

DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DE REFINACION ELECTROLITICA DE UN BULLION DE ORO Y PLATA

Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)

**GARCIA J.A., PARRA R., MONTENEGRO C.A., GOMEZ A.A., NUÑEZ
E.A., DE LA IGLESIA D., MATAR J.A., VILLAS BOAS R.**

Septiembre de 2005



SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

Presidente: Dr. Eduardo O. Zappettini

Secretaria Ejecutiva: Lic. Silvia Chavez

INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

Director: Dr. Martín Gozalvez

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA MINERA

Director: Lic. Guillermo Cozzi

"DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE UNA PLANTA PILOTO DE REFINACION ELECTROLITICA DE UN BULLION DE ORO Y PLATA"

J.A. GARCIA¹; R. PARRA¹; C.A. MONTENEGRO¹; A.A. GOMEZ¹; E.A. NUÑEZ¹; D. DE la IGLESIA¹; J.A. MATAR¹; R. VILLAS BOAS².

El presente trabajo de investigación tuvo como objeto el diseño, construcción y puesta en marcha de una Planta refinadora de oro y plata a partir de un bullion impuro que contenía dichos metales en una proporción de 10 y 75%, respectivamente.

Se diseñaron y ejecutaron pruebas experimentales, con el auxilio de métodos de análisis estadísticos de experimentos, tales como Plackett-Burman y factoriales. Luego de definido el rango de variables, se estudió la influencia de éstas, sobre la pureza del oro y plata obtenidos. Los resultados de laboratorio permitieron diseñar el equipamiento piloto que fue corrido con variables de proceso optimizados. Con los resultados obtenidos en ésta etapa, se diseñó y construyó el laboratorio comercial de refinación de oro y plata que actualmente se encuentra en funcionamiento en la empresa Yacimientos Mineros de Agua de Dionisio (YMAD), provincia de Catamarca, República Argentina.

DESIGN AND START UP OF A PILOT PLANT OF A GOLD-SILVER BULLION ELECTROLITIC REFINING.

This research work aimed as designing, building and starting up a gold-silver refining plant of an impure bullion with an average of 10 and 75%, respectively.

Different experimental test were designed and carried out using statistic analysis methodes such as Plackett-Burman and fraccionated factorials, respectivity. It was necessary to define the variable range so as to establish the influence on gold and silver fineness. Laboratory results made it possible to design the pilot equipment which was run with optimized variables of there process. Results obtained were used to design and construct the commercial laboratory of gold and silver refinery, currently being run at Yacimientos Mineros de Agua de Dionisio Enterprise (YMAD), Province of Catamarca, Argentina Republic.

¹ Instituto de Investigaciones Mineras, Universidad Nacional de San Juan - Avda. Libertador San Martín 1109 (oeste) - 5400 San Juan República Argentina.

² Director del centro de Tecnología Mineral, CETEM, Río de Janeiro, Brasil (Asesor).

INTRODUCCION

En este trabajo de investigación, se discute la metodología desarrollada, para diseñar y construir un laboratorio comercial de refinación electrolítica de plata y refinación química del oro. Dichos metales preciosos están contenidos en una aleación, "bullion", producido en la planta de precipitación Merrill-Crowe del yacimiento minero Farallón Negro, de la provincia de Catamarca, Argentina.

En esta ocasión consideraremos solamente los aspectos relacionados al ajuste de las principales variables del proceso y detallaremos las condiciones operativas de la puesta en marcha de la refinación electrolítica de plata.

ANTECEDENTES

El bullion de Farallón Negro, es un bullion de plata que contiene oro, principal metal del mismo, aunque su ley es del 10 a 15% en tanto que la plata contenida es del orden del 75 al 80%. La empresa productora consideró conveniente, por razones económicas, dejar de comercializar el bullion y comenzar a vender el oro y plata separados y puros. Por ello contrató los servicios del Instituto de Investigaciones Mineras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

La mina Farallón Negro procesa un mineral de oro y plata con leyes de 5 g/tn y 80 g/tn, respectivamente, por el conocido proceso de cianuración.

El proceso de obtención de oro y plata por cianuración, a partir de minerales, consiste de una serie de etapas, que comienzan con la lixiviación, esto es, la disolución selectiva de dichos metales, por acción del cianuro de sodio en medio alcalino. Luego de separar la ganga y sólidos no reaccionados, se tiene una solución que contiene los iones oro y plata complejados con ión cianuro.

Por un adecuado proceso de precipitación, por ejemplo, el de Merrill-Crowe, se logra por la acción reductora del zinc en polvo agregado a la solución, precipitar al oro y plata al es-

tado sólido junto con otras impurezas y exceso de reactivo. Este precipitado se seca y se funde, obteniendo una aleación, llamada bullion, que contiene junto con otras impurezas, el oro y plata al estado metálico.

Algunos yacimientos mineros comercializan dicho bullion; otros prefieren cerrar el ciclo integral de producción que comienza con la explotación y extracción del mineral y termina con la venta de los metales preciosos al estado puro. Para hacer posible esta última opción se requiere la implementación de un proceso de partición y refinación del oro y plata contenidos.

Razones técnicas y económicas que no discutiremos aquí (2), justifican la aplicación de la electrólisis como método muy adecuado para lograr estos fines.

El proceso de refinación electrolítica de plata a partir de bullions, conocido como de Moebius, logra separar la plata al estado de cristales purísimos, de hasta 9999, como depósito catódico, en tanto que el oro si estuviese en la aleación, queda como subproducto formando parte de los barros anódicos, de donde posteriormente, puede refinarse por separado, ya sea por vía electrolítica o química(1).

En nuestro caso consideraremos, en particular la electrefinación de plata a partir de un bullion de plata (ya que la aleación contiene más del 70% de este metal) y la posterior refinación química del oro contenido (10-15%) en los barros anódicos, para conseguir oro fino de pureza 999.

METODOLOGIA: Ensayos de laboratorio

El proceso de Moebius, es un método clásico de partición y refinación electrolítica, que resulta muy bien conocido en el campo de la Electroquímica Aplicada(3).

No obstante, para un bullion particular dado, resulta necesario hacer un estudio experimental para el ajuste de las variables del proceso. Esto requiere identificar las variables principales, así como definir sus rangos óptimos de operación.

Como en muchos procesos químicos, en la electrólisis del citado bullion hay variables que no son totalmente

independientes, sino que interactúan entre sí, por lo que es necesario hacer un diseño preliminar de las pruebas ó ensayos con metodologías de base científica.

Por lo tanto, en vez de realizar cantidad innumerable de experimentos, por el método clásico de una variable por vez, utilizamos el método estadístico de planeamiento y análisis de experimentos, tales como Plackett-Burman y factoriales completos y fraccionados (7,8).

Con esta metodología se logró conocer la mejor combinación experimental de las variables del proceso, qué aseguraba además de la más alta recuperación, la más alta pureza de los metales obtenidos, esto es, título 9999 para la plata fina y título 999, para el oro fino.

Así se satisfizo los requerimientos del proyecto, que exigía dicha pureza por razones de mercado.

La metodología citada incluye la caracterización química del bullion a electrolizar. La misma se realizó a través de ensayos de docimasia, "Fire Assay", y se completó con un barrido de impurezas realizadas por espectroscopía de emisión. Para ello, se dispuso de la valiosa colaboración de personal y equipamiento del Centro de Tecnología Mineral, CETEM, de Río de Janeiro, Brasil (4).

La variación de concentración de los metales de la aleación (bullion), durante el transcurso de la electrólisis, así como de los constituyentes iónicos del baño electrolítico, fueron seguidos por espectroscopía de absorción atómica, técnicas de vía húmeda y complejometría.

La calidad de los productos obtenidos, oro y plata, fueron certificados por análisis con fluorescencia de rayos X.

Para realizar los ensayos se construyeron celdas de laboratorio y de refinación de plata, tipo Moebius y Thum, y se realizaron análisis comparativos de las performances.

Se identificaron las principales variables del proceso, como densidad de corriente, composición del electrólito, acidéz y concentración del electrólito soporte.

Se determinaron curvas de variación de voltaje, y de densidad de corriente en función del tiempo.

Se estudió la disolución anódica del bullion y la depreciación de plata del electrólito, a través del trazado de las curvas correspondientes.

Se optimizó la densidad de corriente, con ensayos en celda de Hull.

Ensayos de planta piloto

Se planificaron y ejecutaron los ensayos de planta piloto, basados en los resultados de laboratorio.

Se corrieron ensayos experimentales con celdas de electrólisis de plata de tipo Moebius de 100 g de plata catódica por hora.

Se constató el óptimo funcionamiento del sistema de celdas de electrólisis y transformador-rectificador (5,6).

FUNDAMENTOS DEL METODO ELECTROLITICO DE REFINACION DE PLATA DE MOEBIUS.

Es un tradicional método de electrorrefinación de plata, que consiste en utilizar una celda de material plástico, cuyos electrodos están suspendidos verticalmente.

El electrodo positivo, o ánodo, está constituido de la aleación o bullion que se quiere particionar y refinar, es decir, separar la plata de los otros metales, principalmente oro, si lo hubiere, y de las impurezas acompañantes.

El cátodo es de acero inoxidable AISI 304 o 316, y sobre él se depositan los cristales de plata purísima, que se disuelven del ánodo o bullion impuro, pasan la solución y son transferidos por migración iónica al otro electrodo.

La solución electrolítica debe ser capaz de conducir dichos iones y disolver las impurezas menos nobles que la plata. Esta última va cayendo hacia el fondo de la cuba, a medida que va engrosando el depósito catódico en forma de cristales, cuyo tamaño y características dependen de la densidad de corriente empleada y de la composición del baño de electrólisis. Este debe contener iones plata para equilibrar la velocidad de disolución anódica con la deposición catódica de plata pura. Además conviene que contenga un electrólito soporte, para mejorar la con-

ductividad iónica de la solución y eliminar problemas de transferencia de carga. Se acostumbra a usar para estos fines, solución de nitrato cúprico. El baño también puede contener ácido nítrico para ayudar a la disolución anódica evitando posible pasivación del ánodo, y otros aditivos que contribuyen a mejorar las características del depósito de plata catódica.

El oro del bullion, si lo hubiere, no alcanza a ser disuelto en el baño por lo que queda retenido como barro disgregado en una bolsa de tela sintética que rodea al ánodo. De esta, al final de la electrólisis, se purifica el oro por ataque químico con agua regia y posterior precipitación con bisulfito de sodio, o se refina en otra celda electrolítica, previa fusión para conformado de los ánodos (proceso Wohlwill).

Como hemos mencionado anteriormente, hay distintas composiciones posibles de ser usadas en un dado proceso tecnológico, lo que dependerá principalmente de la composición de la aleación impura o bullion, especialmente su ley en plata contenida. Si esta es baja, se produce un desequilibrio entre las velocidades de disolución y precipitación de plata, lo que genera una depreciación de esta en el laboratorio. Esto último obliga a hacer reposiciones periódicas de plata al baño. Por otra parte, a medida que continúa la electrólisis, se van disolviendo desde el ánodo, metales impurezas (cobre, zinc, hierro, etc.) que contaminan el electrólito y obligan a sangrados o purificaciones periódicas.

Ya que el proceso es muy conocido, en la bibliografía, así como en la práctica industrial, encontramos diversas composiciones posibles de adoptar a nuestro caso (ver tabla I). Sin embargo, como las variables del proceso electrolítico de refinación de plata son varias e interactúan entre sí, se hace necesario adoptar una metodología que nos permita seleccionar las principales variables, descartar las secundarias o poco significativas, y adoptar la combinación de éstas que consiga la máxima recuperación de plata catódica y así como su mayor pureza. De ahí que se haya decidido utilizar la planificación estadística para el diseño y análisis de los ensayos de laboratorio que permitan operar la planta piloto con las

variables ajustadas y luego concentrar la atención, tan solo en las condiciones operativas de producción.

Tabla I - Recopilación de datos de bibliografía

D.de corriente [Amp/dm ²]	[Ag ⁺] [g /l]	[Cu ⁺²] [g /l]	[NO ₃ H] %	Tensión [Volt]	Celda Moebius
0,8 - 2	1	40	0,12 g/l	-	x
0,75	20-25	-	1,5	1	x
5,4	15	30-40	0	2,7	x
2,2	-	-	-	1,5	x
5,4	9,5-38,1	-	0	2,7	x
4,8	30-40	30-45	0	2,3-2,8	x
4,8	100	15	2 g/l	2,8	x

Comportamiento de las impurezas

Durante el proceso electrolítico quedan en el barro anódico, el oro junto con algunos otros constituyentes del bullion como el platino, paladio, telurio, selenio, plomo en forma de OPb₂, estaño como sal básica y la mayoría del bismuto en forma de trióxido hidratado (Bi₂O₃ x H₂O); estos constituyentes no se disuelven en las condiciones de trabajo y precipitan mecánicamente en el recinto anódico, por lo que se debe procurar un sistema de diafragma o membrana, para que no se junten con los cristales de plata del recinto catódico.

El cobre, níquel, hierro, cadmio y también algo de bismuto, plomo y estaño, se disuelven al igual que la plata, pasando en forma iónica a través del diafragma, concentrándose en el electrolito. De todos ellos el cobre es el más noble y por lo tanto, el que más cerca está de depositarse junto con la plata en el cátodo, según la reacción:



El potencial normal de reducción de la plata según la reacción:



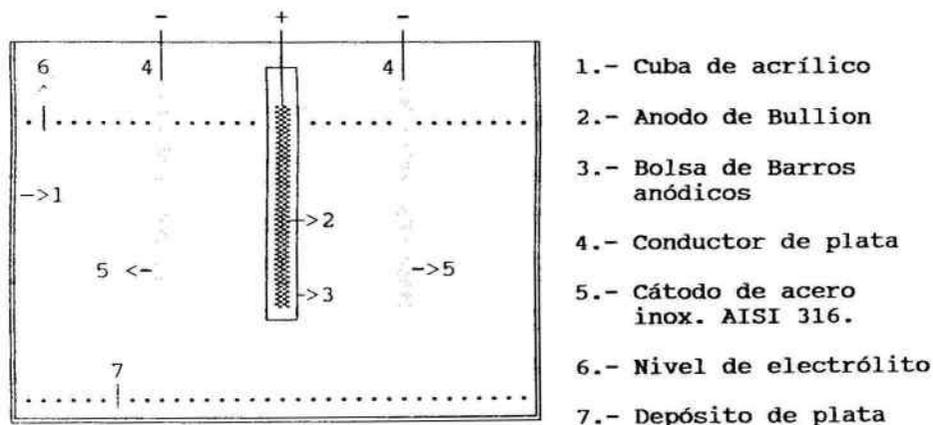
o sea, (0,80 - 0,34) = 0,46 volt más positivo que el del cobre. Por lo tanto la deposición del cobre no es un problema, hasta que la concentración de este sea muy superior a la de la plata; por lo dicho anteriormente, igualando los potenciales de reduc-

ción del cobre y de la plata, E_{Cu} y E_{Ag} respectivamente, esto es: $E_{Cu} = E_{Ag}$:

$$0,34 + 0,0295 \text{ Log } (Cu^{2+}) = 0,80 + 0,059 \text{ Log } (Ag^+) \\ (Ag^+) / (Cu^{2+})^{1/2} = 1,6 \times 10^{-8}$$

Esta relación se ve afectada en la práctica de refinación, por varios motivos, principalmente porque además de cobre y plata, en el electrólito, existen iones que interactúan con los antes mencionados, como el NO_3^- . Además en los procesos de refinación de metales preciosos, es de práctica común, usar altas densidades de corriente para aumentar la transferencia de masa y por ende disminuir el tiempo de electrólisis. Estos incrementan la posibilidad de codeposición de cobre y plata, por producir una rápida disminución del ión plata en la inmediata vecindad del cátodo (sobrepotencial de concentración).

Figura N° 1: Celda de electrólisis



PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE ELECTROREFINACION DE PLATA.

Bullion de Farallón Negro

El bullion remitido para los ensayos se fundió para conformarlo en forma de ánodos del tamaño adecuado a la celda de experimentación construida (ver Fig. 1).

Tabla II - Composición Química Porcentual

Bullion original: Oro 11,99, Plata 70,68, Impurezas 17,32.

Bullion fundido : 14,16, 83,41, 2,43.

La performance de uno de los ensayos de electrólisis se indica en la Tabla V.

Estudio de las variables usando el metodo preliminar de tamizado de variables de Plackett-Burman.

En la primera parte de este trabajo, se mencionó la importante cantidad de variables que intervienen en el proceso de electrorefinación de plata. El elevado valor comercial de la aleación a refinar, de las drogas usadas para preparar el electrólito en las pruebas de laboratorio y también el costo de los análisis químicos, son factores que deben ser tenidos en cuenta, cuando se diseña una serie de experimentos, para estudiar cómo influyen cada una de las variables en el proceso

El método clásico de investigación que consiste en el estudio de una variable por vez, manteniendo el resto constante, es muchas veces ineficiente y sobre todo se deben realizar un gran número de ensayos.

Si consideramos que en principio, son siete las variables estudiadas, al aplicar un diseño factorial completo a dos niveles el número de ensayos a realizar se eleva a $2^7 = 128$.

Plan de Experimentación Adoptado

Por lo mencionado, se hace necesario adoptar un método práctico de selección de variables, por medio del cual, partiendo de un gran número de estas y a través de una selección eficiente, se pueda obtener un número menor de variables importantes que sirvan como base para estudios posteriores (9).

Un método que se ajusta a estos requisitos, es el "tamizado de variables de Plackett-Burman", que se adopta en la primera parte de esta investigación.

Cuadro de variables - Matriz de diseño

En la tabla III se muestra el cuadro de variables y su designación como así también los valores de los niveles máximos y mínimos tomados para cada una, así como una combinación experimental (prueba N° 3).

En las tablas III y IV, se da la matriz de diseño para siete variables, en donde se indica para cada una de las ocho pruebas diseñadas, el nivel en que se encuentra cada variable. El número de orden dada a cada prueba, se elige aleatoriamente, para evitar errores sistemáticos.

Tabla III - Cuadro de variables en sus dos niveles

	Variable	Nivel Mínimo	Nivel Máximo	Unidad	Prueba
		-	+		N° 3
a.-	i	2,5	3,5	Amp/dm ²	2,5
b.-	[Ag ⁺]	30	50	g/l	30
c.-	[NO ₃ H]	0	10	g/l	2,5
d.-	[Gelatina]	0	1:10.000	P/P	1/10.000
e.-	[Cu ²⁺]	0	20	g/l	20
f.-	Agitación	0	100	r.p.m	0
g.-	Dist. Electr.	1	3	cm	3

Tabla IV - Matriz de diseño Plackett - Burman (7 variables).

Orden de Ejecución	Prueba	Variables						
		A	B	C	D	E	F	G
8°	P1	+	+	+	-	+	-	-
6°	P2	-	+	+	+	-	+	-
3°	P3	-	-	+	+	+	-	+
4°	P4	+	-	-	+	+	+	-
7°	P5	-	+	-	-	+	+	+
2°	P6	+	-	+	-	-	+	+
5°	P7	+	+	-	+	-	-	+
1°	P8	-	-	-	-	-	-	-

Tabla V - Performance del proceso.

Tiempo (min)	0	60
Tensión (volt)	1,1	0,9
Peso Cátodo (g)	41,6	44,4
Peso Anodo (g)	98,0	92,6

Análisis de los efectos de las variables.

El cálculo de los efectos de las respuestas, de cada uno de las pruebas, se efectuaron según la ecuación dada anteriormente. Los valores numéricos de dichos efectos se dan en la tabla VI. Del análisis de la misma se observan que, las variables que mayor influencia tienen en la respuesta.

Tabla VI - Efecto de las variables en la ley de plata.

Variable	Efecto
Concentración de ácido nítrico	1,7125
Concentración de plata	1,5825
Agitación	-1,1875
Densidad de corriente	0,7725
Concentración de cobre	-0,2675
Concentración de gelatina	0,1525
Separación de electrodos	0,1325

Concentración de ácido nítrico

Su alto efecto en la ley de plata (1,7125 indica que su presencia en el electrólito es importante para la disolución anódica, más que para aumentar la conductividad, donde es mayor la influencia del cobre.

Concentración de plata

El efecto de esta (1,5825) indica que la concentración del ión plata en el electrólito ejerce una considerable influencia positiva en la ley del depósito catódico.

La deposición de plata no presenta casi sobrepotencial de activación sobre el electrodo utilizado, dependiendo de la reposición rápida de iones plata en la interfase electrodo-solución, que está mejor asegurada para altas concentraciones de plata.

La fuerza impulsora de deposición de plata es proporcional al gradiente de concentración entre la interfase electrodo-solución y el seno del electrólito.

Agitación

De acuerdo a la tabla VI, la agitación tiene un efecto alto y de signo negativo (-1,1875).

De esto se deduce que un aumento de la agitación provoca la impurificación del depósito catódico.

Esto disminuye la ley en plata obtenida, lo cual es debido a que la agitación facilita el acercamiento de iones extraños a la interfase electrodo-electrólito que se descargan sobre el cátodo.

Por otra parte para favorecer la deposición preferencial de iones plata y por lo tanto aumentar la ley del depósito catódico, es necesario una agitación que asegure la llegada y renovación frecuente de los iones en la interfase.

La solución de compromiso entre dos influencias opuestas de la agitación sobre la ley de plata, es trabajar a valores intermedios de agitación.

El efecto de la agitación sobre la respuesta, se traduce a través de una variación no lineal, pudiéndose encontrar un máximo entre los dos niveles 0 y 100 r.p.m. a partir del cual se torna negativo.

Esto indica que en posteriores trabajos de investigación se deberá disminuir el nivel máximo de agitación a fin de optimizar dicha variable por una mejor definición de los niveles.

Densidad de corriente

Considerando el signo positivo de un efecto se deduce que esta variable en su nivel máximo (3,5 Amp/dm²) tiene un efecto favorable sobre la pureza del precipitado catódico. Esta afirmación no siempre es cierta cuando se trabaja con bullion de alto contenido de impurezas.

Por lo tanto su efecto favorable en la ley de plata se puede interpretar como que el bullion refinado es de buena ca-

lidad, lo que permite adoptar densidades de corriente mayores de $3,5 \text{ Ap/dm}^2$.

Si el tiempo de duración de cada prueba fuera mayor al utilizado, se concentrarían en el electrólito las impurezas del bullion, pudiendo precipitar aún a esta densidad de corriente.

Concentración de cobre

Su efecto en la respuesta "ley de plata" ($-0,2675$), es de pequeño valor y negativo; su signo indica, como era de esperar, que el cobre en concentraciones altas impurifica el precipitado, porque disminuye la relación $\text{Ag}^+ / \text{Cu}^{2+}$. No obstante esto, su presencia en el electrólito es importante para aumentar la conductividad del mismo, como lo demuestran los resultados de un análisis de Plackett-Burman, en el cual se tomó como respuesta la conductividad.

Conclusiones

Para un posterior estudio de las variables mediante un diseño estadístico de experimentos, se seleccionaron las siguientes variables: concentración de plata, concentración de cobre, concentración de ácido nítrico y densidad de corriente.

El uso de aditivos como la gelatina se dejará para cuando se estudie específicamente las características físicas del depósito catódico.

La agitación se mantendrá constante en todas las pruebas de tal manera de obtener un régimen de circulación de electrólito dentro de la celda, tratando de impedir que se acumulen demasiado los cristales del depósito catódico, lo que puede producir resistencias adicionales o cortocircuito cuando llegan a tocar el ánodo.

En un futuro estudio donde se trabaje con la agitación como variable se deberá disponer de un buen equipo con la regulación de la velocidad de agitación y de bombeo o recirculación.

La separación de electrodos permanecerá fija en todas las pruebas a dos cm entre ánodo y cátodo, pues la misma no influye apreciablemente en la ley de plata obtenida.

Figura 2: Electrólisis EPM 1
Depreciación de plata del baño

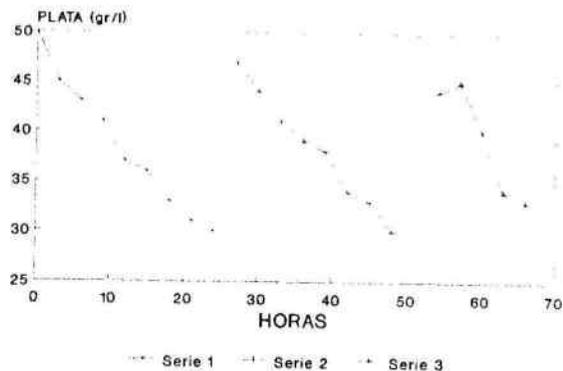


Figura 3: Electrólisis EPM 1
Variación de la concentración de cobre

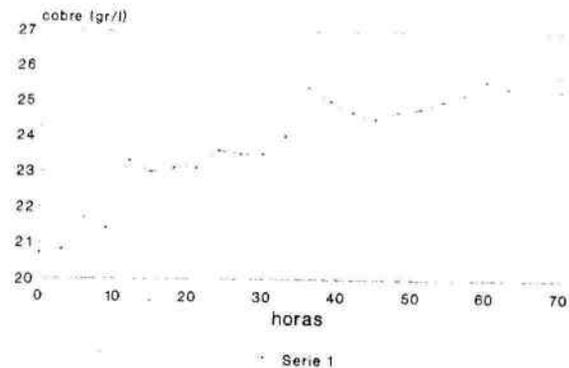


Figura 4: Electrólisis EPM 1
Variación de la acidez del baño

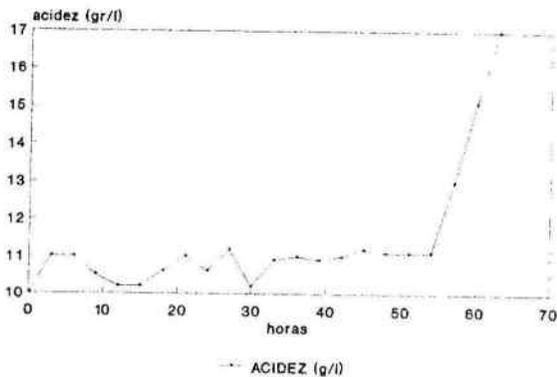
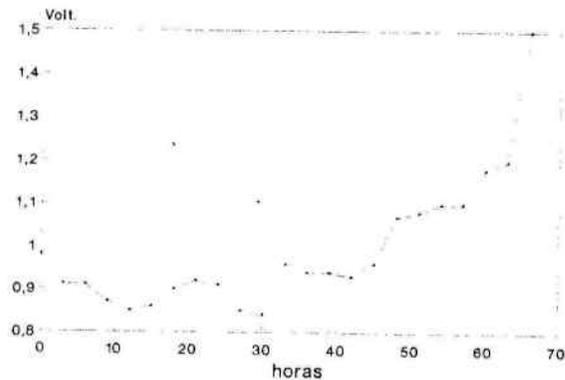


Figura 5: Electrólisis EPM 1
Variación de voltaje de celda



Estudio del electrorefino por un método factorial fraccionado.

Se adopta un diseño factorial fraccionado 2^{4-1} que da lugar a la realización de 8 ensayos de laboratorio.

Tabla N° VII - Cuadro de variables y sus niveles.

VARIABLE	NIVEL MAXIMO (+)	NIVEL MINIMO (-)
A. Densidad de corriente	3,5 Amp/dm ²	2,5 Amp/dm ²
B. Concentración de plata	50 g/litro	30 g/litro
C. Concentración NO ₃ H	10 g/litro	0 g/litro
D. Concentración de cobre	20 g/litro	0 g/litro

De este estudio se deduce al igual que con el anterior de Plackett-Burman, cual es la combinación experimental que da mejores resultados en términos de recuperación o eficiencia y de pureza del depósito catódico. (columna izquierda).

CONDICIONES OPERATIVAS DE LA ELECTROLISIS PILOTO (5).

En base a los ensayos de laboratorio se verificó que el bullion de Farallón Negro facilita el proceso de partición y refinación electrolítica ya que se trata de un bullion con 80% de plata, 15% de oro aproximadamente y poca cantidad de impurezas. Entre estas últimas, el cobre no constituye un serio problema para la electrólisis porque su contenido es mínimo y no precipita con la plata.

El proceso de Moebius para refinar plata electrolítica permite obtener plata electrolítica de 999 a 9999, a partir de una aleación que contenga una cantidad de plata, de preferencia con título superior a 900. Para contenidos menores se complica el proceso, al aumentar la velocidad de depreciación de la plata contenida en el baño como ión.

Para asegurar una alta velocidad de producción de plata catódica, conviene utilizar la mayor densidad de corriente posible, pero si esta aumenta demasiado, se obtienen cristales arborescentes de plata que al poco tiempo se van tornando de tipo mucilaginoso y de color negruzco.

El control óptimo del proceso electrolítico requiere la formación de cristales relativamente grandes de crecimiento no dendrítico, que puedan desprender fácilmente de las placas

catódicas por la acción del rascado. Se deben usar rascadores alrededor de los cátodos para evitar cortocircuitos con los ánodos, ya que los cristales de plata tienden a seguir las líneas de corriente.

Densidad de corriente de trabajo

Por las razones expuestas anteriormente, el valor de la densidad de corriente adoptada se eligió como un compromiso entre velocidad de producción y calidad de los cristales de plata catódica. Al mismo tiempo, a mayor densidad de corriente se necesita mayor concentración de plata en el electrólito. Esta última debe ser mayor cuando menor sea su contenido en el bullion. Por ello se adoptó 50 g/l y 2,5 A/dm².

Determinación de la intensidad de corriente aplicada, velocidad de producción horaria de plata y tiempo estimado de electrólisis.

Una vez determinada la superficie anódica es posible establecer la intensidad de corriente aplicada teniendo en cuenta la densidad de corriente de trabajo. Se determinaron la velocidad de producción horaria de plata y el tiempo estimado de electrólisis que figuran en la planilla de cálculo de producción adjunta.

La relación de áreas anódicas a catódicas tiene un valor óptimo de $A/C = 1,2$.

Estimación de las cantidades de plata, barras anódicas y oro a producir.

Antes de iniciar la electrólisis, se estimaron las cantidades de plata, barras anódicas y oro a producir, como una medida de control interno a partir de la ley media en oro y plata, el peso de los ánodos, el porcentaje de bullion de los restos de ánodos (aproximadamente 10 a 20%) y la velocidad de depreciación de plata del baño (aproximadamente 2% por hora).

Los cálculos se realizaron de manera similar a lo indicado en las planillas de cálculo de producción adjuntas. Los barras anódicas obtenidos representan aproximadamente el 15% del peso

del bullion procesado. La plata contenida en los barras anódicos normalmente es el 5-7% del peso de los mismos.

Conclusiones y recomendaciones.

- 1.- Se constató el óptimo funcionamiento del sistema de celdas de electrólisis y transformador-rectificador.
- 2.- La calidad del oro y plata obtenidos en las electrólisis de puesta en marcha, EPM1 y EPM2, corresponde a las especificaciones solicitadas.
- 3.- Las recuperaciones obtenidas en la EPM1, del 99,47% para oro y del 99,98% para plata, son satisfactorias.
- 4.- Se ratificó que la capacidad de producción diaria es de 10kg de plata y 1,5 kg de oro aproximadamente de la pureza solicitada.
- 5.- El rango de variación observado en las variables principales del proceso es normal en este tipo de refinación: (Ver figuras N° 2, 3, 4, y 5).
 - voltaje y corriente eléctrica: La variación de voltaje es normal, excepto al final del ciclo electrolítico en el que sube abruptamente. La intensidad de corriente se mantiene en el valor fijado inicialmente y no existen problemas para operar el sistema galvanostáticamente.
 - concentración de plata: La depreciación de plata del baño de plata es normal, 1,6 - 2% por hora, y las reposiciones de plata se realizaron cada 24 horas según lo programado.
 - concentración de cobre: Se mantiene dentro de los valores normales sin peligro de codeposición. No fue necesario efectuar sangrado y acondicionamiento del electrólito. Cuando la planta entre en régimen de funcionamiento deberá determinarse la frecuencia óptima de purificación o reposición del electrólito.

ELECTROLISIS DE PRUEBA EN MARCHA N° 1 (EPM 1)

Cálculo de producción

Fórmulas:

$$Pa = L \cdot B \quad (I) \quad Pe = Ce \cdot Ve \quad (II) \quad I = Pc \cdot V \cdot F/t \cdot E \cdot n \quad (III)$$

$$I = (t \cdot E \cdot N / V \cdot F) \quad i = (1 \times 107,8 \times 1 / 1 \times 26,8) \quad i \quad (IV)$$

Símbolos:

n - rendimiento teórico de corriente (1). t - tiempo (1 hora).
 V - valencia de plata (1).

Estas fórmulas sirven para calcular la planilla de producción electrofítica de plata que figura a continuación, donde se indican el significado de los demás símbolos usados.

Planilla de cálculo de producción de celda N° 1

DATOS	Unidad	Símbolos	Cantidad
Áreas anódicas por celdas	dm ²	A a	14,63
densidad de corriente adoptada	A/dm ²	i	2,5
Intensidad de corriente	A	I	36,5
Peso equivalente de la plata	g	E	107,8
Faraday	Coul	F	96500
Faraday	Ah	F	26,8
Peso de ánodos cargados	g	B	11336,1
Levy de plata de ánodos cargados	%	L	910,80
Plata contenida en ánodos	g	Pa	9191,31
Peso de corazones anódicos	g	R	1899,2
Producción de plata estimada	g/h	Pc	146,82
Tiempo estimado de electrolisis	hr	T	62,60
Volumen electrolito	l	V	50
Plata contenida en el electrolito	g	Pe	2500
Concentración de plata en el electrolito	g/l	Ce	50

BIBLIOGRAFIA

- 1.- C.L. Mantell: Ingeniería electroquímica. 1962.
- 2.- M. Guerrero, R. Cáceres, A. Salmuni: "Producción de oro y plata finos en pequeñas plantas". Informe CIMC N° 82. 1976.
- 3.- Apuntes de Hidrometalurgia, Dr. Warren, U. de British Columbia, Canadá, 1975.
- 4.- L. Gonzaga Sebral y otros: "Refino de bullions de ouro" CETEM. Informe N° 58, 1980.

Electrólisis puesta en marcha N° 1

Planilla de variables Celda N° 1

Iniciación: 29-10-86. - 11.45.56. m...

Fecha/hora de culminación: 01-11-86. - 05.45.23. m

VARIABLES	CONDICIONES INICIALES	CONDICIONES FINALES
Densidad de corriente (A/dm ²)	2,5	-----
Concentración de plata (g/l)	50	32,2
Concentración de ácido nítrico (g/l)	10,1	17
Concentración de cobre (g/l)	20	25,7

Parámetros

Separación de electrodos (cm)	5
Intensidad de corriente (Amp)	36,5
Tiempo de electrólisis (hs)	65,6

Peso total (g)	Inicial	Final
ANODOS	11336,1	1899,2
LOSO ANODICO	-----	1269,3
DEPOSITO CATODICO	-----	9254,4

Amperaje rectificador (Amp)

Voltaje rectificador (Volt)

Voltaje celda (Volt)

Inicial	Final
36,5	35
1,10	1,57
0,98	1,38

Electrólito

Volumen (l)

Nivel (mm)

Calidad fresco reacon.

Tiempo de uso (hr)

33,20
260
fresco
0

Planilla de carga

Celda N° 1

Celda

Tipo	Hoebius
Capacidad (l)	38
Dimensiones (cm)	----
Relación A/C	1,31
Cantidad	1 (uno)

Anodos

Código	1720/1721 C2/7
Ley Oro * %	121,8
Ley Ag * %	810,8
Cantidad	6 (seis)
Calidad	Bullion FR

Caroos

Superficie (cm ²)	1920
Calidad	Ac. Inox. AISI 316
Cantidad	1 (uno)

Detalle de ánodos

Diafragma

Código	6C2/7	8C2/7	9C2/7	10C2/7	11C2/7	12C2/7	Suma
Peso (g)	1947,8	2070,5	1746,3	1805,4	1999,2	1766,9	11336,1
Areas ** (dm ²)	2,20	2,32	2,00	1,95	2,23	2,04	14,6
Ley Au %	12,18	12,18	12,18	12,18	12,18	12,18	---
Ley Ag %	81,08	81,08	81,08	81,08	81,08	81,08	---

Altura (cm)

Ancho (cm)

Malla (μ)

Tipo

21
10,5
No especific.
Poplin

Referencias: (*) Ley de colada; ** Areas laterales = 1,90 dm²

- 5.- J.A. García y otros: "Refinación electrolítica del bullion de Farallón Negro". Estudio del proceso , construcción, montaje y puesta en marcha de la refinadora de oro y plata de YMAD Informes N° 179, 210, 211, 225, 227 del Inst. de Inv. Mineras de la Univ. Nac. de San Juan, Argentina, 1983-1986.
- 6.- J. A. García, A. Gómez, L. Attala: "Partición Química del bullion de Farallón Negro" Informe N°179. Anexo II .I.I.M Univ. Nac. de San Juan, Argentina, 1984.
- 7.- S.J. Escalera y J.E. Gracioso: Programação de experimentos de flutuação pela abordagem estadística de Plackett - Burman, 1978.
- 8.- Montealegre, R. J.: "Diseño experimental con aplicación a la metalurgia extractiva. Apuntes de la Universidad de Concepción, Chile, 1968.
- 9.- Villas Bôas, Roberto C.: "Planeamiento estadístico de experimentos". COPPE/UFRJ, 1980.