

Estudio electroquímico de la reducción de telurio y plata de soluciones ácidas de Ag_2Te

Citlalli de Lara Ortiz, Omero Alonso González, Simón Bello Teodoro, Juan Antonio González Anaya

Universidad Autónoma de Zacatecas, Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Av. Ramón López Velarde 801, Zacatecas, Zac. CP 98000

citlalli.dlara@gmail.com

Resumen: Se presenta el estudio electroquímico para encontrar el potencial de reducción en medio ácido de telurio y plata de un mineral refractario a la cianuración llamado Hessita (Ag_2Te). Se realizó la modelación termodinámica del sistema ($\text{Ag}=50\text{ppm}$ y $\text{Te}=500\text{ppm}$) encontrando que las especies presentes son los iones H_3TeO_3^+ y Ag^+ a pH ácido (0.35). También se obtuvieron los potenciales de reducción del telurio de -350mV (vs Ag/AgCl) y de la plata de 180mV (vs Ag/AgCl) por medio de pruebas electroanalíticas como voltametrías cíclicas y lineales. Por último, se calcularon los coeficientes de difusión al realizar cronoamperometrías, obteniendo un coeficiente de difusión de $1.237 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ para la plata y $1.04 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ para el telurio.

Palabras clave: electroquímica, plata, telurio.

Abstract: The electrochemical study is presented to find the reduction potential in an acid medium of tellurium and silver of a refractory mineral to cyanidation called Hessite (Ag_2Te). The thermodynamic modeling of the system was carried out ($\text{Ag}=50\text{ppm}$ and $\text{Te}=500\text{ppm}$) finding that the species present are the H_3TeO_3^+ and Ag^+ ions at acid pH (0.35). The reduction potentials of tellurium of -350mV (vs Ag/AgCl) and of silver of 180mV (vs Ag/AgCl) were also obtained by electroanalytical tests such as cyclic and linear voltammetries. Finally, the diffusion coefficients were calculated when carrying out chronoamperometries, obtaining a diffusion coefficient of $1.237 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ for silver and $1.04 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ for tellurium.

Keywords: electrochemistry, silver, tellurium.

1. Introducción

La minería, ha formado parte importante de la historia y el desarrollo económico de México y, al ser productor de metales de valor agregado, esta actividad se ha convertido en la segunda fuente generadora de divisas para el país, ya que la demanda nacional e internacional de los metales preciosos se ha incrementado con el paso de los años [1].

La plata ha sido uno de los metales de mayor importancia tanto en la vida cotidiana como en la industria debido a la gran cantidad de propiedades que posee; en la actualidad, es empleada en el desarrollo de aleaciones para motores, celdas solares, así como en el campo de la medicina; desafortunadamente, se ha vuelto difícil encontrar este elemento de forma nativa, lo cual, crea la necesidad de investigar nuevas rutas de obtención en menas de baja ley o bien, de reservas que contienen minerales más complejos; entre estos se encuentran los telururos de plata y oro, los cuales generan gran interés debido a que en los últimos años, la importancia del telurio se ha incrementado al ser empleado en el desarrollo de energía solar, así como en la investigación de semiconductores. Sin embargo, los minerales en que se encuentran los telurios asociados con plata (hesita (Ag_2Te), silvanita ($(\text{Ag},\text{Au})_2\text{Te}_4$), la petzita (Ag_3AuTe_2)), son considerados como refractarios a la cianuración, debido a la dificultad que se presenta al tratarlos por el método convencional de lixiviación. Por esta razón, es necesario

realizar un pre-tratamiento oxidativo a estos minerales que permita las condiciones adecuadas para la interacción de los valores metálicos con el agente acomplejante liberando los metales de interés con el propósito de disolverlos y posteriormente recuperarlos [2]. Para ello se han encontrado diversas técnicas tales como la oxidación a presión, cloración, ozonación, entre otras, la técnica oxidativa o pre-oxidativa a emplear en las plantas de operación, dependerá de las características de los minerales a tratar y de los recursos e instalaciones con los que cuente la planta [1][3].

Una vez que el mineral está disuelto, es necesario emplear un método que pueda recuperar los metales de forma selectiva de las soluciones, es por ello que el objetivo de este proyecto es realizar un estudio electroquímico para la reducción de plata y telurio en soluciones ácidas, que permita conocer el potencial de reducción de cada metal y los coeficientes de difusión de los mismos, con la finalidad de emplear la técnica de electrodeposición como método de recuperación [4]. Este estudio es posible empleando los métodos electro-analíticos como voltametrías lineales, cíclicas y cronoamperometrías, los cuales ayudan a encontrar información sobre la naturaleza de los procesos involucrados, así como la cinética de reacción y las condiciones bajo las cuales se reducen los metales encontrados en el sistema [5][6]. Al mismo tiempo, la información obtenida del análisis electroquímico hace posible el cálculo de los coeficientes de difusión de los metales al emplear la

ecuación de Cottrell (1), que muestra la relación que existe entre la intensidad de corriente (I), la concentración inicial de las especies (C_0^*), el área de trabajo (A), el coeficiente de difusión (D) y el tiempo (t) en el que se realiza la prueba [7].

$$I = \frac{nFAD^{1/2}C_0^*}{\pi^{1/2}t^{1/2}} \quad (1)$$

2. Metodología

En esta sección, se dan a conocer los reactivos y equipos empleados para llevar a cabo las pruebas, así como las condiciones que se utilizaron. La metodología experimental de este trabajo de investigación se muestra en la Fig. 1.

2.1 Modelación termodinámica

Con el objetivo de conocer el comportamiento termodinámico de los diferentes sistemas de estudio, se elaboraron diagramas de distribución de especies empleando el software Spana© y se construyeron diagramas de Pourbaix con la ayuda de una hoja de cálculo en Excel y datos termodinámicos del software Spana© Versión 2018 Oct 10.

2.2 Elaboración de soluciones sintéticas

Para preparar las soluciones sintéticas de telurio y plata que se utilizaron en el estudio electroquímico, se emplearon compuestos grado reactivo y agua desionizada. Las soluciones de plata fueron elaboradas a partir de un estándar de plata disuelto en ácido nítrico al 3% (AccuStandard 99.99%), mientras que para las soluciones de telurio se utilizó un estándar de telurio igualmente disuelto en ácido nítrico al 3% (Ricca Chemical 99.99%). Para modificar el pH de las soluciones se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) con concentraciones de 0.1M y 1M y ácido nítrico (HNO₃) 1 y 2 M.

Las concentraciones experimentales para preparar las muestras se presentan a continuación:

- 500 ppm de Te, pH=0.35.
- 50 ppm de Ag, pH=0.35.
- 500 ppm de Te y 50 ppm de Ag pH=0.35.

Una vez elaboradas las soluciones, se realizó el estudio electroquímico.

2.3 Estudio electroquímico

3.3.1 Equipo y electrodos de trabajo: Se fabricó la celda electroquímica con capacidad de 100mL la cual se muestra en la Fig. 2. Tiene una configuración típica de tres electrodos: un electrodo de trabajo de acero inoxidable con un área superficial de 0.7125cm², un contra electrodo que consiste en una barra de grafito de alta pureza (Alfa Aesar 99.9%) y un electrodo de referencia de Ag/AgCl saturado con KCl (0.197V vs ENH), acoplado a un capilar de Luggin para evitar la contaminación de la solución de referencia y el electrolito, también cuenta con un burbujeador de nitrógeno para eliminar el oxígeno de la solución. La celda electroquímica se conectó a un potenciostato galvanostato (VersaSTAT 3), el cual mide los cambios de

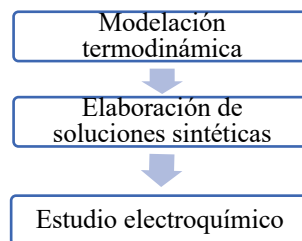


Fig. 1 Metodología para la reducción de telurio y plata

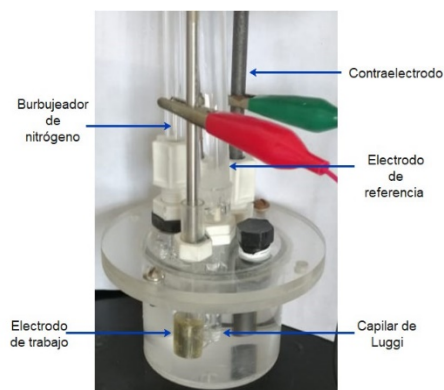


Fig. 2 Celda para realizar estudios electroquímicos

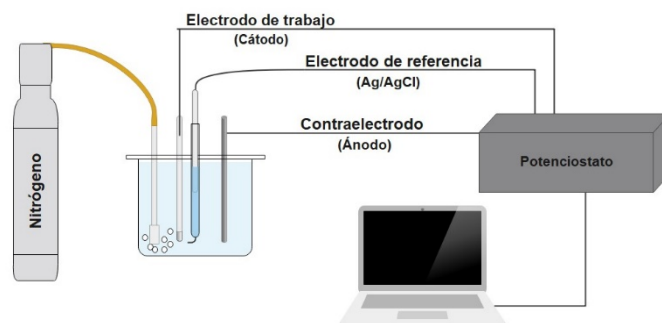


Fig. 3 Esquema del arreglo experimental

intensidad de corriente en función del voltaje aplicado y el análisis de datos se realizó mediante el software VersaStudio®. En la Fig. 3 se muestra un esquema del arreglo experimental con el que se llevaron a cabo las pruebas.

3.3.2 Análisis electroquímico: A continuación, se muestran las condiciones experimentales para llevar a cabo el análisis electroquímico de los sistemas Ag-H₂O, Te-H₂O, Ag-Te-H₂O:

- 100mL de solución [Ag]=50 ppm.
- 100mL de solución [Te]=500 ppm.
- 100mL de solución [Ag]=50 ppm y [Te]=500 ppm.
- pH = 0.35.
- T = 25°C.

Las velocidades de barrido que se utilizaron en cada uno de los sistemas se incrementan de 10 en 10 desde 20mV/s hasta 100mV/s, 200mV/s y 300mV/s.

3. Resultados

3.1 Modelación termodinámica

Para conocer las especies presentes en las soluciones de telurio y plata, se elaboraron diagramas de distribución de especies, dando a conocer los compuestos que se formarán bajo ciertas condiciones de pH y concentración.

La Fig. 4 representa el diagrama de distribución de especies del sistema Te(IV)-H₂O, en el cual se observa que en medio ácido, el ion que tiene presencia es el ion teluril ($H_3TeO_3^+$) [7]. En el diagrama se aprecia que el rango de trabajo es pequeño, ya que a un pH mayor a 1 ocurre la precipitación de la especie sólida TeO_2 , lo que provoca la pasivación de la superficie del electrodo de trabajo, por lo que se sugiere trabajar en un rango de pH desde 0 a 1 en donde aparece únicamente la especie iónica.

Se presenta también el diagrama de distribución de especies para la plata (Fig. 5), en donde se observa que la especie iónica de plata (Ag^+) se presenta en un mayor rango de pH comparada con el telurio, que va desde 0 hasta 11.5.

Los diagramas de Pourbaix muestran de manera gráfica el potencial en función del pH para especies metálicas que se encuentran en condiciones estándar.

En la Fig. 6 se muestra el diagrama del sistema Te-H₂O, donde se observan las distintas zonas de estabilidad de las especies del telurio. Se aprecia que el Te^0 ocupa una amplia zona del diagrama, lo que significa que es estable en un rango amplio de potenciales a distintos pH. Con este diagrama se confirma la existencia de una sola especie iónica en medio ácido (área mostrada en azul) [7]. De igual forma sugiere que el potencial de reducción a partir de esta especie a Te^0 , es por debajo de un potencial de 0.36V (vs Ag/AgCl).

Para el sistema Ag-H₂O (Fig. 7) se encuentra que la zona de inmunidad de la plata metálica (Ag^0) es muy amplia, esto indica que es estable en un extenso rango de potenciales a diferentes pH, todo esto en comparación con sus otros compuestos y al igual que en el diagrama de distribución de especies, en medio ácido se encuentra a la plata como ion (Ag^+), en un rango amplio de pH y en función del potencial se entre 0.44V a 1.65V (Ag/AgCl) (área en azul).

3.2 Análisis electroquímico

Algunos autores mencionan que, al realizar el estudio electroquímico de sistemas con más de un metal, se deben realizar estudios individuales previos de cada una de las especies, para determinar los potenciales de reducción de dichos componentes y ver la influencia de la naturaleza y concentración de los electrolitos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las voltametrías para los sistemas Ag-H₂O, Te-H₂O y Te-Ag-H₂O [8][9].

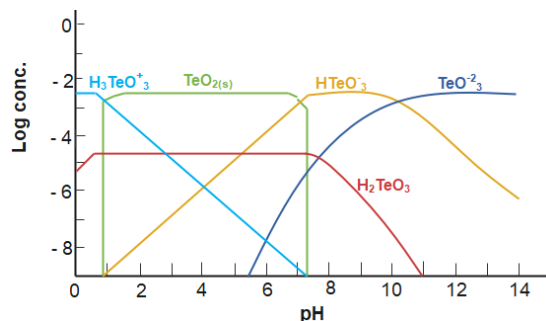


Fig. 4. Diagrama de distribución de especies del Te (IV) con una concentración de 500 ppm Te a 25°C, Software Spana© Versión 2018 Oct 10.

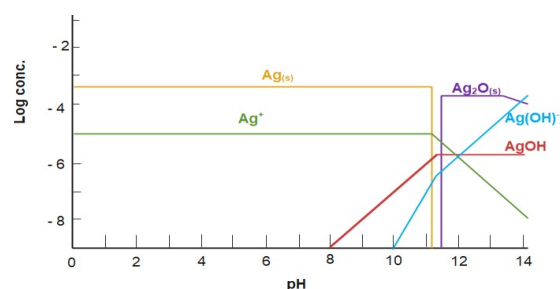


Fig. 5 Diagrama de distribución de especies de plata con una concentración de 50 ppm Te a 25°C, Software Spana© Versión 2018 Oct 10.

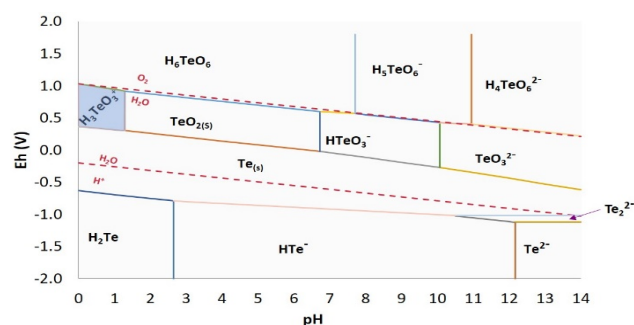


Fig. 6 Diagrama de Pourbaix del sistema Te-H₂O con concentración de 500ppm de telurio a T=25°C vs Ag/AgCl

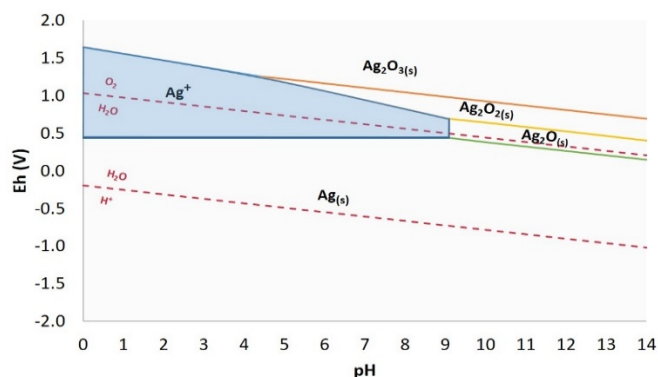
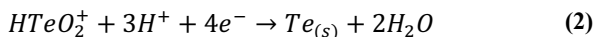


Fig. 7 Diagrama de Pourbaix del sistema Ag-H₂O a una concentración Ag=50ppm a T=25oC vs Ag/AgCl

4.2.1 Potenciales de reducción: Con la finalidad de conocer el potencial de reducción de Te(IV) a Te(0) se realizó el análisis electroquímico al sistema Te-H₂O en medio ácido.

Los estudios electroquímicos se llevaron a cabo mediante técnicas de voltametría de barrido lineal con potenciales en dirección catódica hasta 1.0 V a partir del potencial de equilibrio de la solución. En la Fig. 8 Voltamperograma de barrido lineal de reducción de Te [500ppm], T=25°C con variación de la velocidad de 20-300mV/s. Recuadro: gráfico para comprobar difusión de Te., se realizó un acercamiento en la zona que aparecen los picos de reducción con el propósito de una mejor visualización. Se observa que la corriente comenzó a ser significativa cuando el potencial aplicado fue alrededor de 100mV, lo cual indica, que la reacción de reducción de dicho elemento inicia a partir de este punto. Se considera que es un proceso rápido en comparación con el análisis realizado por Montiel Santillán et al para la reducción de telurio (IV) en ácido sulfúrico, ya que, en este estudio, los potenciales comienzan a ser significativos a partir de 500mV. En los resultados mostrados en la Fig. 8 se observa que aparece un pico de reducción en cada una de las velocidades aplicadas, éste se localiza alrededor de -200mV con intensidad de corriente entre -1 y -4mA, mismo que se puede atribuir a la reacción que se muestra en la Ec. (2) [7].

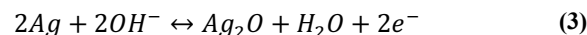


Se aprecia también que a medida que la velocidad se incrementa, tal como sucede en la recuperación de telurio en ácido clorhídrico, según lo investigado por Wei Jin et al, la intensidad de los picos crece desplazándose levemente hacia potenciales más negativos. Diversos estudios han demostrado que esto sucede debido a que el proceso que se presenta es controlado por difusión [7][10].

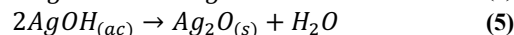
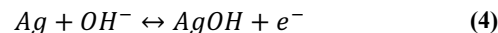
Para comprobar que se trata de un proceso controlado por difusión, se trazó un gráfico $v^{1/2}$ contra el valor absoluto de la densidad de corriente (j). Se observa que la variación es lineal (Recuadro Fig. 8 Voltamperograma de barrido lineal de reducción de Te [500ppm], T=25°C con variación de la velocidad de 20-300mV/s. Recuadro: gráfico para comprobar difusión de Te.) lo cual indica que se presenta un proceso difusional [7][10][11].

El estudio electroquímico de la plata se realizó mediante voltametrías cíclicas, en las que el barrido de potencial comenzó en sentido anódico partiendo del potencial de circuito abierto continuando hacia la zona catódica. En la Fig. 9 se muestran los voltamperogramas obtenidos en los que se observan picos de oxidación y reducción de la plata. Estos son muy similares a los encontrados en soluciones alcalinas por diversos autores [12][13][14]. Se observan cuatro picos de oxidación los cuales están nombrados como A1, A2, A3 y A4 localizados en 200, 400, 800 y 1200mV respectivamente; al invertir el potencial, aparecen tres picos de reducción localizados en potenciales de 550, 300 y 180mV nombrados como C2, C3 y C4 respectivamente.

Estudios realizados en medio alcalino por Dirkse entre otros autores, mencionan que la formación de Ag₂O se localiza en un potencial aproximado a 400mV [13]-[15]. Por este motivo, se sugiere la siguiente reacción para el pico A2 (Fig. 9):



Se sabe que en un voltamperograma, la proximidad de dos picos sugieren que el metal en cuestión reacciona formando dos compuestos distintos bajo condiciones similares por lo cual, Flores Álvares hace mención de la Ec.(4) al identificar un pico de oxidación que se localiza en 200mV (A1) y sugiere un segundo mecanismo de reacción para la formación del Ag₂O como se muestra en la Ec.(5) [12].



Se hace alusión al pico de oxidación A3 localizado en 800mV en los estudios realizados por Assaf et al. y Dirske, los cuales mencionan que se lleva a cabo la oxidación de Ag₂O a AgO, tal como se observa en los resultados mostrados en la Fig. 9 por lo que se sugiere que la reacción que se lleva a cabo en este potencial es la Ec.(6) [13][14][16]:

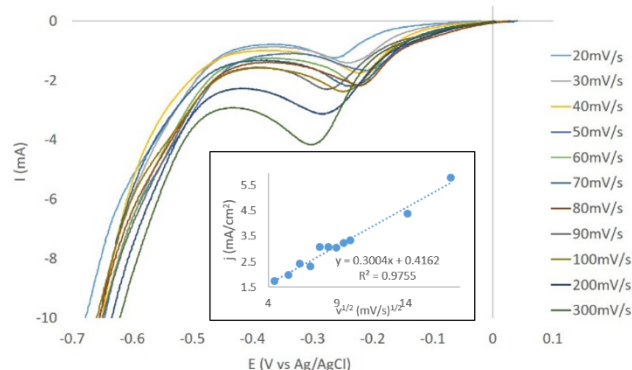
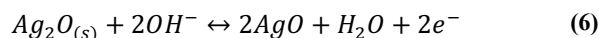


Fig. 8 Voltamperograma de barrido lineal de reducción de Te [500ppm], T=25°C con variación de la velocidad de 20-300mV/s. Recuadro: gráfico para comprobar difusión de Te.

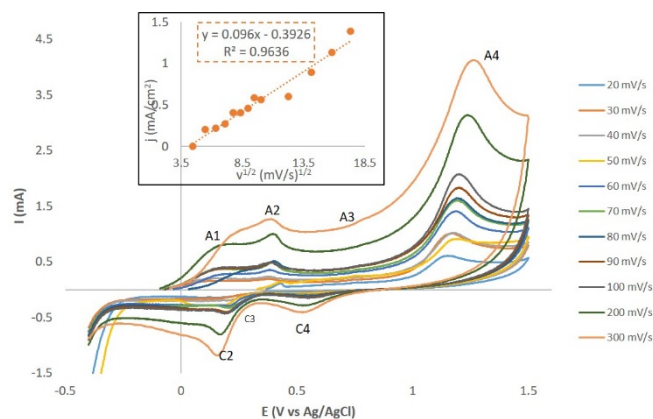


Fig. 9 Voltamperograma cíclico de Ag [50ppm], T=25°C con variación de la velocidad de 20 a 300mV/s. Recuadro: gráfico para comprobar difusión de Ag.

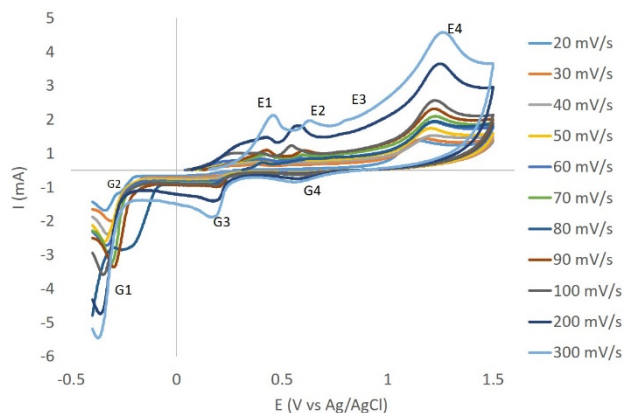


Fig. 10 Voltamperograma cíclico de Ag [50ppm], Te [500ppm] T=25°C con variación de la velocidad de 20 a 300mV/s

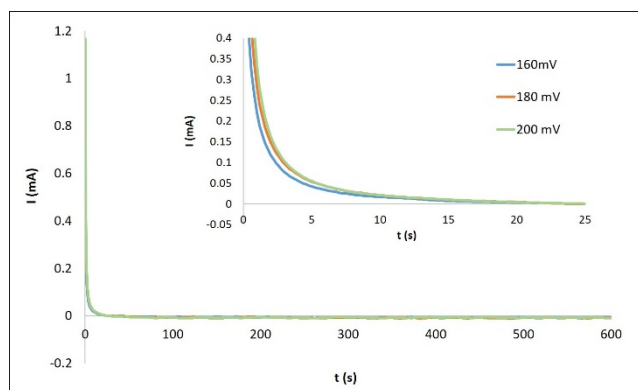


Fig. 11 Cronoamperometría de plata 50ppm, pH=0.35, T=25°C aplicando diferentes potenciales (vs Ag/AgCl) con ampliación en los primeros 25s.

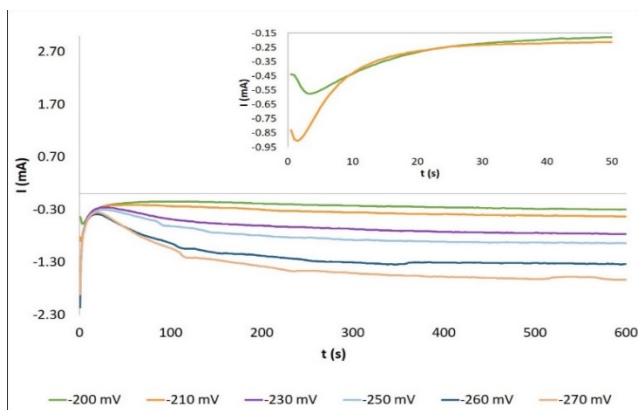
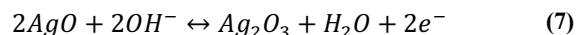


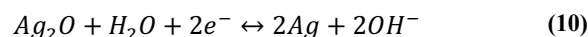
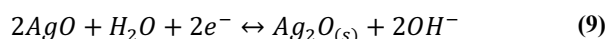
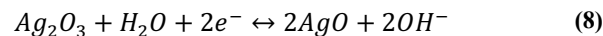
Fig. 12 Cronoamperometría de Teluro 500ppm, pH=0.35, T=25°C aplicando diferentes potenciales (vs Ag/AgCl) con ampliación en los primeros segundos de -200mV y -210mV

Algunos autores hacen mención del pico de oxidación localizado en A4 a 1200mV, y sugieren que se puede atribuir a dos cosas:

- La oxidación de la plata continúa, pasando de AgO a Ag₂O₃ como lo describe la (7) [13][14][17], o bien,
- A la evolución del oxígeno [18].



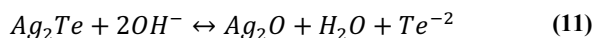
Una vez que se llega a un potencial de 1500mV, éste se invierte en sentido catódico para completar el ciclo, lo que genera tres picos de reducción. A un potencial de 550mV se localiza el primer pico de reducción C4, al que se relaciona con la Ec.(8). Siendo el inverso de la reacción que se lleva a cabo en A4, mientras que, el pico C3 se asocia con la reacción contraria de la Ec. (6) (A3) dando como resultado la Ec.(9). Mientras que el pico C2 se encuentra relacionado con la reducción de plata metálica tal como se observa en la Ec.(10) y se localiza a un potencial de 180V [16-18].



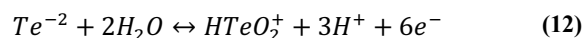
Se observa que el incremento en la velocidad de barrido marca una tendencia análoga a la que se obtuvo para el telurio, por lo cual, se trazó el mismo gráfico $v^{1/2}$ vs $|j|$ para comprobar la presencia de procesos difusionales. Éste marca una tendencia lineal, lo cual indica que, ocurre difusión en el proceso. Los parámetros de difusión se calcularon mediante técnicas cronoamperométricas presentadas en el siguiente apartado.

En muchos casos, al realizar análisis electroquímicos de soluciones con más de un elemento, los voltamperogramas resultantes consisten en la superposición de los obtenidos para los elementos puros. [9][12][16]. En el resultado obtenido para el sistema Ag-Te-H₂O (Fig. 10), se aprecia que los valores de potenciales óxido-reducción de los elementos puros se posicionan uno sobre el otro modificando un poco la magnitud de los mismos continuando con la tendencia que presentan individualmente. Se comenzó con el barrido en sentido anódico partiendo del potencial de circuito abierto hasta un potencial de 1500mV, el cual fue invertido hasta llegar a un potencial catódico de 400mV en donde aparecieron picos tanto de oxidación (E1, E2, E3 y E4) como de reducción (G4, G3, G2 y G1). Estos se localizan a 350, 550, 750, 1200mV y 575, 175, -250, -325mV respectivamente.

Al hacer una comparación entre las Fig. 9 y Fig. 10 se observa que los picos E3, E4, G4 se llevan a cabo a potenciales similares que A3, A4 y C4 lo cual indica que se llevarían a cabo las reacciones mostradas en las ecuaciones (6), (7) y (8). Mientras que en E1 se produce la oxidación de la plata a partir de Ag₂Te probablemente con la siguiente reacción:



Esto deja al telurio como ion telururo (Te⁻²) el cual, de acuerdo con Flores Álvarez, es inestable en presencia de oxígeno, por lo que se puede estar oxidando para formar la especie HTeO₂⁺ mediante la siguiente reacción [12]:



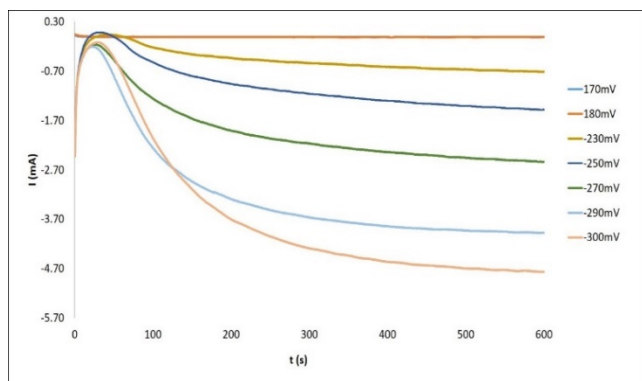


Fig. 13 Cronoamperometría de Teluro de plata Te 500ppm Ag 50ppm, T=25°C pH=0.35

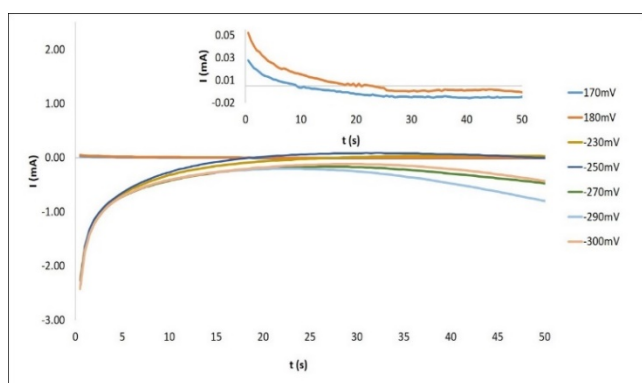


Fig. 14 Ampliación de cronoamperometría de Teluro de plata Te 500ppm Ag 50ppm, T=25°C pH=0.35

El pico E2, se puede asociar a la oxidación de la plata encontrada en el teluro de plata (Ag_2Te) ya que se encuentra en potenciales similares a los que se observa dicha reacción para la plata elemental, esto podría ocurrir mediante la siguiente reacción:



En los picos G3, G2 y G1, es probable que se esté llevando a cabo la reducción de AgO , Ag_2O y $HTeO^{+2}$ mediante las reacciones mostradas en las ecuaciones (2), (9) y (10).

4.2.2 Cronoamperometrías: Con el propósito de entender el proceso de difusión durante la reducción de Te y Ag en una solución ácida, se calcularon los coeficientes de difusión para cada metal por separado, para ello se utilizó la técnica de cronoamperometría y los resultados se muestran a continuación.

Inicialmente se realizaron las pruebas cronoamperométricas para el sistema $Ag-H_2O$, a potenciales que van de 160mV hasta 200mV (vs $Ag/AgCl$) durante 600s. Los resultados se muestran en la Fig. 11, donde se observa que cada una de las curvas tiene un comportamiento similar, con una caída de intensidad durante los primeros cinco segundos, esto se debe al gradiente de concentración en el seno del líquido y la superficie del electrodo en donde se llevó a cabo la transferencia de masa, ya que la superficie del electrodo contiene depósito que limita la difusión de

la plata demostrando que se ha llegado a la corriente límite de difusión. Al transcurrir los primeros veinte segundos de la prueba, la caída de corriente es prácticamente nula, lo que indica que la reducción continúa lentamente sin provocar cambios significativos de concentración.

En la Fig. 12 se muestran las pruebas cronoamperométricas para el sistema $Te-H_2O$, aplicando una serie de potenciales que van de los 200 a 270mV (vs $Ag/AgCl$) cercanos al potencial de reducción de telurio (IV) (-250mV vs $Ag/AgCl$). Se observa que a -200mV y -210mV (vs $Ag/AgCl$) (potenciales menores al de reducción) hay un aumento en la intensidad de corriente durante los primeros segundos, esto se debe muy probablemente a que el $Te(IV)$ no se reduce por completo a estos potenciales, desarrollándose alguna otra reacción en un corto periodo para posteriormente seguir la tendencia que se obtiene con el potencial de reducción. La caída de la intensidad de corriente se observa en los primeros veinte segundos, a este tiempo se considera que se ha alcanzado la corriente límite de difusión. Después de este periodo, se observa que los gráficos no tienden a cero, sino que la intensidad de corriente comienza a aumentar progresivamente. Esto podría ser consecuencia de la redisolución del telurio depositado sobre la superficie del electrodo o a la formación de otra especie, por lo tanto, se confirma que el proceso de reducción del telurio no es exclusivamente difusiva [19].

Finalmente, se realizó el análisis cronoamperométrico del sistema $Ag-Te-H_2O$ aplicando potenciales de 170mV a -300mV (vs $Ag/AgCl$) con el propósito de conocer el comportamiento al aplicar los potenciales de reducción de cada uno de los metales y a potenciales cercanos a ellos. En la Fig. 13 se muestran los resultados obtenidos, en donde se observa una tendencia similar a la de los sistemas individuales. Para el caso del telurio en los sistemas $Te-H_2O$ y $Ag-Te-H_2O$ se presenta la caída de intensidad de corriente durante los primeros veinte segundos, pasado este tiempo, el incremento en la corriente es mayor en el sistema $Ag-Te-H_2O$. En la Fig. 14 se muestra una ampliación de los primeros 50s de la prueba con la finalidad de conocer el comportamiento del sistema al aplicar potenciales positivos. Se encontró que, la caída de corriente en el sistema es rápido, indicando que la pasivación del electrodo ocurre con mayor velocidad si se compara el sistema $Ag-Te-H_2O$ con el $Te-H_2O$ (ver Fig. 12). Se puede decir que el potencial de reducción de cada uno de los elementos es muy diferente uno del otro.

En base a la información obtenida en los estudios cronoamperométricos, se calculan los coeficientes de difusión para la plata y el telurio en los sistemas individuales; se grafica el inverso de la raíz cuadrada del tiempo ($t^{-1/2}$) contra la intensidad de corriente (I) con la finalidad de observar la relación que existe con la ecuación de Cottrell (Ec. (1)). Los gráficos se realizaron con la información generada al aplicar los potenciales de reducción de cada metal, 180mV (vs $Ag/AgCl$) para la plata y -250mV (vs $Ag/AgCl$) para el telurio, los intervalos de tiempo que se tomaron fueron de 5s a 20s ya que, es la región que se ve menos afectada por procesos no faradaicos, los cuales no dependen de la reacción electroquímica [20].

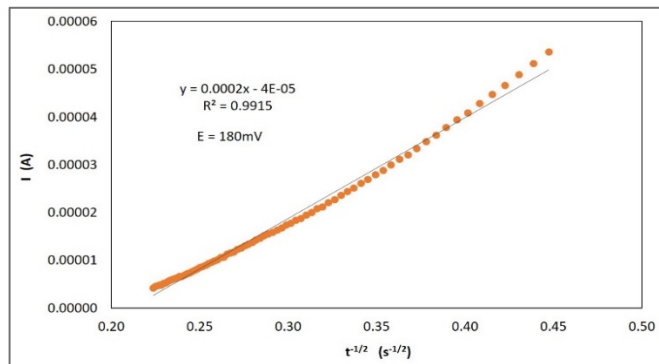


Fig. 15 Curva de Cottrell para el sistema Ag-H₂O, [Ag]=50ppm, pH=0.35, E = 180mV

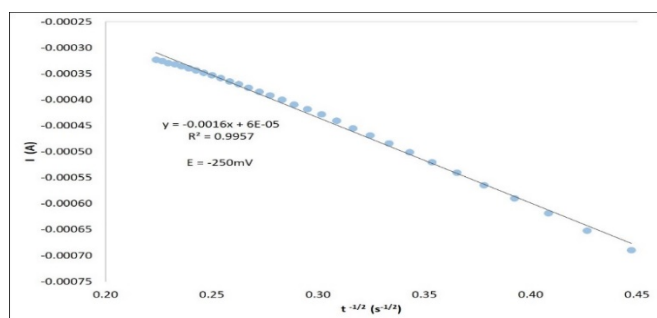


Fig. 16 Curva de Cottrell para el sistema Te-H₂O, [Te]=500ppm, pH=0.35, E=-250mV

En la Fig. 15 se representan los datos de la plata, es evidente el comportamiento lineal con un coeficiente de correlación (R) igual a 0.9915 y una pendiente ($dI/dt^{-1/2}$) de $0.0002A/s^{-1/2}$, a partir de la cual se calcula el coeficiente de difusión por medio de la Ec. (14) donde n es el número de electrones que interfieren, F corresponde a la constante de Faraday ($96500A*s/mol$) y C^* es la concentración inicial del metal [21][22].

$$D = \frac{(dI/dt^{-1/2})^2 \pi}{(nFAC^*)^2} \quad (14)$$

Se obtiene que el valor del coeficiente de difusión de la plata en medio ácido es de $1.237 \times 10^{-4} cm^2/s$, el cual es mayor que el reportado en la literatura por Palomar Pardavé en medio acuoso amoniacal $2.55 \times 10^{-5} cm^2/s$ [23].

Para el telurio, se muestra la relación en la Fig. 16 el cual sigue una linealidad con un coeficiente de linealidad de 0.9957. Aplicando la Ec. (14) obtenemos un coeficiente de difusión para el telurio de $1.04 \times 10^{-5} cm^2/s$ el cual es mayor que el encontrado por Nevarez Llamas en medio alcalino ($1.75 \times 10^{-6} cm^2/s$) y por Montiel Santillán et al en ácido sulfúrico ($3.33 \times 10^{-6} cm^2/s$) [6][7].

Los valores obtenidos demuestran que el proceso de difusión de plata es mayor que la del telurio en el presente sistema reafirmando lo observado en la Fig. 14, en donde se aprecia que el tiempo de pasivación del electrodo es menor al aplicar el potencial de reducción de la plata.

4. Conclusiones

- Con la modelación termodinámica de los sistemas Te-H₂O, Ag-H₂O y Ag-Te-H₂O en medio ácido, se encontró que las especies que están presentes son el ion teluril ($H_3TeO_3^+$) y el ion de plata (Ag^+). Los cuales se estudiaron electroquímicamente para conocer los potenciales de reducción.
- Se encontró que la reducción del telurio se lleva a cabo a $-250mV$ (vs Ag/AgCl) y la de la plata metálica a $180mV$ (vs Ag/AgCl). Al tener ambos elementos en solución la reducción de telurio se lleva a cabo a $-325mV$ (vs Ag/AgCl) mientras que la plata se reduce a $-250mV$ (vs Ag/AgCl).
- Se calcularon los coeficientes de difusión de la plata y el telurio, obteniendo valores de $1.237 \times 10^{-5} cm^2/s$ para la plata y $1.04 \times 10^{-6} cm^2/s$ para el telurio.

5. Reconocimientos

Los materiales y equipo utilizados en el presente proyecto fueron brindados por la Universidad Autónoma de Zacatecas, institución en la que se desarrolló la investigación con ayuda de la beca de maestría proporcionada por el CONACYT.

Referencias

- Parga J.R., Carrillo F.R., Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios, Rev. Metalurgia, Vol.32, 1996, pp. 254–261.
- Ellis S., Treatment of gold-telluride ores, Developments in Mineral Processing, Vol.15, 2005, pp. 973–984.
- Zhang J., Zhang Y., *et al*, Processing technologies for gold-telluride ores, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol.17, 2010, pp.1–10.
- Nava Hernández D.U., “Electrodeposición y caracterización de recubrimientos de Ni-P”, Tesis de maestría, Facultad de electroquímica, cideteq 2013, pp. 19-24.
- Bard A.J., Faulkner L.R., Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 2000.
- Nevarez Llamas E.D., Estudio de la reducción electroquímica de telurio en soluciones alcalinas de escorias generadas en la refinación de plata, 2018.
- Montiel-Santillán T., Solorza O., Sánchez H., Electrochemical research on tellurium deposition from acid sulfate medium, J. Solid State Electrochemistry Vol.6, 2002, pp.433–442.
- Landolt D., Electrochemical and materials science aspects of alloy deposition*, Electrochim. Acta, Vol.39, 1994, pp.1075-1094.
- Rudnik E., Kozłowski J., Electrochemical studies on the codeposition of copper and tellurium from acidic nitrate solution, Electrochim. Acta, Vol.6, 2013, pp.433-442.
- Wei Jin H.L., *et al*, Efficient electrochemical recovery of fine tellurium powder from hydrochloric acid media via mass transfer enhancement, Sep. Purif. Technol. (2018).
- W. Jin, M. Hu, J. Hu, Selective and efficient electrochemical recovery of dilute copper and tellurium from acidic chloride solutions, 2018.
- Flores-Álvarez J.M., Nava-Alonso F., Uribe-Salas A., Análisis del comportamiento electroquímico de la plata, telurio y telururo de plata en solución alcalina de cianuro: estudio voltamperométrico, Memorias Del XXVII Congr. Int. Metal. Extr., 2018 pp.72–92.
- Dirkse T.P., A potentiodynamic study of the electrolytic formation

- of AgO, *Electrochim. Acta*, Vol.34, 1989, pp.647-650.
- [14] Dirkse T.P., A potentiostatic study of the electrolytic formation of AgO, *Electrochim. Acta*, Vol.35, 1990, pp.1445-1449.
- [15] Ambrow J., Barradas R.G., The electrochemical formation of Ag₂O in KOH electrolyte, Vol.19, 1974, pp.781-786.
- [16] Assaf F.H., *et al.*, Cyclic voltammetric studies of the electrochemical behaviour of copper ± silver alloys in NaOH solution, Elsevier, Vol.187, 2002, pp.18–27.
- [17] Sato N., Shimizu Y., Anodic oxide on silver in alkaline solution, *Electrochim. Acta*, Vol.18, 1973, pp.567–570.
- [18] M. Pourbaix, Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions, 1967.
- [19] Traore M., Modolo R., Vittori O., Electrochemical behaviour of tellurium and silver telluride at rotating glassy carbon electrode, *Electrochim. Acta*, Vol.33, 1988, pp.991–996.
- [20] Piratoba Morales U., Vera López E., Ortiz Otálora C., Aspectos básicos en la interpretación de diagramas de impedancia electroquímica, Vol.77, 2010, pp.13–19.
- [21] Quiroz Martínez R., Determinación electroquímica del coeficiente de difusión para Gd (III), Tesis de licenciatura, Área académica en materiales y metalurgia, Universidad Autónoma de Hidalgo, 2006, pp.10-66.
- [22] Gómez-Peña Á., Arcila-Henao J.S., Evaluación del sistema electroquímico de Pd(NH₄)₄Cl₂ sobre sustrato de aluminio, *Revista de física*, Vol.45, 2012, pp.44–54.
- [23] Palomar Pardavé M.E., Determinación de los parámetros cinéticos en el proceso de electrocristalización de la plata sobre carbón vítreo, a partir de disoluciones amoniacales, Tesis de maestría, Facultad de química, Universidad Autónoma Metropolitana, 1995, pp.68-146.