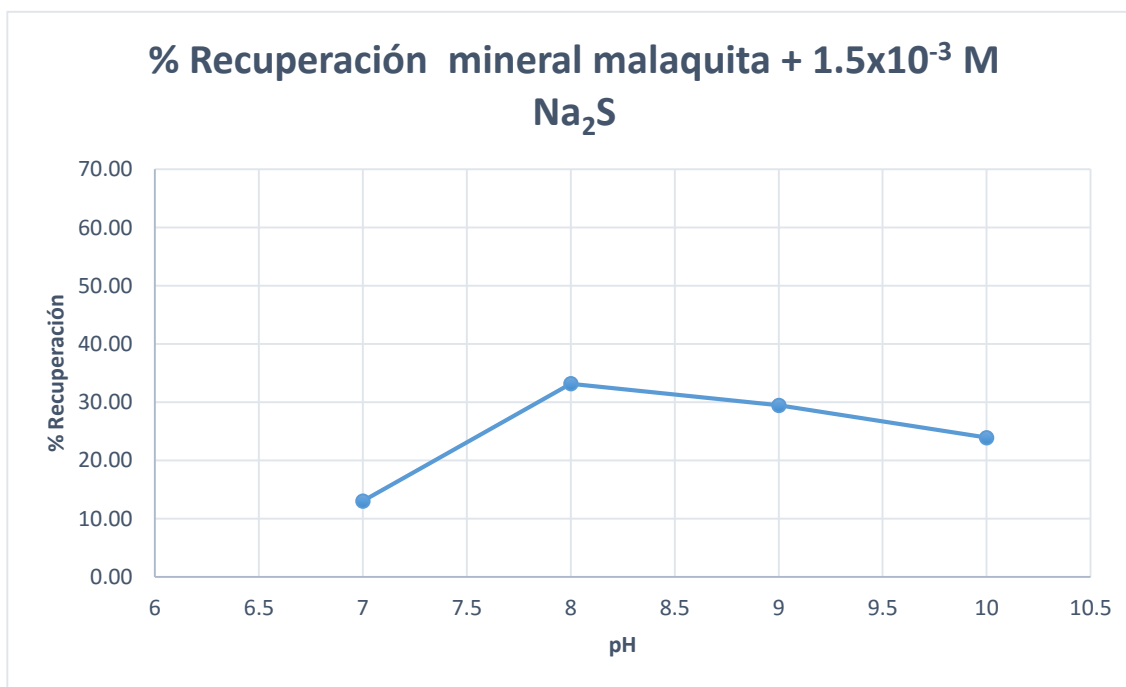


*Figura 20. Gráfica del % de recuperación vs pH del mineral de malaquita en presencia de  $\text{Na}_2\text{S}$   $1 \times 10^{-3}$  M*



**Tabla 3.6 Porcentaje de recuperación obtenido del mineral de malaquita en presencia de  $\text{Na}_2\text{S}$   $1.5 \times 10^{-3} \text{M}$**

| pH | Concentrado (g) | Colas (g) | % Recuperación |
|----|-----------------|-----------|----------------|
| 7  | 0.130           | 0.870     | 13.05          |
| 8  | 0.332           | 0.668     | 33.20          |
| 9  | 0.295           | 0.705     | 29.48          |
| 10 | 0.239           | 0.761     | 23.92          |

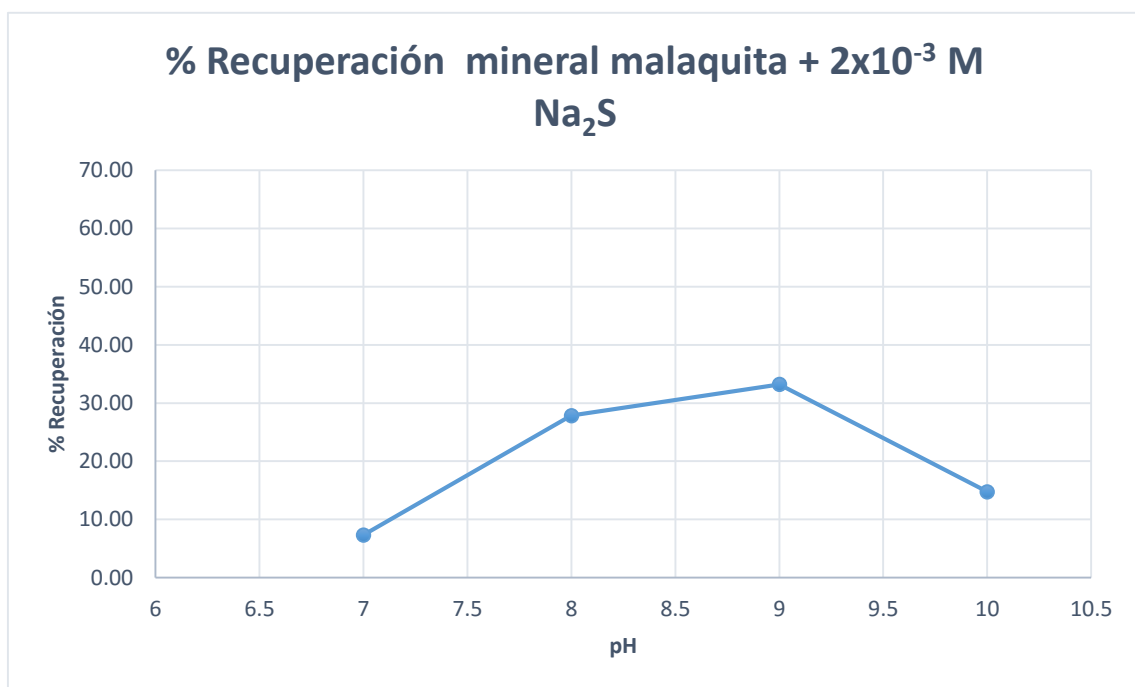


**Figura 21. Gráfica del % recuperación vs pH de mineral de malaquita en presencia de  $\text{Na}_2\text{S}$   $1.5 \times 10^{-3} \text{M}$**



**Tabla 3.7 Porcentaje de recuperación obtenido del mineral de malaquita en presencia de  $\text{Na}_2\text{S}$   $2 \times 10^{-3} \text{M}$**

| pH | Concentrado (g) | Colas (g) | % Recuperación |
|----|-----------------|-----------|----------------|
| 7  | 0.073           | 0.927     | 7.33           |
| 8  | 0.278           | 0.722     | 27.85          |
| 9  | 0.332           | 0.668     | 33.20          |
| 10 | 0.148           | 0.852     | 14.76          |



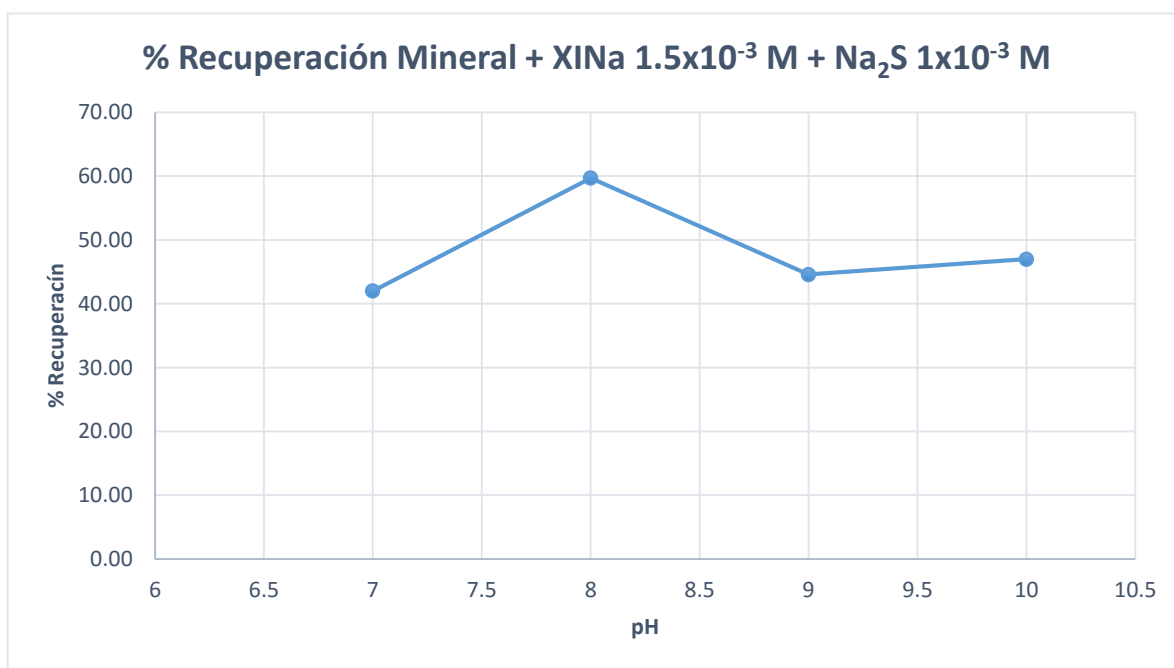
**Figura 22. Gráfica del % recuperación vs pH del mineral de malaquita en presencia de  $\text{Na}_2\text{S}$   $2 \times 10^{-3} \text{M}$**





**Tabla 3.8 Porcentaje de recuperación obtenido del mineral de malaquita en presencia de  $\text{Na}_2\text{S } 1 \times 10^{-3} \text{ M}$  y XINa**

| pH | Concentrados (g) | Colas (g) | % Recuperación |
|----|------------------|-----------|----------------|
| 7  | 0.42             | 0.58      | 42.00          |
| 8  | 0.597            | 0.403     | 59.70          |
| 9  | 0.446            | 0.554     | 44.60          |
| 10 | 0.47             | 0.53      | 47.00          |

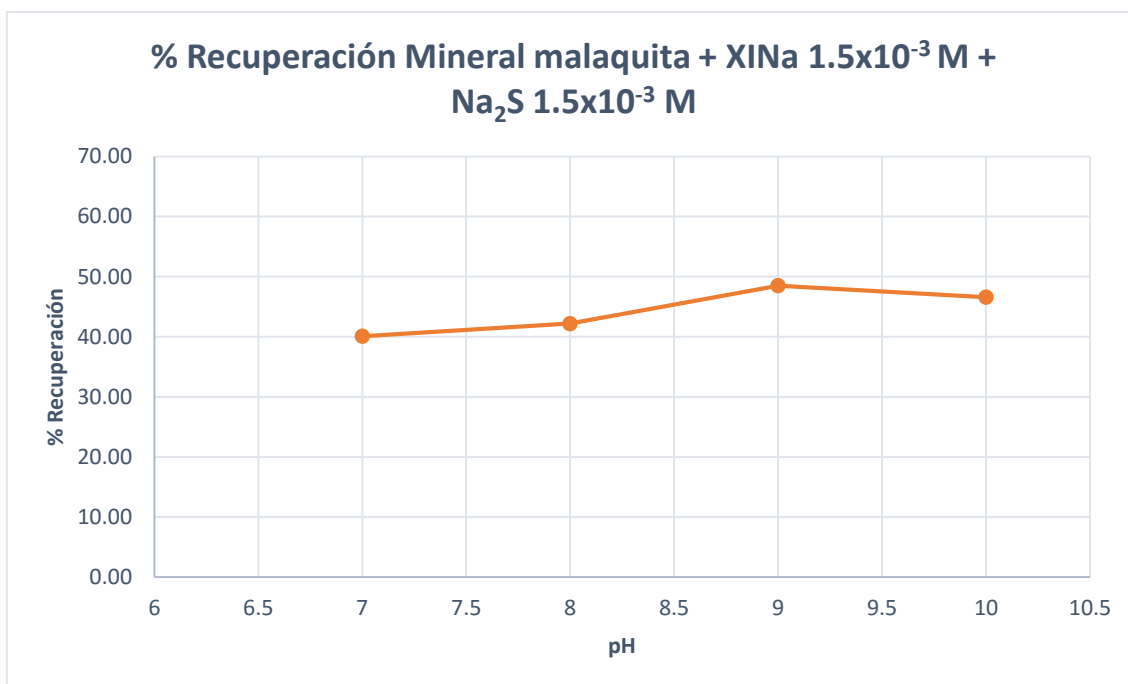


**Figura 23. Gráfica del % recuperación vs pH del mineral de malaquita en presencia de XINa y  $\text{Na}_2\text{S } 1 \times 10^{-3} \text{ M}$**



**Tabla 3.9 Porcentaje de recuperación obtenido del mineral de malaquita en presencia de  $\text{Na}_2\text{S } 1.5 \times 10^{-3} \text{ M} + \text{XINa}$**

| MpH | Concentrados (g) | Colas (g) | % Recuperación |
|-----|------------------|-----------|----------------|
| 7   | 0.401            | 0.599     | 40.10          |
| 8   | 0.422            | 0.578     | 42.20          |
| 9   | 0.485            | 0.515     | 48.50          |
| 10  | 0.466            | 0.534     | 46.60          |

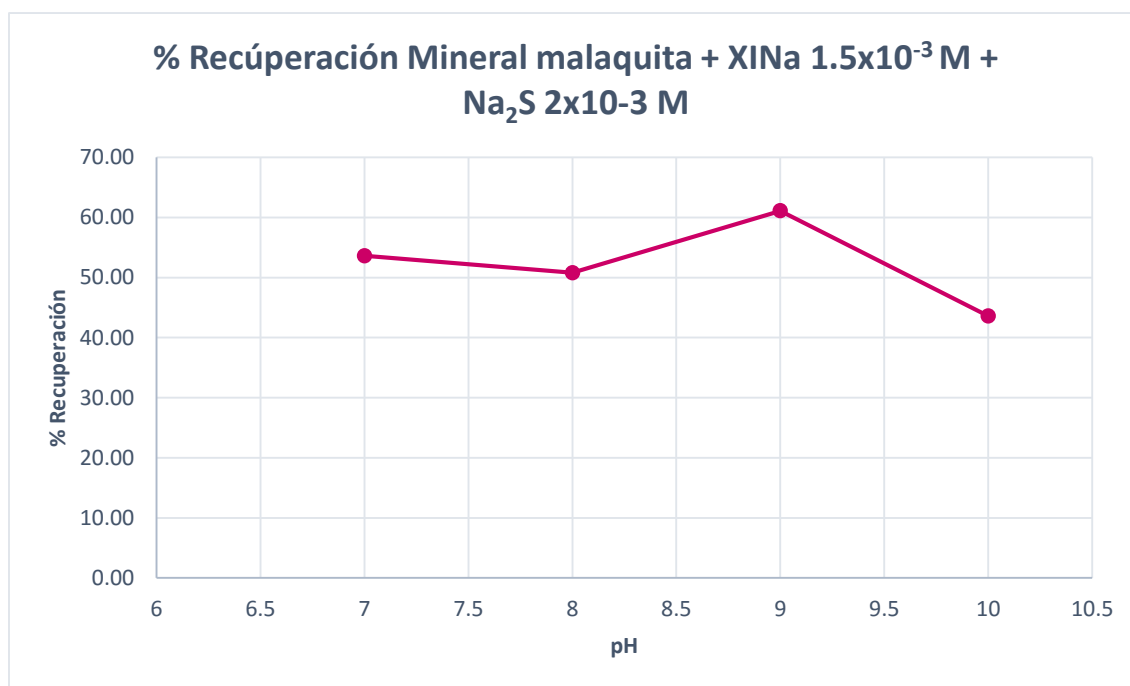


**Figura 24. Gráfica del % recuperación vs pH del mineral de malaquita en presencia de XINa y  $\text{Na}_2\text{S } 1.5 \times 10^{-3} \text{ M}$**



**Tabla 3.10 Porcentaje de recuperación obtenido del mineral en presencia de  $\text{Na}_2\text{S } 2 \times 10^{-3} \text{ M} + \text{XINa}$**

| pH | Concentrados (g) | Colas (g) | % Recuperación |
|----|------------------|-----------|----------------|
| 7  | 0.536            | 0.464     | 53.60          |
| 8  | 0.508            | 0.492     | 50.80          |
| 9  | 0.611            | 0.389     | 61.10          |
| 10 | 0.436            | 0.564     | 43.60          |



**Figura 25. Gráfica del % recuperación vs pH del mineral de malaquita en presencia de XINa y  $\text{Na}_2\text{S } 2 \times 10^{-3} \text{ M}$**

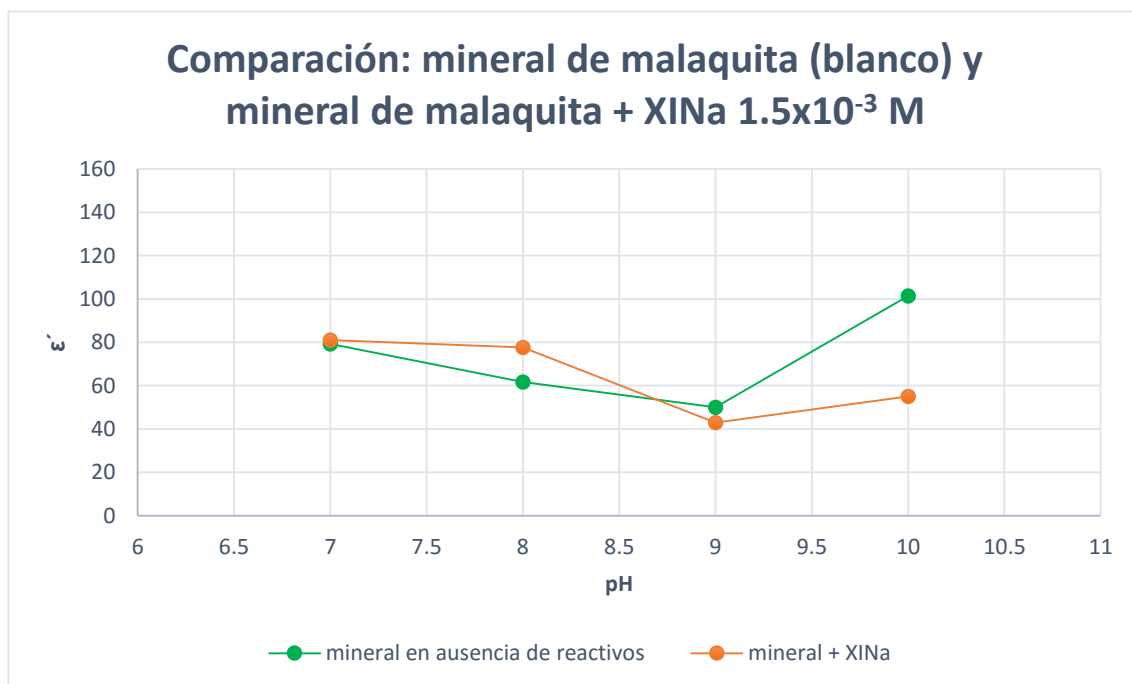


## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Del estudio de impedancia se obtuvo la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) del mineral la cual permite determinar la factibilidad del mineral para ser flotado. Como se puede observar en las tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4, esta constante está íntimamente ligada al proceso de flotación ya que entre menor sea esta, el proceso de flotación será más eficiente.

El carácter ácido o básico de la pulpa es una variable fundamental para la eficiencia del proceso ya que el colector y el agente sulfidizante tienen un efecto mayor en pH básicos, por esta razón se seleccionó un rango de trabajo de 7 a 10.

Para mantener estable este rango de trabajo todas las pruebas se realizaron en una solución buffer de ácido bórico-cloruro de potasio ajustando el pH con cantidades mínimas de hidróxido de sodio.



**Figura 26. Gráfica de constante dieléctrica vs pH comparando el mineral de malaquita en ausencia de reactivos y el mineral de malaquita con XINa  $1.5 \times 10^{-3}$  M**



En la primera parte de la experimentación se hicieron pruebas de impedancia con la pulpa del mineral y con colector XINa a los diferentes valores de pH, obteniendo como resultado valores de constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) relativamente cercanos en comparación con el blanco (mineral en ausencia de reactivos) (ver figura 30). Lo que manifiesta que el colector agregado no modifica la superficie de la malaquita y es un colector adecuado para minerales del tipo sulfuro ya que proporcionan características hidrofóbicas al mineral como se explicó en el capítulo 1 tema 1.4.4.

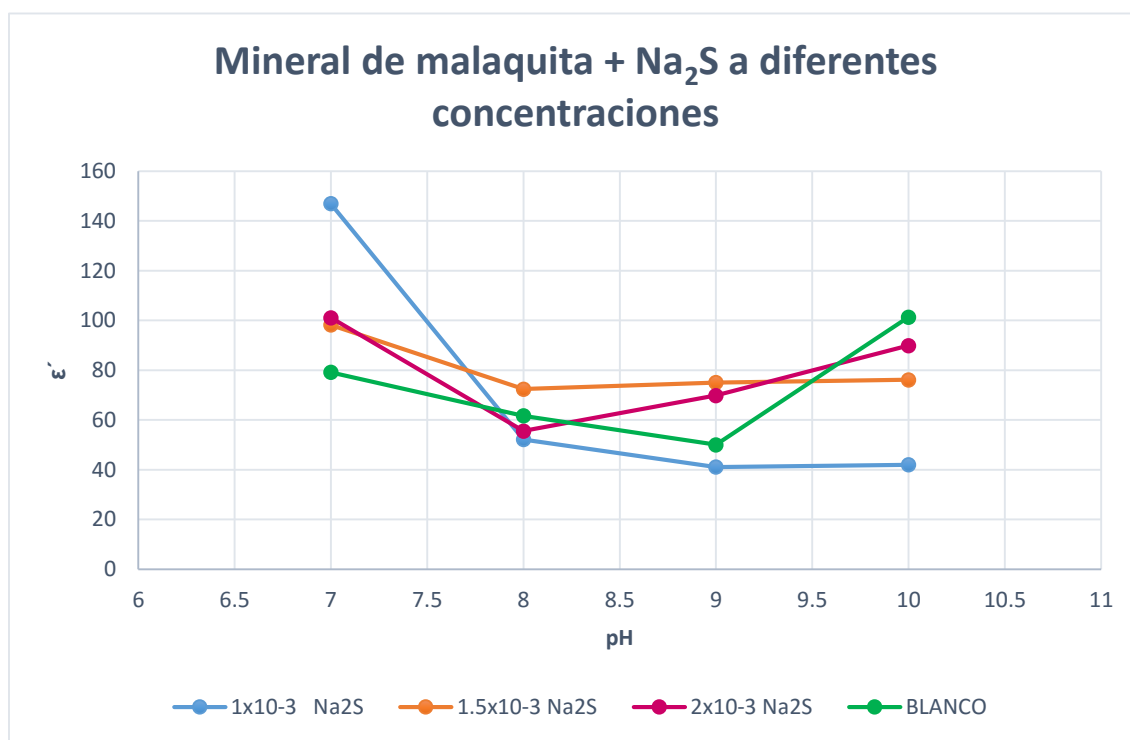


Figura 27. Gráfica de constante dieléctrica vs pH comparando el mineral de malaquita + Na<sub>2</sub>S a diferentes concentraciones y el mineral de malaquita en ausencia de reactivo (blanco)

En la segunda etapa las variables analizadas son el pH y la concentración del agente sulfidizante (figura 31), con respecto a la primera se observaron diversos comportamientos del mineral ya que al comparar los valores obtenidos del mineral en ausencia de reactivos a pH 7 la adición de sulfidizante a las tres concentraciones subieron el valor de la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ). Esto puede deberse a que el Na<sub>2</sub>S a pH bajos tiende a hidrolizarse disminuyendo su efecto y aparentemente invirtiéndolo.



Para el caso del pH 8 se observó una mejora ya que el valor de la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) disminuyó en todas las pruebas con respecto a la constante de pH 7, sin embargo únicamente en las concentraciones de  $1 \times 10^{-3}$  y  $2 \times 10^{-3}$  M este valor se encuentra por debajo del blanco (mineral sin reactivos) lo que indica que en estas condiciones la flotabilidad del mineral es mayor que en ausencia de reactivos.

Para el pH 9 la constante de las concentraciones  $2 \times 10^{-3}$  y  $1.5 \times 10^{-3}$  M se mantienen por encima del blanco por lo que no mejoran su flotabilidad. La única concentración de agente sulfidizante que mejora la flotabilidad es la de  $1 \times 10^{-3}$  M.

Al valor de pH 10 no se mostraron cambios significativos en los valores de la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) respecto a pH 9 y lo que se observa es que a la mayor concentración de sulfidizante el comportamiento dieléctrico del mineral continua ascendiendo, mientras que a concentraciones menores es casi constante, a pesar de este tipo de comportamiento para este pH la flotabilidad de las tres concentraciones es mejor que la del mineral solo. Aunque es importante mencionar que la concentración de  $1 \times 10^{-3}$  M es la que tiene mejores condiciones de flotación.

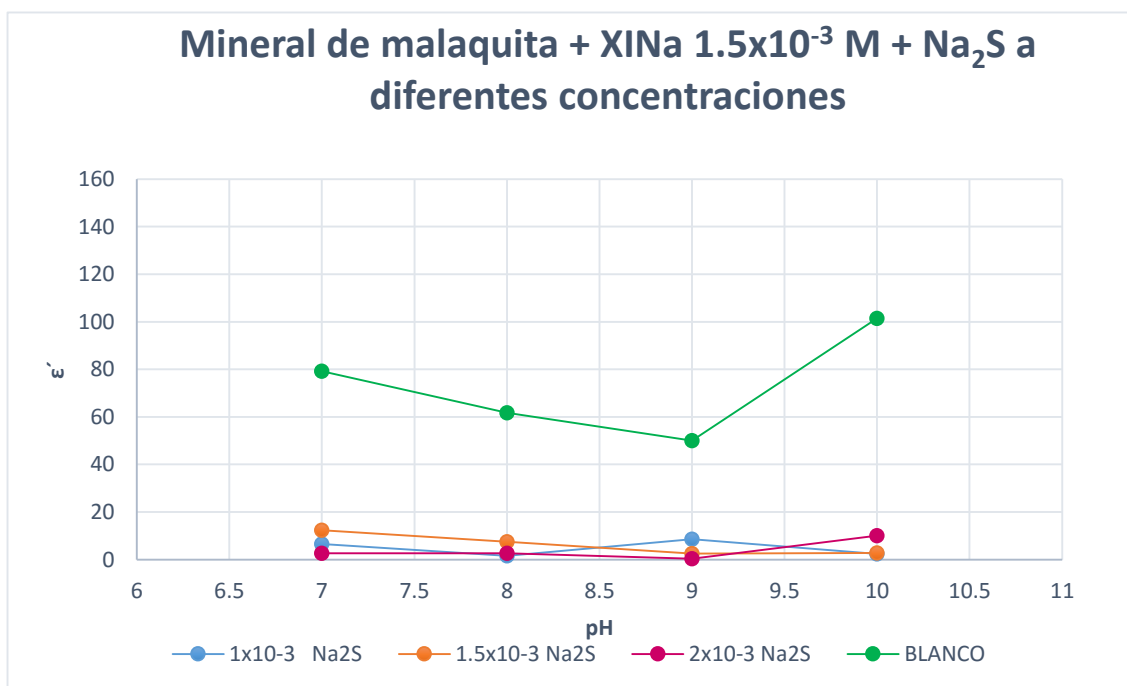


Figura 28. Gráfica de constante dieléctrica vs pH del mineral de malaquita +  $XINa 1.5 \times 10^{-3}$  M + sulfidizante en comparación con el mineral en ausencia de reactivos (blanco)



La tercera etapa de experimentación constó del mismo acondicionamiento de la fase dos (mineral de malaquita + agente sulfidizante) con la adición del colector XINa (xantato isopropilico de sodio) el cual es un proceso actualmente estudiado para ser aplicado en la industria. En estas condiciones el mineral tuvo una respuesta favorable ya que la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) en las tres concentraciones disminuyó considerablemente (ver figura 32), volviendo el proceso de flotación viable.

Para determinar las mejores condiciones para que el mineral flote y se obtenga la mayor recuperación de la malaquita se analizó la figura 23, en la cual se observa que para cada uno de los casos existe un pH donde la flotabilidad es mayor.

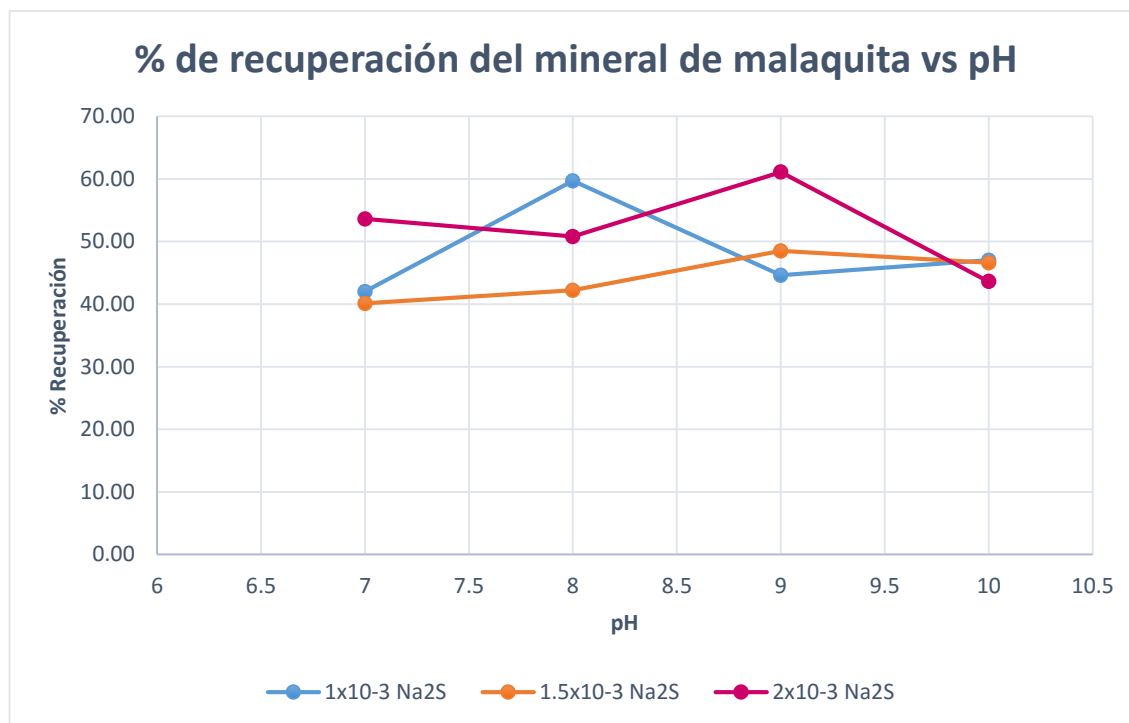
Al observar el comportamiento en la concentración menor del sulfidizante ( $1 \times 10^{-3}$  M) los resultados obtenidos muestran que la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) tiene una tendencia a disminuir su valor hasta el pH 9 y tiene un ligero ascenso en pH 10, por lo tanto el pH adecuado para la flotación es 9.

Para la concentración de sulfidizante  $1.5 \times 10^{-3}$  M se tienen una gráfica del tipo sinusoidal, es decir que el valor de su constante sube y baja alternadamente en cada pH, este comportamiento no sigue la misma tendencia que el caso anterior, lo cual puede deberse a diversos factores que van desde la realización de la prueba como a interacciones fisicoquímicas del material con dicho agente. En esta prueba el pH 8 tiene el valor de constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) más bajo por lo cual tiene la probabilidad de tener la mejor recuperación para esta concentración.

En las condiciones de concentración  $2 \times 10^{-3}$  M de agente sulfidizante continua la misma tendencia del primer caso teniendo un descenso en los primeros tres puntos de pH y subiendo en el cuarto, las mejores condiciones para esta concentración es pH 9.

Finalmente haciendo la comparación de las condiciones de trabajo se obtiene que las mejores condiciones para realizar una flotación de malaquita es utilizando una concentración de  $2 \times 10^{-3}$  M de sulfuro de sodio,  $1.5 \times 10^{-3}$  M de XINa y un pH de 9.





**Figura 29. Gráfica del % recuperación vs pH del mineral de malaquita + sulfidizante a diferentes concentraciones + XINa  $1.5 \times 10^{-3} M$**

Para corroborar los resultados obtenidos en las pruebas de impedancia a alta frecuencia se realizaron microflotaciones utilizando una celda Hallimond, se llevaron a cabo 32 flotaciones cubriendo los puntos de acondicionamiento establecidos en la tabla 2.2.

Los pesos obtenidos de concentrado y colas se encuentran reportados a partir de la tabla 3.5 hasta la 3.10, así como los porcentajes de recuperación.

Se analizaron cada una de las flotaciones que se realizaron con el acondicionamiento en presencia de  $\text{Na}_2\text{S}$  + XINa (figura 33) y el porcentaje de recuperación mayor se presentó a un pH 8 para una concentración de  $1 \times 10^{-3} M$  de sulfidizante lo cual concuerda con el estudio de impedancia ya que a este pH el valor de constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) fue menor, siendo el porcentaje total de recuperación 59.70%.





Para la concentración de  $1.5 \times 10^{-3}$  M de  $\text{Na}_2\text{S}$  la figura 33 indica que la mayor concentración está en el pH 9 lo que de igual forma concuerda con los datos de impedancia y tiene un valor de recuperación de 48.50%.

Finalmente para la concentración de  $2 \times 10^{-3}$  M de sulfidizante la figura 33 indica que la recuperación más alta se da a un pH 9 con un valor de 61.10% lo cual indica que es la mayor recuperación de las tres concentraciones de sulfidizante, esto es congruente con la respuesta que tiene la malaquita en el estudio de impedancia a alta frecuencia.

El material recuperado a pH 8 con concentración  $1 \times 10^{-3}$  M de  $\text{Na}_2\text{S}$  es muy parecido al porcentaje obtenido a pH 9 y con una concentración  $2 \times 10^{-3}$  M por lo que valdría la pena rectificar nuevamente estos puntos y así poder evaluar el porcentaje de gasto en los reactivos o la pérdida del concentrado para obtener el proceso más rentable industrialmente.



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

- i. La constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) tiende a disminuir a medida que la concentración del agente sulfidizante aumenta, incrementando la probabilidad de que el mineral pueda ser flotado.
- ii. La constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) es inversamente proporcional a la flotabilidad de un mineral, ya que a menor valor de esta la cantidad de mineral flotado es mayor.
- iii. El porcentaje de recuperación concuerda y valida los resultados obtenidos en las pruebas de impedancia.
- iv. Los cambios de pH en el proceso afectan el rendimiento del sulfidizante y del colector.
- v. Las condiciones con mayor probabilidad de flotación encontradas en este estudio para la malaquita son: concentración de  $\text{Na}_2\text{S}$   $2 \times 10^{-3} \text{M}$ , concentración de XINa  $1.5 \times 10^{-3} \text{M}$  y pH 9.



## CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

1. Salager, J. Forgiarini, A. (2007). *Fundamentos de flotación*. universidad de los andes, facultad de ingeniería Merida –Venezuela: FIRP.
2. Sancho, J. Verdeja, L. Ballester, A. (2006). *Metalurgia extractiva: Procesos de obtención V.II*, Madrid, España: Síntesis. 245-294.
3. Azañero, A. Nuñez, P. Figueroa A. (2002) Flotación de minerales oxidados de plomo, cobre y zinc, *Revista del instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 5(10), 34-43 recuperado de [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v05\\_n10/flota\\_mine.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v05_n10/flota_mine.htm).
4. Azañero, A. Ortiz, P. Nuñez, P. (2015). *Flotación de minerales oxidados de plomo*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos Lima, Perú.
5. Davila, J. Llerena, R. Benavides, N. (2012) NaSH en la optimización de la flotación de cobre concentradora cuajone, Southern Perú copper corp. Recuperado de <http://www.congresominas.co.pe/WEB/ti/5/1/1b.pdf>
6. Pérez, T. (2005). Aplicación de la técnica espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) en el estudio de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto. *labcorr.net*. recuperado de <http://www.labcorr.net/libro/concreto.PDF>
7. Vaughan, D.J. Becker, U. Wright. K. (1997). Sulphide mineral surfaces: theory and experiment, *Elsevier*, 51(1-4), 1-14 recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301751697000355>
8. Guevanaso, D. (2010). Permitividad. *Creative commons Attribution-Share Alike 3.0*. Recuperado de <https://iupsm.files.wordpress.com/2010/08/permitividad.pdf>
9. [Imagen de mineral de malaquita] recuperado de [http://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-601541332-mineral-roca-cobre-nativo-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-601541332-mineral-roca-cobre-nativo-_JM)
10. Cámara Minera de México. (2014). *Informe anual*, recuperado de <http://www.camimex.org.mx>
11. International copper study group (s.f.). *International copper study group* recuperado de <http://www.icsg.org/>



12. Cheminova Danafloat (s.f.) productos químicos para flotación. *Cheminova Danafloat* recuperado de [http://www.danafloat.com/es/mining\\_ores/copper](http://www.danafloat.com/es/mining_ores/copper)
13. Eiora, J. (1996) *La prehistoria. La edad de los metales*, Madrid España: Akal, pp12-20.
14. Galeano, p. (2015), *Materiales metálicos cobre* Universidad tecnológica de Pereira. Recuperado de <http://www.utp.edu.co/~publio17/>
15. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (IAPH) [Mina a cielo abierto en Rio tinto] recuperado de <http://granadablogs.com/gr-arquitectos/tag/rio-tinto/>
16. [Trabajadores] (Mina Chuquicamata subterránea) recuperada de [www.codelco.com](http://www.codelco.com)
17. Sánchez, A. Denton, F. (1996) *La producción de cobre en el mundo y sus rasgos territoriales básicos en México a finales del siglo XX*, instituto de geografía UNAM, México. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/34844.pdf>
18. Federación de trabajadores del estado de Sonora C.T.M. recuperado de [www.ctmsonora.org](http://www.ctmsonora.org)
19. Gold Corp, unidad minera Los Filos “minas en movimiento” Secretaria de economía, Mexico 2001.
20. Muro, E., () *La minería mexicana, su evolución, retos y perspectivas*. Instituto de investigaciones jurídicas UNAM
21. Secretaria de Economía del Estado de Sonora recuperado de [www.1economiasonora.gob.mx](http://www.1economiasonora.gob.mx)
22. Panorama minero del estado de Zacatecas [www.sgm.gob.mx](http://www.sgm.gob.mx)
23. Museo del oro banco de la República [www.banrepultural.org](http://www.banrepultural.org)
24. Sarmentero, J. (2010) *impacto de la logística inversa en el mercado del cobre en España* universidad politécnica de Cataluña Barcelona.
25. [Imagen mineral de malaquita] recuperado de [runamagica.blogspot.mx](http://runamagica.blogspot.mx)
26. Yubero, F. () *malaquita piedra semipreciosa recuperado de* [lanaveva.wordpress.com](http://lanaveva.wordpress.com)
27. Arlandis, J.(1999) *la metalurgia del cobre* Atlantic copper SA recuperado de [http://www.aim.es/publicaciones/bol2/13\\_Metalurgia\\_Cobre.pdf](http://www.aim.es/publicaciones/bol2/13_Metalurgia_Cobre.pdf)



28. Pavez, O. (2013) *Concentración de minerales* Universidad de Atacama Facultad de Ingeniería Depto. De Metalurgia. Chile. Recuperado de <http://es.slideshare.net/DaisySilva7/apuntes-de-concentracion-de-minerales-ii-o-pavez11ago13>
29. Monge, J. (2001). *Técnicas experimentales en flotación* Universidad de Sonora México recuperado de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11112/Capitulo4.pdf>



## **CAPÍTULO 7. ANEXOS**

En este anexo se incluyen las tablas de cálculo de la constante dieléctrica de las pruebas de impedancia a alta frecuencia más significativas de este trabajo.



| 23-feb-15  |            | .8g            | Malaquita<br>sin reactivo | pH 7                | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|---------------------------|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire           | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0                        | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | Zx       | Ox             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 4620       | -13.4          | 75000                     | -90                 | 0.5           | 12.3              | 4607.83    | -806.14    | 4677.81  | -9.92          | 4748.86          | 11.73             | 60.93           | 348.26       | 0.01          |
| 1          | 4250       | -25.6          | 38000                     | -90                 | 0.52          | 16.8              | 4184.42    | -1486.22   | 4440.52  | -19.55         | 4712.30          | 12.00             | 62.33           | 175.48       | 0.01          |
| 2          | 3370       | -43.2          | 19000                     | -90                 | 0.57          | 26.9              | 3114.57    | -2167.56   | 3794.58  | -34.84         | 4623.06          | 11.98             | 62.24           | 89.43        | 0.01          |
| 5          | 1820       | -66            | 7570                      | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 1196.86    | -1980.14   | 2313.75  | -58.85         | 4472.90          | 11.77             | 61.17           | 36.97        | 0.01          |
| 10         | 989        | -77            | 3780                      | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 398.41     | -1262.64   | 1324.01  | -72.49         | 4399.99          | 11.46             | 59.54           | 18.78        | 0.01          |
| 20         | 504        | -82.8          | 1880                      | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 116.00     | -678.37    | 688.21   | -80.30         | 4082.97          | 11.40             | 59.12           | 10.09        | 0.01          |
| 30         | 337        | -85            | 1271                      | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 53.88      | -457.99    | 461.15   | -83.29         | 3947.11          | 11.43             | 59.13           | 6.93         | 0.01          |
| 40         | 250        | -86            | 946                       | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 31.71      | -342.54    | 344.00   | -84.71         | 3732.21          | 11.52             | 59.43           | 5.46         | 0.01          |
| 50         | 199        | -86.4          | 758                       | -90                 | 5.89          | 83.8              | 22.30      | -274.46    | 275.37   | -85.36         | 3400.80          | 11.52             | 59.22           | 4.76         | 0.01          |
| 60         | 165        | -86.7          | 626                       | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 16.95      | -230.18    | 230.80   | -85.79         | 3142.69          | 11.46             | 58.65           | 4.25         | 0.01          |
| 70         | 139.4      | -87            | 536                       | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 12.86      | -195.97    | 196.39   | -86.24         | 2998.50          | 11.55             | 58.79           | 3.78         | 0.01          |
| 80         | 120.2      | -89            | 465                       | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 3.33       | -171.36    | 171.39   | -88.89         | 8827.14          | 11.61             | 58.69           | 1.11         | 0.00          |
| 90         | 104.4      | -86.4          | 413                       | -90                 | 10.45         | 86.1              | 11.01      | -149.53    | 149.93   | -85.79         | 2041.74          | 11.76             | 59.06           | 4.21         | 0.02          |
| 100        | 91.8       | -86.4          | 369                       | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 9.39       | -133.25    | 133.58   | -85.97         | 1900.09          | 11.88             | 79.2            | 4.01         | 0.02          |

|                  |            |
|------------------|------------|
| <b>cte celda</b> |            |
| <b>Ca</b>        | 0.19246578 |
| <b>K</b>         | 7.27E-08   |



| 24-feb-15  |            | 1 g            | Malaquita sin reactivo | pH 8                | MB            |                   |            |            |           |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|------------------------|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|-----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire        | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Mag nitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0                     | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | /Zx/      | Ox             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 43         | -0.4           | 75000                  | -90                 | 0.5           | 12.3              | 42.51      | -0.38      | 42.51     | -0.51          | 42.51            | 67.29             | 349.61          | 38900.59     | 1.08          |
| 1          | 43.9       | -0.7           | 38000                  | -90                 | 0.52          | 16.8              | 43.40      | -0.64      | 43.40     | -0.84          | 43.41            | 53.72             | 279.11          | 19048.64     | 1.06          |
| 2          | 44.2       | -0.9           | 19000                  | -90                 | 0.57          | 26.9              | 43.69      | -0.85      | 43.70     | -1.11          | 43.71            | 35.40             | 183.91          | 9459.12      | 1.05          |
| 5          | 46.6       | -1.1           | 7570                   | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 46.07      | -1.21      | 46.09     | -1.50          | 46.10            | 18.10             | 94.04           | 3586.08      | 1.00          |
| 10         | 47.4       | -1.6           | 3780                   | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 46.86      | -1.92      | 46.90     | -2.35          | 46.94            | 13.90             | 72.19           | 1759.75      | 0.98          |
| 20         | 47.3       | -2.3           | 1880                   | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 46.75      | -3.08      | 46.85     | -3.77          | 46.95            | 11.16             | 57.90           | 877.68       | 0.98          |
| 30         | 46.9       | -3.3           | 1271                   | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 46.36      | -4.51      | 46.58     | -5.56          | 46.80            | 11.03             | 57.11           | 584.59       | 0.98          |
| 40         | 46.4       | -4.2           | 946                    | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 45.85      | -5.83      | 46.22     | -7.25          | 46.59            | 10.87             | 56.09           | 438.00       | 0.97          |
| 50         | 45.7       | -4.9           | 758                    | -90                 | 5.89          | 83.8              | 45.20      | -7.01      | 45.74     | -8.82          | 46.29            | 10.67             | 54.87           | 350.29       | 0.97          |
| 60         | 45         | -5.6           | 626                    | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 44.51      | -8.17      | 45.25     | -10.41         | 46.01            | 10.59             | 54.25           | 291.30       | 0.97          |
| 70         | 44.2       | -6             | 536                    | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 43.73      | -9.19      | 44.69     | -11.86         | 45.66            | 10.46             | 53.33           | 249.23       | 0.97          |
| 80         | 43.1       | -6.6           | 465                    | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 42.67      | -10.30     | 43.89     | -13.57         | 45.15            | 10.63             | 53.89           | 218.00       | 0.97          |
| 90         | 42.1       | -7             | 413                    | -90                 | 10.45         | 86.1              | 41.69      | -11.28     | 43.19     | -15.14         | 44.74            | 10.69             | 53.85           | 193.12       | 0.97          |
| 100        | 40.8       | 6.8            | 369                    | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 38.36      | -2.56      | 38.45     | -3.81          | 38.53            | 2.75              | 61.7            | 210.28       | 1.38          |

|           |            |
|-----------|------------|
| cte celda |            |
| Ca        | 0.19246578 |
| K         | 7.27E-08   |





| 24-feb-15  |            | 1 g            | Malaquita sin reactivo | pH 9                | MB            |                   |            |            |           |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|------------------------|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|-----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire        | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Mag nitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0                     | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | Zx        | Ox             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 29.5       | -1             | 75000                  | -90                 | 0.5           | 12.3              | 29.01      | -0.61      | 29.01     | -1.20          | 29.02            | 230.57            | 1197.95         | 56987.06     | 1.59          |
| 1          | 29.2       | -1.2           | 38000                  | -90                 | 0.52          | 16.8              | 28.70      | -0.74      | 28.71     | -1.48          | 28.72            | 142.80            | 741.93          | 28793.76     | 1.60          |
| 2          | 28.8       | -0.9           | 19000                  | -90                 | 0.57          | 26.9              | 28.29      | -0.67      | 28.30     | -1.35          | 28.31            | 66.25             | 344.18          | 14604.39     | 1.62          |
| 5          | 28.5       | -0.4           | 7570                   | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 27.97      | -0.69      | 27.98     | -1.42          | 27.99            | 28.13             | 146.10          | 5905.94      | 1.64          |
| 10         | 28.4       | 0.1            | 3780                   | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 27.85      | -0.93      | 27.87     | -1.91          | 27.88            | 19.04             | 98.85           | 2961.23      | 1.65          |
| 20         | 28.3       | 0.8            | 1880                   | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 27.70      | -1.55      | 27.74     | -3.20          | 27.78            | 16.02             | 83.02           | 1480.97      | 1.65          |
| 30         | 28         | 1.3            | 1271                   | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 27.36      | -2.29      | 27.45     | -4.79          | 27.55            | 16.12             | 83.32           | 989.74       | 1.65          |
| 40         | 27.8       | 1.8            | 946                    | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 27.07      | -3.02      | 27.23     | -6.37          | 27.40            | 16.21             | 83.39           | 740.08       | 1.65          |
| 50         | 27.4       | 2.4            | 758                    | -90                 | 5.89          | 83.8              | 26.62      | -3.73      | 26.88     | -7.97          | 27.14            | 16.42             | 84.02           | 591.25       | 1.64          |
| 60         | 27.1       | 3.1            | 626                    | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 26.21      | -4.39      | 26.57     | -9.50          | 26.94            | 16.48             | 83.78           | 490.07       | 1.64          |
| 70         | 26.7       | 4.1            | 536                    | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 25.70      | -5.00      | 26.18     | -11.00         | 26.67            | 16.57             | 83.60           | 418.04       | 1.63          |
| 80         | 26.1       | 4.9            | 465                    | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 24.99      | -5.68      | 25.62     | -12.80         | 26.28            | 17.20             | 85.95           | 364.22       | 1.62          |
| 90         | 25.5       | 6              | 413                    | -90                 | 10.45         | 86.1              | 24.23      | -6.26      | 25.03     | -14.47         | 25.85            | 17.66             | 87.28           | 322.34       | 1.61          |
| 100        | 25.5       | 7.3            | 369                    | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 24.08      | -6.67      | 24.99     | -15.47         | 25.92            | 16.99             | 50.03           | 284.53       | 1.32          |

|           |            |
|-----------|------------|
| cte celda |            |
| Ca        | 0.19246578 |
| K         | 7.27E-08   |



| 23-feb-15  |            | 1 g            | Malaquita<br>sin<br>reactivo | pH 10               | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|------------------------------|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire              | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0                           | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | /Zx/     | Ox             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 603        | -2.3           | 75000                        | -90                 | 0.5           | 12.3              | 602.38     | -19.47     | 602.69   | -1.85          | 603.01           | 17.06             | 88.64           | 2742.67      | 0.08          |
| 1          | 601        | -5.1           | 38000                        | -90                 | 0.52          | 16.8              | 599.66     | -44.18     | 601.29   | -4.21          | 602.92           | 19.45             | 101.05          | 1371.52      | 0.08          |
| 2          | 605        | -9.8           | 19000                        | -90                 | 0.57          | 26.9              | 601.58     | -84.80     | 607.53   | -8.02          | 613.53           | 18.28             | 94.99           | 673.87       | 0.07          |
| 5          | 568        | -22.6          | 7570                         | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 552.58     | -185.86    | 583.00   | -18.59         | 615.09           | 17.41             | 90.42           | 268.79       | 0.07          |
| 10         | 478        | -39.1          | 3780                         | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 432.51     | -282.48    | 516.59   | -33.15         | 617.01           | 16.85             | 87.48           | 133.85       | 0.07          |
| 20         | 323        | -57.7          | 1880                         | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 232.92     | -296.82    | 377.30   | -51.88         | 611.17           | 16.59             | 86.00           | 67.31        | 0.07          |
| 30         | 234        | -66.9          | 1271                         | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 131.53     | -251.09    | 283.45   | -62.35         | 610.85           | 16.58             | 85.66           | 44.62        | 0.07          |
| 40         | 180.8      | -71.7          | 946                          | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 83.70      | -208.17    | 224.37   | -68.10         | 601.47           | 16.45             | 84.66           | 33.71        | 0.08          |
| 50         | 145.9      | -74.9          | 758                          | -90                 | 5.89          | 83.8              | 56.49      | -175.35    | 184.23   | -72.14         | 600.84           | 16.45             | 84.16           | 26.71        | 0.07          |
| 60         | 121.3      | -76.8          | 626                          | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 41.33      | -150.24    | 155.82   | -74.62         | 587.46           | 16.41             | 83.46           | 22.48        | 0.08          |
| 70         | 102.6      | -78.4          | 536                          | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 30.60      | -130.37    | 133.92   | -76.79         | 586.09           | 16.53             | 83.40           | 19.03        | 0.07          |
| 80         | 88.7       | -79.3          | 465                          | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 24.29      | -115.46    | 117.99   | -78.12         | 573.12           | 16.50             | 82.56           | 16.75        | 0.07          |
| 90         | 77.1       | -79.7          | 413                          | -90                 | 10.45         | 86.1              | 19.94      | -102.51    | 104.43   | -78.99         | 546.85           | 16.62             | 82.37           | 15.32        | 0.08          |
| 100        | 68.1       | -80            | 369                          | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 16.91      | -92.86     | 94.39    | -79.68         | 526.85           | 16.59             | 101.38          | 14.04        | 0.08          |

|           |            |
|-----------|------------|
| cte celda |            |
| Ca        | 0.19246578 |
| K         | 7.27E-08   |



| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita + Na <sub>2</sub> S<br>1x10 <sup>-3</sup> +XINa | pH 7                | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|---|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire   | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0  | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | Zx       | Ox             | Rx<br>(ohms)     | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 24.3       | -0.2           | 75000   | -90                 | 0.5           | 12.3              | 23.81      | -0.18      | 23.81    | -0.44          | 23.81            | 102.99            | 535.12          | 69450.72     | 1.93          |
| 1          | 24.2       | 0.3            | 38000   | -90                 | 0.52          | 16.8              | 23.70      | -0.01      | 23.70    | -0.02          | 23.70            | 2.32              | 12.03           | 34888.75     | 1.94          |
| 2          | 24         | 1.4            | 19000   | -90                 | 0.57          | 26.9              | 23.48      | 0.36       | 23.49    | 0.88           | 23.49            | -51.76            | -268.95         | 17605.52     | 1.96          |
| 5          | 23.9       | 5              | 7570  | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 23.27      | 1.56       | 23.32    | 3.83           | 23.37            | -91.15            | -474.02         | 7088.78      | 1.97          |
| 10         | 24.3       | 9.9            | 3780  | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 23.34      | 3.13       | 23.55    | 7.64           | 23.76            | -89.88            | -468.61         | 3504.02      | 1.95          |
| 20         | 25.5       | 18.5           | 1880  | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 23.39      | 5.99       | 24.15    | 14.37          | 24.93            | -81.82            | -430.49         | 1701.33      | 1.89          |
| 30         | 27         | 26.5           | 1271  | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 23.11      | 8.84       | 24.74    | 20.93          | 26.49            | -76.60            | -408.91         | 1099.33      | 1.83          |
| 40         | 29.4       | 33.8           | 946   | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 22.95      | 11.97      | 25.88    | 27.55          | 29.19            | -71.10            | -386.79         | 778.25       | 1.73          |
| 50         | 32.2       | 40.7           | 758   | -90                 | 5.89          | 83.8              | 22.45      | 15.30      | 27.17    | 34.27          | 32.88            | -65.96            | -367.23         | 580.48       | 1.61          |
| 60         | 36.2       | 46.8           | 626   | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 19.59      | 21.03      | 28.74    | 47.02          | 42.17            | -67.52            | -390.78         | 410.89       | 1.37          |
| 70         | 41.9       | 52.2           | 536   | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 20.24      | 25.10      | 32.24    | 51.12          | 51.36            | -54.89            | -322.16         | 298.48       | 1.16          |
| 80         | 50.7       | 55.5           | 465   | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 23.75      | 30.19      | 38.41    | 51.81          | 62.12            | -40.71            | -237.81         | 213.66       | 0.95          |
| 90         | 64.9       | 55             | 413   | -90                 | 10.45         | 86.1              | 35.87      | 34.71      | 49.91    | 44.06          | 69.45            | -24.64            | -139.47         | 158.29       | 0.79          |
| 100        | 86         | 45.3           | 369   | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 80.96      | 7.48       | 81.31    | 5.28           | 81.65            | 1.80              | 6.58            | 102.68       | 0.57          |

|                  |                |
|------------------|----------------|
| <b>cte celda</b> |                |
| <b>Ca</b>        | 0.1924<br>6578 |
| <b>K</b>         | 7.27E-<br>08   |



| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita + Na <sub>2</sub> S<br>1x10 <sup>-3</sup> +XINa | pH8                 | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|---|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire   | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0  | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | Zx       | Ox             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 27.4       | -0.8           | 75000   | -90                 | 0.5           | 12.3              | 26.91      | -0.48      | 26.91    | -1.02          | 26.92            | 210.53            | 1093.83         | 61438.67     | 1.71          |
| 1          | 27.4       | -0.2           | 38000   | -90                 | 0.52          | 16.8              | 26.90      | -0.23      | 26.90    | -0.48          | 26.90            | 49.74             | 258.41          | 30734.88     | 1.71          |
| 2          | 27.3       | 1.2            | 19000   | -90                 | 0.57          | 26.9              | 26.78      | 0.35       | 26.79    | 0.76           | 26.79            | -39.15            | -203.44         | 15436.05     | 1.72          |
| 5          | 27.4       | 4.9            | 7570  | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 26.75      | 1.84       | 26.82    | 3.93           | 26.88            | -81.35            | -423.02         | 6162.26      | 1.71          |
| 10         | 28.1       | 10             | 3780  | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 27.06      | 3.88       | 27.33    | 8.17           | 27.61            | -82.71            | -431.10         | 3013.47      | 1.68          |
| 20         | 29.5       | 19             | 1880  | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 27.02      | 7.59       | 28.07    | 15.70          | 29.16            | -76.70            | -403.23         | 1452.12      | 1.62          |
| 30         | 31.5       | 27.2           | 1271  | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 26.79      | 11.29      | 29.07    | 22.86          | 31.55            | -70.89            | -377.68         | 919.18       | 1.53          |
| 40         | 34.3       | 34.8           | 946   | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 26.37      | 15.26      | 30.46    | 30.06          | 35.20            | -65.42            | -354.52         | 640.14       | 1.42          |
| 50         | 37.9       | 41.8           | 758   | -90                 | 5.89          | 83.8              | 25.79      | 19.54      | 32.36    | 37.16          | 40.60            | -59.41            | -328.28         | 462.52       | 1.29          |
| 60         | 43.2       | 48             | 626   | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 22.42      | 26.75      | 34.90    | 50.04          | 54.34            | -58.26            | -331.42         | 306.87       | 1.02          |
| 70         | 50.5       | 53.4           | 536   | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 23.24      | 31.98      | 39.53    | 54.00          | 67.25            | -46.53            | -267.18         | 216.94       | 0.84          |
| 80         | 61.6       | 56.5           | 465   | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 27.40      | 38.41      | 47.18    | 54.50          | 81.25            | -34.32            | -196.26         | 155.64       | 0.69          |
| 90         | 79.9       | 55.7           | 413   | -90                 | 10.45         | 86.1              | 42.20      | 44.57      | 61.38    | 46.56          | 89.27            | -20.92            | -116.72         | 119.32       | 0.60          |
| 100        | 107.1      | 45.2           | 369   | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 98.20      | 17.16      | 99.69    | 9.91           | 101.20           | 2.75              | 1.57            | 83.47        | 0.46          |

|           |                |
|-----------|----------------|
| cte celda |                |
| Ca        | 0.1924<br>6578 |
| K         | 7.27E-<br>08   |



| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita + Na <sub>2</sub> S<br>1x10 <sup>-3</sup> + XINa | pH 9                | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|--|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire  | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0   | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | Zx       | Ox             | Rx<br>(ohms)     | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 22.2       | -0.2           | 75000  | -90                 | 0.5           | 12.3              | 21.71      | -0.18      | 21.71    | -0.47          | 21.71            | 119.81            | 622.48          | 76167.42     | 2.12          |
| 1          | 22.4       | -0.2           | 38000  | -90                 | 0.52          | 16.8              | 21.90      | -0.22      | 21.90    | -0.56          | 21.90            | 71.42             | 371.06          | 37749.71     | 2.10          |
| 2          | 21.9       | 1.4            | 19000  | -90                 | 0.57          | 26.9              | 21.38      | 0.30       | 21.39    | 0.81           | 21.39            | -52.61            | -273.38         | 19334.43     | 2.15          |
| 5          | 21.6       | 5.4            | 7570   | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 20.96      | 1.49       | 21.02    | 4.07           | 21.07            | -107.60           | -559.65         | 7865.44      | 2.19          |
| 10         | 21.7       | 10.7           | 3780   | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 20.73      | 2.95       | 20.94    | 8.10           | 21.15            | -107.14           | -558.94         | 3941.16      | 2.19          |
| 20         | 22.6       | 20.1           | 1880   | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 20.46      | 5.60       | 21.22    | 15.31          | 22.00            | -99.02            | -522.43         | 1938.39      | 2.16          |
| 30         | 23.8       | 28.7           | 1271   | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 19.91      | 8.12       | 21.50    | 22.19          | 23.22            | -93.19            | -500.60         | 1270.33      | 2.12          |
| 40         | 25.8       | 36.9           | 946  | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 19.32      | 10.96      | 22.21    | 29.57          | 25.54            | -88.41            | -486.92         | 912.86       | 2.03          |
| 50         | 28.4       | 44.4           | 758  | -90                 | 5.89          | 83.8              | 18.62      | 14.01      | 23.30    | 36.96          | 29.16            | -82.14            | -466.27         | 682.89       | 1.90          |
| 60         | 32.2       | 51.2           | 626  | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 15.39      | 19.34      | 24.71    | 51.49          | 39.69            | -83.99            | -502.47         | 471.17       | 1.57          |
| 70         | 37.5       | 57.1           | 536  | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 15.46      | 23.21      | 27.89    | 56.34          | 50.32            | -67.85            | -413.43         | 332.77       | 1.30          |
| 80         | 459        | 61             | 465  | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 60.46      | 221.35     | 229.46   | 74.72          | 870.82           | -8.36             | -44.37          | 12.38        | 0.06          |
| 90         | 59.8       | 60.7           | 413  | -90                 | 10.45         | 86.1              | 30.00      | 33.53      | 44.99    | 48.18          | 67.47            | -29.29            | -169.00         | 170.01       | 0.85          |
| 100        | 80.4       | 50.3           | 369  | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 76.14      | 5.19       | 76.32    | 3.90           | 76.50            | 1.42              | 8.6             | 109.28       | 0.61          |

|           |                |
|-----------|----------------|
| cte celda |                |
| Ca        | 0.1924<br>6578 |
| K         | 7.27E-<br>08   |



| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita + Na <sub>2</sub> S<br>1x10 <sup>-3</sup> +XINa | pH 10               | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|---|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire   | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0  | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | Zx       | Ox             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 24         | -1.9           | 75000   | -90                 | 0.5           | 12.3              | 23.50      | -0.89      | 23.52    | -2.18          | 23.53            | 514.93            | 2675.29         | 70271.46     | 1.95          |
| 1          | 24.2       | -0.7           | 38000   | -90                 | 0.52          | 16.8              | 23.70      | -0.43      | 23.70    | -1.04          | 23.71            | 121.94            | 633.56          | 34875.48     | 1.94          |
| 2          | 24.1       | 1.1            | 19000   | -90                 | 0.57          | 26.9              | 23.59      | 0.24       | 23.59    | 0.57           | 23.59            | -33.66            | -174.89         | 17530.00     | 1.95          |
| 5          | 24.6       | 5.3            | 7570  | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 23.95      | 1.75       | 24.01    | 4.18           | 24.08            | -96.63            | -502.52         | 6881.09      | 1.91          |
| 10         | 25.4       | 10.6           | 3780  | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 24.36      | 3.64       | 24.63    | 8.50           | 24.90            | -95.46            | -497.78         | 3344.67      | 1.86          |
| 20         | 26.7       | 20.1           | 1880  | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 24.24      | 7.09       | 25.26    | 16.30          | 26.32            | -88.44            | -465.80         | 1614.69      | 1.80          |
| 30         | 28.5       | 28             | 1271  | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 24.04      | 10.18      | 26.11    | 22.95          | 28.35            | -79.25            | -423.49         | 1029.24      | 1.72          |
| 40         | 31.1       | 36.9           | 946   | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 23.26      | 14.22      | 27.26    | 31.44          | 31.95            | -76.15            | -415.73         | 716.29       | 1.59          |
| 50         | 34.9       | 44.2           | 758   | -90                 | 5.89          | 83.8              | 22.83      | 18.47      | 29.36    | 38.97          | 37.77            | -68.18            | -380.58         | 508.15       | 1.41          |
| 60         | 39.8       | 51             | 626   | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 19.06      | 25.20      | 31.59    | 52.89          | 52.37            | -66.96            | -387.09         | 330.03       | 1.10          |
| 70         | 46.8       | 56.6           | 536   | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 19.40      | 30.35      | 36.02    | 57.41          | 66.88            | -53.19            | -310.75         | 226.85       | 0.88          |
| 80         | 57.7       | 60.2           | 465   | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 23.00      | 36.99      | 43.56    | 58.13          | 82.50            | -38.78            | -225.08         | 158.47       | 0.71          |
| 90         | 75.6       | 59.7           | 413   | -90                 | 10.45         | 86.1              | 37.42      | 43.55      | 57.42    | 49.33          | 88.11            | -23.36            | -131.56         | 123.39       | 0.62          |
| 100        | 102.5      | 48.7           | 369   | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 94.57      | 14.92      | 95.74    | 8.97           | 96.92            | 2.59              | 2.41            | 87.04        | 0.48          |

|           |                |
|-----------|----------------|
| cte celda |                |
| Ca        | 0.1924<br>6578 |
| K         | 7.27E-<br>08   |



| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita + Na <sub>2</sub> S<br>1.5x10 <sup>-3</sup> XINa | pH 7                | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|--|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire  | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0   | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | Zx       | Ox             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 44.7       | -14.2          | 75000  | -90                 | 0.5           | 12.3              | 42.86      | -11.05     | 44.26    | -14.46         | 45.71            | 1795.27           | 9326.17         | 36171.88     | 1.01          |
| 1          | 41         | -11.6          | 38000  | -90                 | 0.52          | 16.8              | 39.68      | -8.35      | 40.55    | -11.89         | 41.44            | 808.50            | 4199.45         | 19942.18     | 1.11          |
| 2          | 38.3       | -8.9           | 19000  | -90                 | 0.57          | 26.9              | 37.35      | -6.11      | 37.85    | -9.29          | 38.35            | 339.37            | 1762.35         | 10769.31     | 1.20          |
| 5          | 36         | -6.1           | 7570   | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 35.30      | -4.26      | 35.56    | -6.88          | 35.82            | 107.19            | 556.39          | 4608.33      | 1.28          |
| 10         | 35.1       | -4.3           | 3780   | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 34.50      | -3.50      | 34.68    | -5.79          | 34.86            | 46.33             | 240.28          | 2363.98      | 1.32          |
| 20         | 34.3       | -2.9           | 1880   | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 33.73      | -3.48      | 33.91    | -5.89          | 34.09            | 24.09             | 124.74          | 1204.25      | 1.34          |
| 30         | 33.9       | -2             | 1271   | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 33.32      | -3.82      | 33.54    | -6.54          | 33.76            | 18.01             | 93.02           | 806.60       | 1.35          |
| 40         | 33.8       | -1.3           | 946  | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 33.16      | -4.27      | 33.43    | -7.33          | 33.70            | 15.19             | 78.19           | 602.40       | 1.34          |
| 50         | 33.5       | -0.7           | 758  | -90                 | 5.89          | 83.8              | 32.83      | -4.79      | 33.18    | -8.29          | 33.53            | 13.84             | 70.97           | 480.85       | 1.34          |
| 60         | 33.3       | -0.1           | 626  | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 32.48      | -4.84      | 32.84    | -8.47          | 33.20            | 11.90             | 60.86           | 402.27       | 1.34          |
| 70         | 33         | 0.7            | 536  | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 32.10      | -5.50      | 32.57    | -9.72          | 33.04            | 11.78             | 59.95           | 342.86       | 1.34          |
| 80         | 32.4       | 1.2            | 465  | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 31.38      | -5.97      | 31.94    | -10.77         | 32.51            | 11.64             | 58.89           | 301.41       | 1.34          |
| 90         | 32         | 2              | 413  | -90                 | 10.45         | 86.1              | 30.79      | -6.28      | 31.42    | -11.52         | 32.07            | 11.24             | 56.52           | 268.64       | 1.35          |
| 100        | 31.4       | 3.1            | 369  | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 30.52      | 8.91       | 31.79    | 16.27          | 33.12            | 14.03             | 12.29           | 226.83       | 0.67          |

|           |                |
|-----------|----------------|
| cte celda |                |
| Ca        | 0.1924<br>6578 |
| K         | 7.27E-<br>08   |



| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita +<br>Na <sub>2</sub> S 1.5x10 <sup>-3</sup> +<br>XINa | pH8                 | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|---|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire   | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0  | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | /Zx/     | 0x             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 16.13      | -0.9           | 75000   | -90                 | 0.5           | 12.3              | 15.64      | -0.36      | 15.64    | -1.31          | 15.65            | 463.57            | 2408.49         | 105683.35    | 2.94          |
| 1          | 15.82      | -0.4           | 38000   | -90                 | 0.52          | 16.8              | 15.32      | -0.25      | 15.32    | -0.95          | 15.33            | 172.25            | 894.93          | 53948.21     | 3.00          |
| 2          | 15.5       | 0.9            | 19000   | -90                 | 0.57          | 26.9              | 14.99      | 0.00       | 14.99    | -0.01          | 14.99            | 0.63              | 3.29            | 27583.66     | 3.07          |
| 5          | 15.28      | 4.4            | 7570  | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 14.70      | 0.60       | 14.71    | 2.35           | 14.73            | -88.61            | -460.77         | 11249.80     | 3.13          |
| 10         | 15.34      | 9.2            | 3780  | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 14.58      | 1.32       | 14.64    | 5.17           | 14.70            | -97.99            | -511.03         | 5667.88      | 3.15          |
| 20         | 15.7       | 18             | 1880  | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 14.27      | 2.59       | 14.50    | 10.28          | 14.74            | -97.86            | -516.22         | 2891.63      | 3.22          |
| 30         | 16.29      | 26.5           | 1271  | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 13.82      | 3.85       | 14.34    | 15.57          | 14.89            | -99.27            | -534.46         | 1990.17      | 3.32          |
| 40         | 17.22      | 34.9           | 946   | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 13.19      | 5.25       | 14.19    | 21.71          | 15.27            | -103.69           | -577.52         | 1563.43      | 3.48          |
| 50         | 18.48      | 43.1           | 758   | -90                 | 5.89          | 83.8              | 12.41      | 6.79       | 14.15    | 28.69          | 16.13            | -107.97           | -634.01         | 1332.19      | 3.71          |
| 60         | 20.3       | 51.2           | 626   | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 9.31       | 10.03      | 13.69    | 47.15          | 20.12            | -142.08           | -999.80         | 1436.61      | 4.80          |
| 70         | 23.3       | 58.7           | 536   | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 8.51       | 12.24      | 14.91    | 55.20          | 26.13            | -125.22           | -1024.31        | 1672.51      | 6.51          |
| 80         | 27.9       | 64.8           | 465   | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 8.61       | 15.41      | 17.65    | 60.80          | 36.17            | -98.39            | -837.55         | 1294.53      | 5.76          |
| 90         | 35.6       | 68.2           | 413   | -90                 | 10.45         | 86.1              | 12.47      | 19.84      | 23.43    | 57.86          | 44.04            | -63.90            | -452.63         | 446.71       | 2.24          |
| 100        | 48.6       | 64.5           | 369   | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 47.13      | 5.26       | 47.42    | -6.37          | 47.71            | 3.73              | 7.47            | 168.63       | 0.59          |

|           |            |
|-----------|------------|
| cte celda |            |
| Ca        | 0.19246578 |
| K         | 7.27E-08   |





| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita +<br>XINa+Na <sub>2</sub> S<br>1.5x10 <sup>-3</sup> | pH 9                | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |  |
|------------|------------|----------------|---|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|--|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire   | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |  |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0  | 00                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | Zx       | 0x             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |  |
| 0.5        | 30.1       | -4.5           | 75000   | -90                 | 0.5           | 12.3              | 29.52      | -2.46      | 29.62    | -4.76          | 29.72            | 890.98            | 4628.88         | 55629.05     | 1.55          |  |
| 1          | 29.3       | -2.7           | 38000   | -90                 | 0.52          | 16.8              | 28.77      | -1.51      | 28.81    | -3.00          | 28.85            | 289.13            | 1502.10         | 28655.81     | 1.59          |  |
| 2          | 28.7       | -0.4           | 19000   | -90                 | 0.57          | 26.9              | 28.19      | -0.41      | 28.19    | -0.84          | 28.20            | 41.53             | 215.78          | 14661.17     | 1.63          |  |
| 5          | 28.4       | 4              | 7570  | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 27.79      | 1.49       | 27.83    | 3.06           | 27.87            | -61.10            | -317.67         | 5941.89      | 1.65          |  |
| 10         | 28.8       | 9.3            | 3780  | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 27.81      | 3.67       | 28.05    | 7.52           | 28.29            | -74.23            | -386.79         | 2939.50      | 1.64          |  |
| 20         | 30         | 18.5           | 1880  | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 27.58      | 7.53       | 28.58    | 15.27          | 29.63            | -73.30            | -385.15         | 1427.38      | 1.59          |  |
| 30         | 31.8       | 26.7           | 1271  | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 27.17      | 11.20      | 29.39    | 22.40          | 31.79            | -68.79            | -366.16         | 910.66       | 1.52          |  |
| 40         | 34.4       | 34.5           | 946   | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 26.55      | 15.18      | 30.58    | 29.76          | 35.23            | -64.58            | -349.79         | 638.77       | 1.42          |  |
| 50         | 37.8       | 41.5           | 758   | -90                 | 5.89          | 83.8              | 25.86      | 19.35      | 32.30    | 36.81          | 40.33            | -59.05            | -326.13         | 465.16       | 1.29          |  |
| 60         | 42.7       | 47.9           | 626   | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 22.12      | 26.41      | 34.45    | 50.05          | 53.64            | -59.03            | -336.30         | 311.81       | 1.04          |  |
| 70         | 49.5       | 53.5           | 536   | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 23.16      | 31.05      | 38.73    | 53.28          | 64.78            | -47.05            | -270.52         | 225.89       | 0.88          |  |
| 80         | 60         | 56             | 465   | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 25.90      | 37.71      | 45.75    | 55.51          | 80.79            | -35.84            | -205.97         | 158.27       | 0.70          |  |
| 90         | 46.8       | 56.9           | 413   | -90                 | 10.45         | 86.1              | 25.45      | 23.74      | 34.80    | 43.00          | 47.59            | -34.65            | -204.71         | 254.40       | 1.27          |  |
| 100        | 102.1      | 48.6           | 369   | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 94.25      | 14.73      | 95.40    | 8.88           | 96.55            | 2.58              | 2.48            | 87.36        | 0.49          |  |

|           |            |
|-----------|------------|
| cte celda |            |
| Ca        | 0.19246578 |
| K         | 7.27E-08   |



| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita + XINa<br>+Na <sub>2</sub> S 1.5x10 <sup>-3</sup> | pH 10               | MB            |                   |            |            |           |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|---|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|-----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire   | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Mag nitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0  | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | /Zx/      | Ox             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 26.7       | -3.1           | 75000   | -90                 | 0.5           | 12.3              | 26.17      | -1.54      | 26.22     | -3.37          | 26.26            | 713.54            | 3707.10         | 62961.30     | 1.75          |
| 1          | 26.3       | -1.6           | 38000   | -90                 | 0.52          | 16.8              | 25.79      | -0.87      | 25.81     | -1.92          | 25.82            | 207.05            | 1075.69         | 32018.94     | 1.78          |
| 2          | 26         | 0.5            | 19000   | -90                 | 0.57          | 26.9              | 25.49      | 0.00       | 25.49     | 0.01           | 25.49            | -0.56             | -2.91           | 16220.57     | 1.80          |
| 5          | 26         | 4.8            | 7570  | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 25.36      | 1.66       | 25.42     | 3.75           | 25.47            | -81.95            | -426.12         | 6502.49      | 1.81          |
| 10         | 26.7       | 10.1           | 3780  | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 25.68      | 3.67       | 25.94     | 8.13           | 26.20            | -86.74            | -452.17         | 3177.09      | 1.77          |
| 20         | 28         | 19.4           | 1880  | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 25.56      | 7.25       | 26.57     | 15.84          | 27.62            | -81.72            | -429.96         | 1535.30      | 1.71          |
| 30         | 29.9       | 27.9           | 1271  | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 25.25      | 10.83      | 27.47     | 23.21          | 29.89            | -76.12            | -406.27         | 973.88       | 1.63          |
| 40         | 32.5       | 35.8           | 946   | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 24.67      | 14.62      | 28.67     | 30.66          | 33.33            | -70.75            | -384.82         | 681.18       | 1.52          |
| 50         | 35.8       | 43.1           | 758   | -90                 | 5.89          | 83.8              | 23.87      | 18.66      | 30.30     | 38.02          | 38.46            | -64.71            | -359.74         | 494.75       | 1.38          |
| 60         | 40.7       | 49.7           | 626   | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 20.12      | 25.52      | 32.50     | 51.74          | 52.48            | -64.09            | -368.53         | 325.37       | 1.09          |
| 70         | 47.6       | 55.4           | 536   | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 20.53      | 30.57      | 36.82     | 56.12          | 66.05            | -51.26            | -297.95         | 227.05       | 0.88          |
| 80         | 58.2       | 58.9           | 465   | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 23.92      | 37.03      | 44.08     | 57.14          | 81.24            | -37.91            | -219.36         | 159.86       | 0.71          |
| 90         | 75.2       | 58.7           | 413   | -90                 | 10.45         | 86.1              | 36.57      | 43.67      | 56.96     | 50.06          | 88.73            | -23.80            | -134.29         | 123.00       | 0.62          |
| 100        | 100.6      | 49.5           | 369   | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 93.05      | 14.01      | 94.10     | 8.56           | 95.16            | 2.52              | 2.79            | 88.60        | 0.49          |

|           |                |
|-----------|----------------|
| cte celda |                |
| Ca        | 0.1924<br>6578 |
| K         | 7.27E-<br>08   |



| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita +Na <sub>2</sub> S<br>2x10 <sup>-3</sup> + XINa | pH 7                | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|---|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire   | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0  | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | Zx       | Ox             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 25.5       | 0.4            | 75000   | -90                 | 0.5           | 12.3              | 25.01      | 0.08       | 25.01    | 0.18           | 25.01            | -40.80            | -211.97         | 66125.36     | 1.84          |
| 1          | 26.4       | 0.5            | 38000   | -90                 | 0.52          | 16.8              | 25.90      | 0.10       | 25.90    | 0.22           | 25.90            | -23.35            | -121.32         | 31926.62     | 1.78          |
| 2          | 26.5       | 1.7            | 19000   | -90                 | 0.57          | 26.9              | 25.98      | 0.57       | 25.98    | 1.25           | 25.99            | -66.61            | -346.13         | 15911.67     | 1.77          |
| 5          | 26.7       | 5.2            | 7570  | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 26.04      | 1.91       | 26.11    | 4.20           | 26.18            | -89.26            | -464.17         | 6326.93      | 1.76          |
| 10         | 27.3       | 10.1           | 3780  | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 26.26      | 3.78       | 26.53    | 8.19           | 26.81            | -85.44            | -445.35         | 3104.72      | 1.73          |
| 20         | 28.5       | 18.6           | 1880  | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 26.17      | 7.06       | 27.10    | 15.10          | 28.07            | -76.49            | -402.14         | 1508.23      | 1.68          |
| 30         | 30.3       | 26.6           | 1271  | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 25.92      | 10.44      | 27.94    | 21.94          | 30.12            | -70.94            | -377.95         | 962.60       | 1.61          |
| 40         | 32.8       | 33.9           | 946   | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 25.54      | 13.98      | 29.11    | 28.70          | 33.19            | -65.63            | -355.71         | 679.12       | 1.51          |
| 50         | 36.2       | 40.7           | 758   | -90                 | 5.89          | 83.8              | 25.14      | 17.94      | 30.89    | 35.51          | 37.95            | -59.86            | -330.90         | 495.40       | 1.38          |
| 60         | 40.9       | 46.8           | 626   | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 22.07      | 24.51      | 32.98    | 48.00          | 49.29            | -59.77            | -340.97         | 340.35       | 1.14          |
| 70         | 47.7       | 52             | 536   | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 23.11      | 29.30      | 37.31    | 51.74          | 60.25            | -47.84            | -275.63         | 243.96       | 0.95          |
| 80         | 58.2       | 54.9           | 465   | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 27.48      | 35.25      | 44.69    | 52.06          | 72.69            | -35.10            | -201.23         | 174.95       | 0.78          |
| 90         | 75.5       | 53.9           | 413   | -90                 | 10.45         | 86.1              | 42.76      | 40.19      | 58.68    | 43.22          | 80.53            | -20.64            | -115.01         | 131.96       | 0.66          |
| 100        | 101        | 42.5           | 369   | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 93.37      | 14.20      | 94.45    | 8.65           | 95.53            | 2.53              | 2.7             | 88.27        | 0.49          |

|           |                |
|-----------|----------------|
| cte celda |                |
| Ca        | 0.1924<br>6578 |
| K         | 7.27E-<br>08   |



| 02-Julio-2015 |            | 1g             | Malaquita + XINa<br>+2x10 <sup>-3</sup> Na <sub>2</sub> S | pH 8                | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|---------------|------------|----------------|---|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia    | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire   | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)         | Zm         | Om (°)         | Z0  | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | /Zx/     | 0x             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5           | 49.9       | -3.3           | 75000   | -90                 | 0.5           | 12.3              | 49.33      | -2.95      | 49.42    | -3.42          | 49.51            | 383.94            | 1994.78         | 33402.95     | 0.93          |
| 1             | 50.4       | -2.9           | 38000   | -90                 | 0.52          | 16.8              | 49.84      | -2.63      | 49.91    | -3.02          | 49.98            | 168.24            | 874.09          | 16541.85     | 0.92          |
| 2             | 50.2       | -2.3           | 19000   | -90                 | 0.57          | 26.9              | 49.66      | -2.14      | 49.71    | -2.47          | 49.75            | 68.93             | 358.10          | 8308.44      | 0.92          |
| 5             | 50.3       | -1.8           | 7570  | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 49.76      | -1.85      | 49.80    | -2.12          | 49.83            | 23.70             | 123.10          | 3317.31      | 0.92          |
| 10            | 51.2       | -2             | 3780  | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 50.66      | -2.29      | 50.71    | -2.58          | 50.77            | 14.15             | 73.46           | 1627.14      | 0.91          |
| 20            | 51.2       | -3             | 1880  | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 50.66      | -3.66      | 50.79    | -4.13          | 50.92            | 11.28             | 58.52           | 809.19       | 0.90          |
| 30            | 50.9       | -4.3           | 1271  | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 50.39      | -5.33      | 50.67    | -6.03          | 50.95            | 11.01             | 56.98           | 537.02       | 0.90          |
| 40            | 50.7       | -5.5           | 946   | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 50.19      | -6.86      | 50.66    | -7.79          | 51.13            | 10.64             | 54.94           | 399.21       | 0.89          |
| 50            | 50         | -6.6           | 758   | -90                 | 5.89          | 83.8              | 49.58      | -8.33      | 50.27    | -9.54          | 50.98            | 10.49             | 53.99           | 318.20       | 0.89          |
| 60            | 50.5       | -8.2           | 626   | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 50.14      | -10.19     | 51.17    | -11.49         | 52.21            | 10.32             | 52.90           | 256.86       | 0.86          |
| 70            | 49.4       | -9             | 536   | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 49.11      | -11.44     | 50.43    | -13.11         | 51.78            | 10.23             | 52.18           | 219.97       | 0.86          |
| 80            | 48         | -10.1          | 465   | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 47.79      | -12.88     | 49.50    | -15.08         | 51.26            | 10.46             | 53.02           | 192.16       | 0.86          |
| 90            | 46.7       | -10.8          | 413   | -90                 | 10.45         | 86.1              | 46.56      | -14.00     | 48.62    | -16.74         | 50.77            | 10.47             | 52.78           | 170.38       | 0.85          |
| 100           | 45.1       | -11            | 369   | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 45.07      | 14.76      | 47.43    | 18.13          | 49.91            | 10.44             | 2.62            | 154.00       | 0.49          |

|           |                |
|-----------|----------------|
| cte celda |                |
| Ca        | 0.1924<br>6578 |
| K         | 7.27E-<br>08   |



| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita<br>+ Na <sub>2</sub> S<br>2x10 <sup>-3</sup> +<br>XINa | pH 9                | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|--|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire  | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0   | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | /Zx/     | 0x             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 22.2       | -0.2           | 75000  | -90                 | 0.5           | 12.3              | 21.71      | -0.18      | 21.71    | -0.47          | 21.71            | 119.81            | 622.48          | 76167.42     | 2.12          |
| 1          | 22.4       | -0.2           | 38000  | -90                 | 0.52          | 16.8              | 21.90      | -0.22      | 21.90    | -0.56          | 21.90            | 71.42             | 371.06          | 37749.71     | 2.10          |
| 2          | 21.9       | 1.4            | 19000  | -90                 | 0.57          | 26.9              | 21.38      | 0.30       | 21.39    | 0.81           | 21.39            | -52.61            | -273.38         | 19334.43     | 2.15          |
| 5          | 21.6       | 5.4            | 7570   | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 20.96      | 1.49       | 21.02    | 4.07           | 21.07            | -107.60           | -559.65         | 7865.44      | 2.19          |
| 10         | 21.7       | 10.7           | 3780   | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 20.73      | 2.95       | 20.94    | 8.10           | 21.15            | -107.14           | -558.94         | 3941.16      | 2.19          |
| 20         | 22.6       | 20.1           | 1880   | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 20.46      | 5.60       | 21.22    | 15.31          | 22.00            | -99.02            | -522.43         | 1938.39      | 2.16          |
| 30         | 23.8       | 28.7           | 1271   | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 19.91      | 8.12       | 21.50    | 22.19          | 23.22            | -93.19            | -500.60         | 1270.33      | 2.12          |
| 40         | 25.8       | 36.9           | 946  | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 19.32      | 10.96      | 22.21    | 29.57          | 25.54            | -88.41            | -486.92         | 912.86       | 2.03          |
| 50         | 28.4       | 44.4           | 758  | -90                 | 5.89          | 83.8              | 18.62      | 14.01      | 23.30    | 36.96          | 29.16            | -82.14            | -466.27         | 682.89       | 1.90          |
| 60         | 32.2       | 51.2           | 626  | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 15.39      | 19.34      | 24.71    | 51.49          | 39.69            | -83.99            | -502.47         | 471.17       | 1.57          |
| 70         | 37.5       | 57.1           | 536  | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 15.46      | 23.21      | 27.89    | 56.34          | 50.32            | -67.85            | -413.43         | 332.77       | 1.30          |
| 80         | 459        | 61             | 465  | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 60.46      | 221.35     | 229.46   | 74.72          | 870.82           | -8.36             | -44.37          | 12.38        | 0.06          |
| 90         | 59.8       | 60.7           | 413  | -90                 | 10.45         | 86.1              | 30.00      | 33.53      | 44.99    | 48.18          | 67.47            | -29.29            | -169.00         | 170.01       | 0.85          |
| 100        | 80.4       | 50.3           | 369  | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 76.14      | 5.19       | 76.32    | 3.90           | 76.50            | 1.42              | 0.34            | 109.28       | 0.43          |

|           |                |
|-----------|----------------|
| cte celda |                |
| Ca        | 0.1924<br>6578 |
| K         | 7.27E-<br>08   |



| 22-abr-15  |            | 1g             | Malaquita +<br>Na <sub>2</sub> S 2x10 <sup>-3</sup> +<br>XINa | pH 10               | MB            |                   |            |            |          |                |                  |                   |                 |              |               |
|------------|------------|----------------|---|---------------------|---------------|-------------------|------------|------------|----------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Frecuencia | Impedancia | Ángulo de fase | Impedancia Aire   | Angulo de fase Aire | Impedancia Hg | Angulo de fase Hg | Parte real | Parte imag | Magnitud | Angulo de fase | Resistencia real | Capacitancia real | cte dielectrica | Perd dielect | Conductividad |
| (Mhz)      | Zm         | Om (°)         | Z0  | O0                  | Zs            | Os                | Rx         | Xx         | Zx       | 0x             | Rx (ohms)        | Cx (pF)           | e'              | e''          |               |
| 0.5        | 24         | -1.9           | 75000   | -90                 | 0.5           | 12.3              | 23.50      | -0.89      | 23.52    | -2.18          | 23.53            | 514.93            | 2675.29         | 70271.46     | 1.95          |
| 1          | 24.2       | -0.7           | 38000   | -90                 | 0.52          | 16.8              | 23.70      | -0.43      | 23.70    | -1.04          | 23.71            | 121.94            | 633.56          | 34875.48     | 1.94          |
| 2          | 24.1       | 1.1            | 19000   | -90                 | 0.57          | 26.9              | 23.59      | 0.24       | 23.59    | 0.57           | 23.59            | -33.66            | -174.89         | 17530.00     | 1.95          |
| 5          | 24.6       | 5.3            | 7570  | -90.1               | 0.8           | 48.6              | 23.95      | 1.75       | 24.01    | 4.18           | 24.08            | -96.63            | -502.52         | 6881.09      | 1.91          |
| 10         | 25.4       | 10.6           | 3780  | -90.1               | 1.31          | 65.5              | 24.36      | 3.64       | 24.63    | 8.50           | 24.90            | -95.46            | -497.78         | 3344.67      | 1.86          |
| 20         | 26.7       | 20.1           | 1880  | -89.9               | 2.44          | 76.2              | 24.24      | 7.09       | 25.26    | 16.30          | 26.32            | -88.44            | -465.80         | 1614.69      | 1.80          |
| 30         | 28.5       | 28             | 1271  | -90.1               | 3.59          | 80.5              | 24.04      | 10.18      | 26.11    | 22.95          | 28.35            | -79.25            | -423.49         | 1029.24      | 1.72          |
| 40         | 31.1       | 36.9           | 946   | -90.1               | 4.75          | 82.2              | 23.26      | 14.22      | 27.26    | 31.44          | 31.95            | -76.15            | -415.73         | 716.29       | 1.59          |
| 50         | 34.9       | 44.2           | 758   | -90                 | 5.89          | 83.8              | 22.83      | 18.47      | 29.36    | 38.97          | 37.77            | -68.18            | -380.58         | 508.15       | 1.41          |
| 60         | 39.8       | 51             | 626   | -90.1               | 7.04          | 84.5              | 19.06      | 25.20      | 31.59    | 52.89          | 52.37            | -66.96            | -387.09         | 330.03       | 1.10          |
| 70         | 46.8       | 56.6           | 536   | -90.2               | 8.23          | 85.3              | 19.40      | 30.35      | 36.02    | 57.41          | 66.88            | -53.19            | -310.75         | 226.85       | 0.88          |
| 80         | 57.7       | 60.2           | 465   | -90.2               | 9.35          | 85.8              | 23.00      | 36.99      | 43.56    | 58.13          | 82.50            | -38.78            | -225.08         | 158.47       | 0.71          |
| 90         | 75.6       | 59.7           | 413   | -90                 | 10.45         | 86.1              | 37.42      | 43.55      | 57.42    | 49.33          | 88.11            | -23.36            | -131.56         | 123.39       | 0.62          |
| 100        | 102.5      | 48.7           | 369   | -89.8               | 11.58         | 86.7              | 94.57      | 14.92      | 95.74    | 8.97           | 96.92            | 2.59              | 10.08           | 87.04        | 0.48          |

|           |            |
|-----------|------------|
| cte celda |            |
| Ca        | 0.19246578 |
| K         | 7.27E-08   |

