L 129
1997

INFORME FINAL
FONTEC - CORFO

PROYECTO

" PROYECTO DE INVESTIGACIÓN SULFURUM "

BIBLIOTECA CORFO

JULIO LACAMARA ZULUETA
CÓDIGO 95-0656

661.03652
L·129
1997

INFORME FINAL

PROYECTO FONTEC - CORFO N° 95 - 0656

"PROYECTO DE INVESTIGACION SULFURUM"

BIBLIOTECA CORFO

Febrero, 1997

INFORME FINAL

PROYECTO FONTEC - CORFO N° 95 - 0656

"PROYECTO DE INVESTIGACION SULFURUM"

PREPARADO PARA : **Fondo Nacional de Desarrollo Tecnológico y Productivo de la Corporación de la Producción, FONTEC.**

PREPARADO POR : **Julio Lacámara Zulueta**
Ing. Comercial

Antonio Martínez
Ing. Comercial

Miguel Meza Mac-Namara
Ing. Civil Químico

Febrero, 1997

INDICE

		Pág.
RESUMEN EJECUTIVO		i
1.	INTRODUCCION	1
	1.1 DESCRIPCION DEL PROCESO	3
	1.2 FENOMENOLOGIA DEL PROCESO	5
2.	RESULTADOS	7
	- PRIMERA CAMPAÑA	12
	- SEGUNDA CAMPAÑA	33
	- TERCERA CAMPAÑA	51
3.	CONCLUSIONES Y RESULTADOS	69
	ANEXOS	
	ANEXO A : TERMINOS DE REFERENCIA	
	ANEXO B : CARTA CONFIABILIDAD	

RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento corresponde al Informe Final, (Rendición Técnica) del Proyecto FONTEC N° 95-0656, denominado "**PROYECTO DE INVESTIGACION SULFURUM**".

Este Proyecto de Investigación, fue desarrollado dentro del marco de los términos especificados en el contrato llevado a cabo entre el Fondo Nacional de Desarrollo Tecnológico y Productivo de la Corporación de Fomento de la Producción, FONTEC y el Señor Julio Lacámara Zulueta, contrato firmado con fecha 15 de Mayo de 1996.

El objetivo central de esta investigación, es establecer una evaluación Técnica respecto de un proceso de lixiviación sulfúrica de minerales oxidados de cobre, mediante el empleo de agua de mar como agente reactivo y de dilución. Además de la posterior obtención de cementos de cobre de alta pureza, los cuales se obtienen a partir de las soluciones ricas en cobre, las cuales provienen de dicha lixiviación, (previa separación sólido-líquido), utilizando para este efecto, técnicas de precipitación, (cementación) con empleo de fierro a pH controlado.

Para hacer frente a lo anterior, se diseñó, dimensionó y construyó una Planta Piloto de Investigación, la cual consta de un reactor de lixiviación consistente en un estanque cilíndrico provisto de un sistema de agitación, (diseño propio con hélice de madera), construido en acero y recubierto en PVC y cuyas dimensiones son: 2,8 m de diámetro y 3 m de altura. Este reactor posee una capacidad de tratamiento de 8 a 9 toneladas de mineral por cada lixiviación batch.

Estas instalaciones piloto contemplan además 2 estanques vasculantes, cilíndricos de decantación y floculación, ambos construidos en acero y recubiertos en PVC, cada uno con capacidad de 20 m^3. Estos estanques operando simultáneamente, permiten la separación sólido - líquido, (mediante el empleo de soluciones floculantes), obteniendo soluciones claras libres de sólidos, aptas para ser sometidas a proceso de cementación de cobre con empleo de fierro.

Estos estanques vasculantes, poseen un tecle adaptado a ellos, (capacidad 10 toneladas), el cual indistintamente permite el volteo para el trasvasije de soluciones.

Las instalaciones poseen además un estanque construido en concreto, el cual posee una capacidad de 10 m^3 y el cual es utilizado en el proceso de cementación de cobre.

Las instalaciones poseen además cuatro estanques auxiliares. El primero es utilizado para almacenar el agua de mar y posee una capacidad de 500 m^3, (consistente en una excavación en la tierra y recubierto en PVC).

El segundo estanque auxiliar esta destinado a la acumulación de soluciones de reciclo, (estanque pulmón), y el cual posee una capacidad nominal de 50 m^3, (la construcción de éste se realizó excavando la tierra y recubriendolo con PVC).

El tercer estanque es utilizado para almacenar los stock de ácido sulfúrico y posee una capacidad de 20 m^3.

El cuarto estanque auxiliar, es empleado en la preparación de solución lixiviante con capacidad de 30 m^3, (este estanque no fue empleado).

Finalmente todas las instalaciones se encuentran medianamente provistas de sistemas de piping y bombas específicas, (material antiácido), de manera de establecer una hidrodinámica parcial en el proceso, que permita el movimiento parcial de soluciones en este mismo.

El diseño, el dimensionamiento y la construcción de esta Planta Piloto, se realizó considerando la información proporcionada por el documento, (Informe Final) proporcionado por las pruebas de banco llevadas a cabo en la Universidad Católica de Valparaíso.

Esta Planta Piloto está ubicada aproximadamente a 12 Km. de Copiapó, en la carretera C 33, vía de acceso a la localidad de Tierra Amarilla, a distancia muy escasa de la Fundición Hernán Videla Lira, (Paipote).

La programación experimental diseñada para la realización de este Proyecto de Investigación, (Anexo: Términos de Referencia Proyecto Sulfurum, Acápite: Metodología), consideraba inicialmente realizar 225 lixiviaciones batch, tratando un total de 1575 toneladas de mineral, considerando para este, leyes de 1 - 1,5 - 2,0 - 2,5 y 3,0 %. No obstante, sólo se realizaron 54 lixiviaciones batch, reportando un total de mineral tratado de aproximadamente 400 toneladas y cuyas leyes fluctuaron entre: 1,0 - 1,5 y 2,0 %.

El cumplimiento parcial de la programación experimental inicial y propuesta, se debió a los siguientes problemas:

1. En la zona de copiapó fue imposible encontrar volúmenes adecuados de mineral de cobre oxidado que aportara leyes sobre el 2 %, (1,87 % máximo, ver resultados tercera campaña).

2. La programación experimental original contemplaba llevar a cabo 5 lixiviaciones, (7 toneladas de mineral por cada lixiviación batch a realizar), y en la realidad los tiempos muertos fueron excesivos, (ver discusiones y resultados), lo que derivó en una disminución del número de lixiviaciones a realizar por día a un total de 1,4 lixiviaciones por día, (promedio), disminuyendo considerablemente el tiempo dispuesto para cada una de las campañas.

3. Finalmente, las instalaciones y los sistemas de control y programación, presentaron reiteradas falencias, (fallas del agitador, fallas del sistema de separación sólido - líquido, etc)

En resumen, las actividades experimentales debieron ser reprogramas en orden a satisfacer los resultados esperados conforme a esta nueva situación. Esta nueva programación se verá en detalle en el capítulo de introducción de este documento.

En resumen, el tratamiento de las 400 toneladas de mineral oxidado de cobre y de baja granulometría, (yampo), con leyes promedio de cobre soluble del orden de 1,26 %, permitió la realización de 54 lixiviaciones batch, con una eficiencia global de lixiviación del orden de 93 %. Del mismo modo, se realizaron 70 ensayos de precipitación con empleo de fierro a pH controlado, (3 - 3,5), con una eficiencia global de precipitación del orden de 95 %, lo que permitió obtener aproximadamente 3,8 toneladas de cemento de cobre, (base seca), con una ley de cobre metálico promedio de 89 %, destacando de este producto terminado la casi nula presencia de cloruros.

Finalmente y a la luz de los resultados obtenidos, se puede establecer que este innovador proceso permite efectivamente establecer ventajas comparativas respecto a los sistemas de lixiviación imperantes en la industria minera, ya que el tiempo requerido en lograr eficiencias de lixiviación del orden de 135 %, (obviamente dependiendo de las leyes de cobre soluble e insoluble, ver lixiviación N°12, segunda campaña) es de 33 minutos, (promedio), tiempo que al ser comparado con los utilizados en la actualidad, (20 - 25 días), es evidentemente ventajoso. Por otra parte este proceso que emplea ácido sulfúrico y agua de mar, deja en evidencia la posibilidad de lixiviar cobre en su forma de sulfuro, lo que lo hace especialmente atractivo. Sin embargo es importante destacar que para el logro de lo anterior, se deben realizar exhaustivos trabajos de implementación y diseño, los cuales permitan realizar una operatoria ágil de manera de lograr procesar un volumen atractivo de mineral por día, lo cual haría de este proceso un proceso sustentable.

1. INTRODUCCION

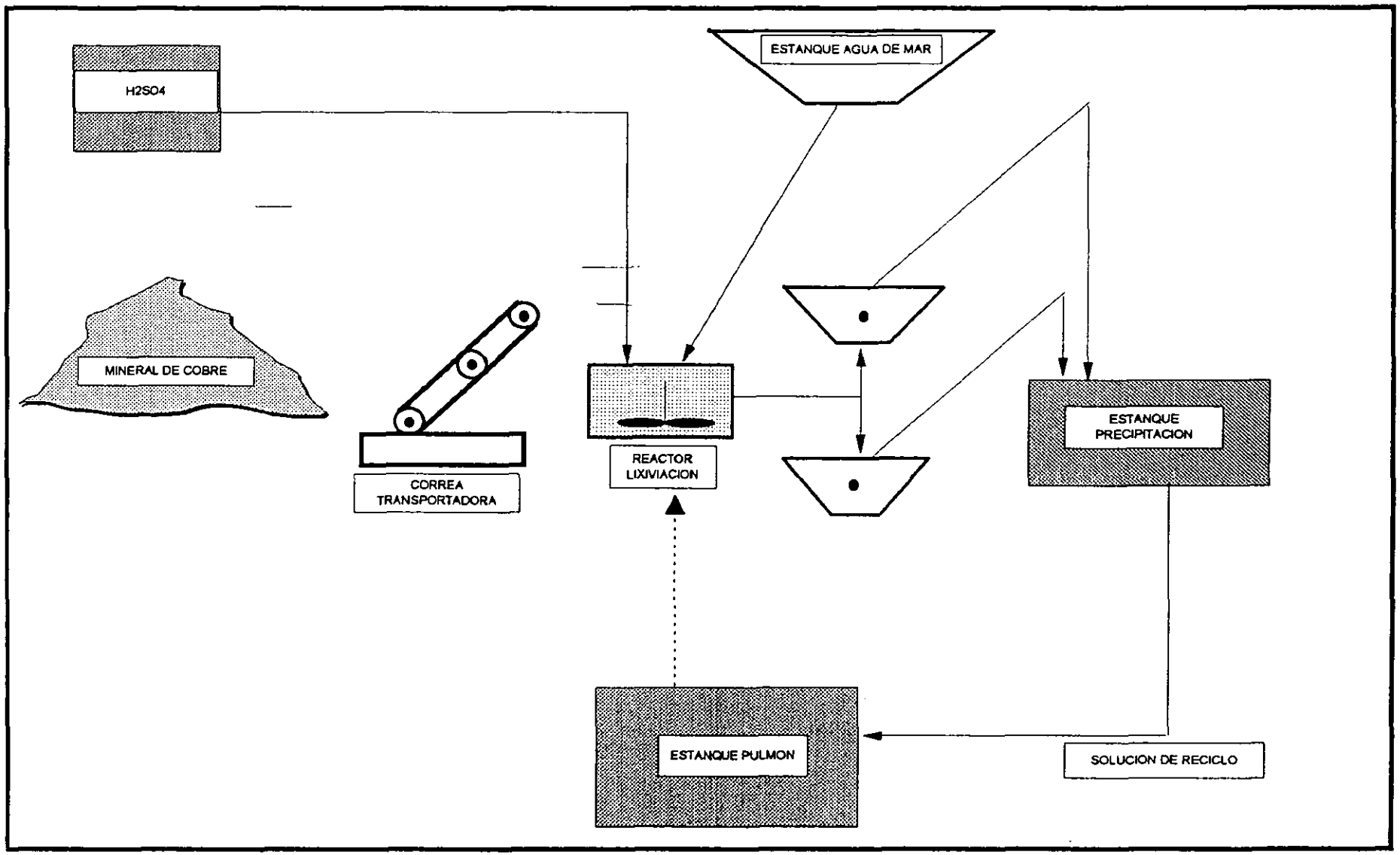
En orden a reprogramar el esquema experimental originalmente establecido para la realización de este proyecto, conforme a lo explicado anteriormente, se planificó el siguiente esquema de experimentación:

*	Leyes de Cu a Procesar	:	0,7 % (equi. 1 %) 1,3 % (equi. 1,5 %) 1,87 % (equi. 2,0 %)
*	Número de Campañas a Realizar por cada Ley	:	1
*	Número de Lixiviaciones por cada Campaña	:	17
*	Total de Lixiviaciones a Realizar	:	51

Nota: En la ejecución de la primera campaña se realizaron 20 lixiviaciones batch, lo cual responde a la intensión de agotar el stock de este mineral adquirido, lo cual derivó en un total de lixiviaciones realizadas de 54.

La Figura N°1, da cuenta de las instalaciones Piloto, así como de las diferentes unidades operacionales que la conforman y las cuales fueron empleadas en la ejecución de las tres campañas de investigación.

FIGURA N°1 ESQUEMA PLANTA PILOTO



1.1 DESCRIPCION DEL PROCESO

El proceso se inicia con la adición del mineral al reactor agitado de lixiviación, esta operación es asistida con la ayuda de una correa transportadora de 12 m.

Terminada esta operación se procede a adicionar el agua de mar y el ácido sulfúrico, de manera de lograr una concentración de 30 g/l de este último aditivo, (H_2SO_4). La adición de esta solución lixiviante obedece a una razón sólido/líquido = 1/3, dando origen a una pulpa fácilmente agitable.

Concluida esta operación, se comienza con la agitación del reactor, considerando una velocidad del orden de las 10 rpm, (velocidad máxima disponible por el sistema de agitación). Esta condición es mantenida durante 30 minutos, tiempo en el cual se ha logrado teóricamente una eficiencia de disolución de cobre deseable, (del orden > 98 %, según antecedentes cinéticos proporcionados por el estudio de la Universidad Católica de Valparaíso).

Terminado el proceso de lixiviación, y desconectada la agitación, se da un tiempo de decantación adecuado, (de 10 a 15 minutos), con la finalidad de lograr la sedimentación de las partículas de mayor tamaño.

Posteriormente se procede a evacuar la fracción líquida sobrenadante, (solución rica en cobre que posee una gran cantidad de material sólido fino suspendido), luego esta solución es trasladada hacia dos estanques vasculantes de decantación - floculación.

Terminada la etapa de recuperación de solución fuerte o rica en cobre, se procede a lavar los ripios estériles, los cuales aún residen en el reactor de lixiviación. Para la ejecución de esta etapa del proceso se emplea una solución de lavado consistente en una mezcla de agua de mar y ácido sulfúrico con una concentración de 5 g/l de este último compuesto. Esta solución específica de lavado es utilizada considerando una razón sólido/líquido = 1/1,5.

Esta solución de lavado es posteriormente recuperada en los estanques vasculantes de decantación - floculación, en donde es compositada con la solución fuerte inicialmente recuperada, provocando de esta manera una dilución en el contenido sulfúrico global, aumentando los valores de pH, (de valores negativos hasta 3 a 3,5), los cuales generalmente resultan ser óptimos en el proceso de precipitación de cobre con empleo de fierro.

Finalizada la operación de recuperación de soluciones, (compósito), se procede a adicionar una solución floculante, (Magnafloc, 5 g/l), considerando agitación manual con maderos construidos para este efecto.

Por otra parte y en forma simultánea, se procede a desalojar el reactor de lixiviación, tarea que se realiza en forma manual, (utilización de palas y carretillas), descartando tales ripios estériles en un lugar previamente establecido para ello. Esta tarea se considera la operación más complicada y lenta encontrada durante el desarrollo de las pruebas.

Los estanques de decantación- floculación que contienen el compósito de soluciones ricas en cobre, luego de 5 a 10 minutos de reposo, (posterior a la adición de la solución floculante), tiempo óptimo de floculación, en donde la totalidad de la fracción sólida ha coalesido y se encuentra formando una fase densa reprimida en la parte inferior del estanque, se procede a vascular los estanques mediante la ayuda de un tecle, el cual se encuentra debidamente dispuesto para este fecto. De esta manera la solución clara y libre de sólidos en suspensión es trasladada hacia los estanques de precipitación.

Este estanque de precipitación de cobre, está provisto de fierro suspendido desde 2 travesaños dispuestos en la parte superior. En esta etapa del proceso se procede a adicionar agua de mar a flujos controlados, con la finalidad de lograr manipular los valores de pH, de manera de lograr valores comprendidos entre pH: 3 a 3,5.

Durante el tiempo de cementación, (del orden de 4 horas y más), se aplican golpes a los travesaños que soportan la chatarra de fierro con el propósito de despegar desde la superficie de éstas, el cobre adherido. Esta operación permite aumentar el área útil de intercambio de oxido-reducción, agilizando la velocidad de precipitación de cobre.

La etapa de cementación termina cuando la solución presenta una evidente decoloración, (de azul intenso a incoloro). En esta etapa no se controló el contenido de cobre de la solución agotada, salvo en algunos casos), por cuanto estas soluciones son almacenadas para su posterior reutulización en el proceso de lixiviación.

De esta manera se concluye la operación completa correspondiente a una lixiviación batch. Es importante destacar que aun considerando que muchas de las operaciones se podrían realizar en forma simultánea, los tiempos muertos detectados en estas experiencias demuestran que estas instalaciones piloto son deficientes para lograr una cronología adecuada de operación, lo que derivó en exhaustivas jornadas con un máximo de 1,4 lixiviaciones por día.

1.2 FENOMENOLOGIA DEL PROCESO HIDROMETALURGICO DE TRATAMIENTO DE MINERALES SOLUBLES DE COBRE, CON EMPLEO DE AGUA DE MAR.

El proceso propuesto en el Proyecto de Investigación "SULFURUM", consistente en un procedimiento hidrometalúrgico NO CONVENCIONAL, el cual emplea agua de mar y ácido sulfúrico, es teóricamente apto para ser aplicado al tratamiento de minerales oxidados de cobre.

El empleo de agua de mar, como elemento reactivo y de dilusión, no solo es atractivo como sustituto del agua dulce, sino que además provee de innumerables reactivos accesorios, cuya morfología química en la medida que son reciclados, al parecer van enriqueciendo sus características oxido-reductivas, lo que de alguna forma favorece las reacciones y los equilibrios deseados en el proceso de lixiviación.

Es evidente que la presencia de los iones cloruro (contenidos en el agua de mar), favorecen la formación IN-SITU del ácido clorhídrico (esto debido a la adición de ácido sulfúrico a la solución lixiviante). Este reactivo (HCl), indudablemente constituye un agente de disolución de la mayor parte de los metales, tanto de aquellos que se encuentran formando parte de matrices oxidadas, como de aquellos que se encuentran formando sulfuros naturales, puesto que además este reactivo (HCl), se caracteriza por poseer un gran poder oxidante.

Por otra parte, si bien la reutilización de soluciones es favorable, se posee sin embargo la persepción que en algún momento estas soluciones recicladas presentarán signos de saturación, tales signos debido seguramente a una especie de envenenamiento por fierro, lo cual podría crear equilibrios meta-estables que impidirían la solubilisación de metales.

Lo anterior podría ser solucionado considerando descartes controlados de una fracción de estas soluciones y considerando además en reemplazo de estos descartes un make-up tanto de agua de mar fresca como de ácido sulfúrico.

El proceso de cementación de cobre mediante el empleo de chatarra de fierro, si bien es un proceso bastante estudiado y aplicado industrialmente, deja de manifiesto que al controlar las variables tales como:

- Calidad de la chatarra a utilizar,
- Control estricto de los valores de pH (pH = 3,0 - 3,5).

garantiza la obtención de un producto terminado (cemento de cobre), de elevada calidad química.

Particularmente, llama la atención en la ejecución de este proceso, la nula presencia de cloruros en los cementos de cobre obtenidos, considerando que a estos valores de pH (pH = 3,0 - 3,5), los compuestos que podría estar formando este ión (Cl-), tales como; cloruro cuproso, tricloruro de bismuto, tricloruro de antimonio, etc., deberían teóricamente co-precipitar con el cobre metálico.
No obstante, al parecer la presencia de otros iones contenidos en el agua de mar, producen un difuso mecanismo físico - químico que provoca desviaciones de los equilibrios de manera que este ión así como sus asociaciones con otros elementos quedan solubilizados y no precipitan.

Este mecanismo físico-químico, que experimentalmente provee de una cementación selectiva para el cobre, no esta muy claro, sin embargo, las pruebas de cementación realizadas tanto por la Universidad Católica de Valparaíso, así como aquellas pruebas realizadas a nivel piloto-industrial en el marco de actividades experimentales de este Proyecto, dejan en clara evidencia la existencia técnica empírica y sustentable de una cementación selectiva del cobre.

2. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para cada una de las tres campañas de experimentación, correspondientes a la lixiviación de minerales oxidados de cobre de leyes de 0,7 - 1,3 y 1,87 %, son resumidos en las Tablas N°1, 2 y 3, respectivamente.

Tabla N°1 Primera Campaña
Ley Mineral : 0,7 % Cu Soluble
20 Lixiviaciones Batch
142 toneladas de mineral tratado

N°Lixiviacion	Razón L/S	Concen. H_2SO_4 (g/l)	Tiempo (min)	Veloc. Agit. (rpm)	Reduc. Peso (%)	Eficien. Lix. (%)
1	2,72	30,25	33	10	8,33	94,7
2	2,62	20,56	35	10	3,84	105,4
3	2,62	9,77	37	10	4,61	72,11
4	2,83	10,28	36	10	8,33	66,8
5	3,10	14,08	33	10	6,89	77,6
6	2,62	18,51	38	10	7,69	97,14
7	2,21	21,43	40	10	4,28	104,4
8	2,0	15,15	32	10	4,00	82,86
9	2,0	13,05	30	10	4,00	73,14
10	1,88	18,06	31	10	7,50	95,10
11	2,27	13,37	30	10	2,67	64,76
12	2,0	13,40	30	10	2,67	57,14
13	2,0	25,13	30	10	3,75	104,29
14	2,27	19,54	30	10	4,00	78,79
15	1,88	27,97	32	10	7,50	93
16	2,57	19,9	30	10	7,14	83,06
17	2,46	27,31	30	10	10,77	98,46
18	2,27	28,79	30	10	9,33	100,38
19	2	17,48	30	10	3,75	77,14
20	2	20,75	30	10	7,50	100,98

Tabla N°2 Segunda Campaña
Ley Mineral : 1,3 % Cu Soluble
17 Lixiviaciones Batch
128,7 toneladas de mineral tratado

N°Lixiviacion	Razón L/S	Concen. H_2SO_4 (g/l)	Tiempo (min)	Veloc. Agit. (rpm)	Reduc. Peso (%)	Eficien. Lix. (%)
1	2,00	30,88	31	10	6,66	97,08
2	1,86	28,24	32	10	8,57	98,14
3	2,07	24,68	30	10	9,76	110,52
4	2,13	24,16	33	10	7,50	108,05
5	3,13	25,19	35	10	6,30	103,96
6	2,13	27,31	30	10	2,67	75,49
7	2,26	22,62	30	10	6,67	97,64
8	2,26	28,28	31	10	2,67	92,4
9	2,00	33,87	30	10	6,25	116,92
10	2,00	28,41	34	10	6,25	104,62
11	2,00	29,50	30	10	7,50	109,23
12	2,00	32,78	30	10	7,50	135,38
13	2,00	30,59	30	10	6,25	93,84
14	2,00	25,13	30	10	7,50	90,77
15	2,27	21,59	30	10	2,67	80,20
16	2,43	23,65	30	10	7,14	92,10
17	2,25	17,48	30	10	20,00	83,08

Tabla N°3 Tercera Campaña
Ley Mineral : 1,87 % Cu Soluble
17 Lixiviaciones Batch
125 toneladas de mineral tratado

N° Lixiviacion	Razón L/S	Concen. H_2SO_4 (g/l)	Tiempo (min)	Veloc. Agit. (rpm)	Reduc. Peso (%)	Eficien. Lix. (%)
1	2,27	22,62	31	10	4,00	81,82
2	2,13	22,62	30	10	3,75	72,73
3	2,43	22,62	30	10	4,29	80
4	2,27	27,70	35	10	5,33	90,10
5	2,27	30,85	30	10	6,67	106,67
6	2,27	18,51	30	10	4,00	63,03
7	2,13	30,85	31	10	6,25	95,46
8	2,13	30,85	30	10	6,25	97,73
9	2,27	30,85	30	10	6,67	98,19
10	2,43	30,85	33	10	4,29	97,4
11	2,27	30,85	30	10	6,67	110,30
12	2,13	32,90	30	10	6,25	1117,05
13	2,13	30,85	33	10	6,25	90,91
14	2,13	30,85	35	10	6,25	96,59
15	2,13	30,85	30	10	6,25	98,86
16	2,43	30,85	30	10	7,14	98,70
17	2,27	31,08	30	10	9,09	108,51

9

A continuación se ilustran los balances de masas de las lixiviaciones realizadas en cada una de las lixiviaciones realizadas en cada una de las tres campañas de investigación.

A continuación se describen los criterios utilizados en los cálculos de estos balances de masas:

1. Para estimar el tonelaje del mineral utilizado en cada lixiviación, se realizaron ensayos previos de densidad del mineral, (volumen versus peso), considerando además ensayos de % de huecos. Posteriormente se cubicó el reactor de lixiviación, de manera de establecer el volumen ocupado por el mineral para un determinado tonelaje, (la densidad del mineral es aproximadamente igual a 4,2 ton/m^3, y el porcentaje de huecos es del orden de 30 %).

2. Atendiendo a una razón líquido/sólido igual a 3, se realizó el cálculo de agua de mar a adicionar en cada experiencia, esto es : peso mineral x 3 = volumen de agua de mar a adicionar.

3. El ácido sulfúrico fue adicionado conforme al volumen de agua de mar considerado en cada lixiviación, atendiendo además:

-	Concentración de H_2SO_4	:	30 g/l
-	Pureza del H_2SO_4	:	95 %
-	Densidad del H_2SO_4, (95 %)	:	1,84 g/ml

4. El análisis delñ mineral se realizó al inicio de cada campaña, cumpliendo para ello con normas tales como: roleo, cuarteo de modo de obtener muestra representativa, conminución 100 % bajo 100 mallas y posterior ataque químico y lectura por absorción atómica.

5. La muestra final de solución fuerte o solución rica en cobre, se tomó transcurrido los 30 minutos de agitación, esta muestra fue filtrada, (papel GFA) y posteriormente analizada por absorción atómica previa dilución y adición de HCl, (matriz de lectura, 25 % en HCl).

6. El volumen de solución fuerte recuperada fue estimada en base a la cubicación de los estanques de decantación - floculación.

7. Las pérdidas de volumen de licor fuerte o solución rica en cobre, se estimaron por la diferencia de los resultados obtenidos en los puntos 2 y 6, y la composición en cobre para este volumen de solución de impregnación se asumió obviamente la misma obtenida en el punto 5.

8. El mineral húmedo descobrizado obtenido, fue cuantificado en base a factores de reducción de peso, factor que se obtuvo producto de ensayos en laboratorio realizados antes o durante el ejercicio de cada prueba.

   El contenido de cobre de este mismo se cuantificó por diferencia, (en la mayoría de los casos), aunque se realizaron algunos análisis para este sólido estéril, los cuales ratificaron los balances de masas correspondientes, (error de balance del orden de 2 %), por lo cual se desidió eliminar dicho análisis a modo de economía.

9. La eficiencia de lixiviación de cobre se efectuó en base al cobre oxidado, (cobre soluble), presente en el mineral. Es por esta razón que en algunos casos se reportan lixiviaciones con eficiencias de solubilización de cobre sobre el 100 %, lo que indica que se solubilizó el 100 % del cobre oxidado y además una fracción del cobre insoluble, (sulfuro de cobre) también fue oxidado.

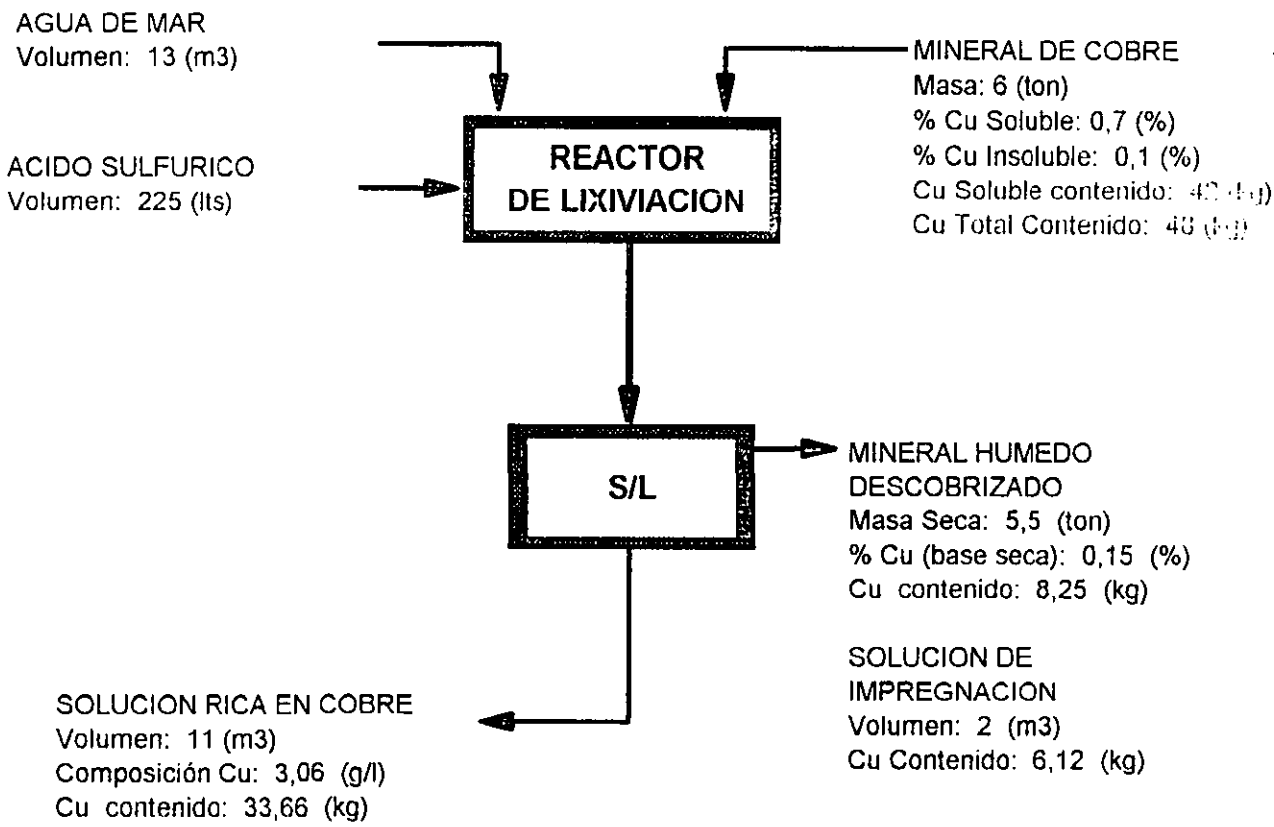
Finalmente, se destaca que por razones de economía, la totalidad de los análisis fueron realizados por personal independiente, (Ing. Civil Químico, tecnólogos Químicos), los cuales proporcionaron la información informalmente, lo que impide mostrar certificados de análisis y solo se cuenta con la información anotada en los cuadernos vitácoras de cada prueba. Sin embargo y reconociendo de nuestra parte la falta de formalidad para rendir este informe técnico, se solicitó a la profesional responsable, Srta. María Lorena Alvarez, redactar una carta dando fe de la ejecución y los resultados de cada análisis, (ver anexo B).

PRIMERA CAMPAÑA

Ley Mineral	:	**0,7 % Cu Soluble** **0,1 % Cu Insoluble**
Número de Lixiviaciones	:	**20**
Mineral Tratado	:	**142 toneladas**
Eficiencia de Lixiviación Promedio	:	**86,36 %**

LIXIVIACION N°1

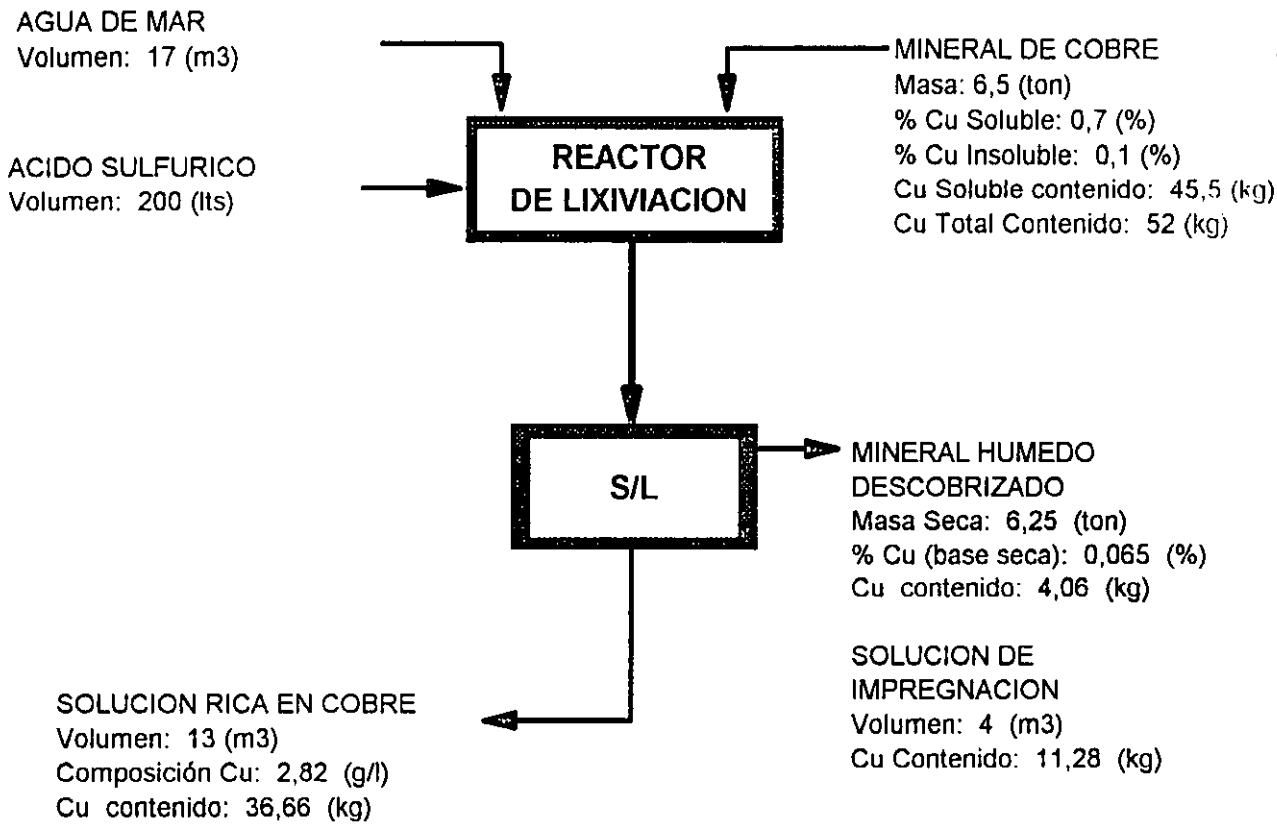
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 94,7 %

LIXIVIACION N°2

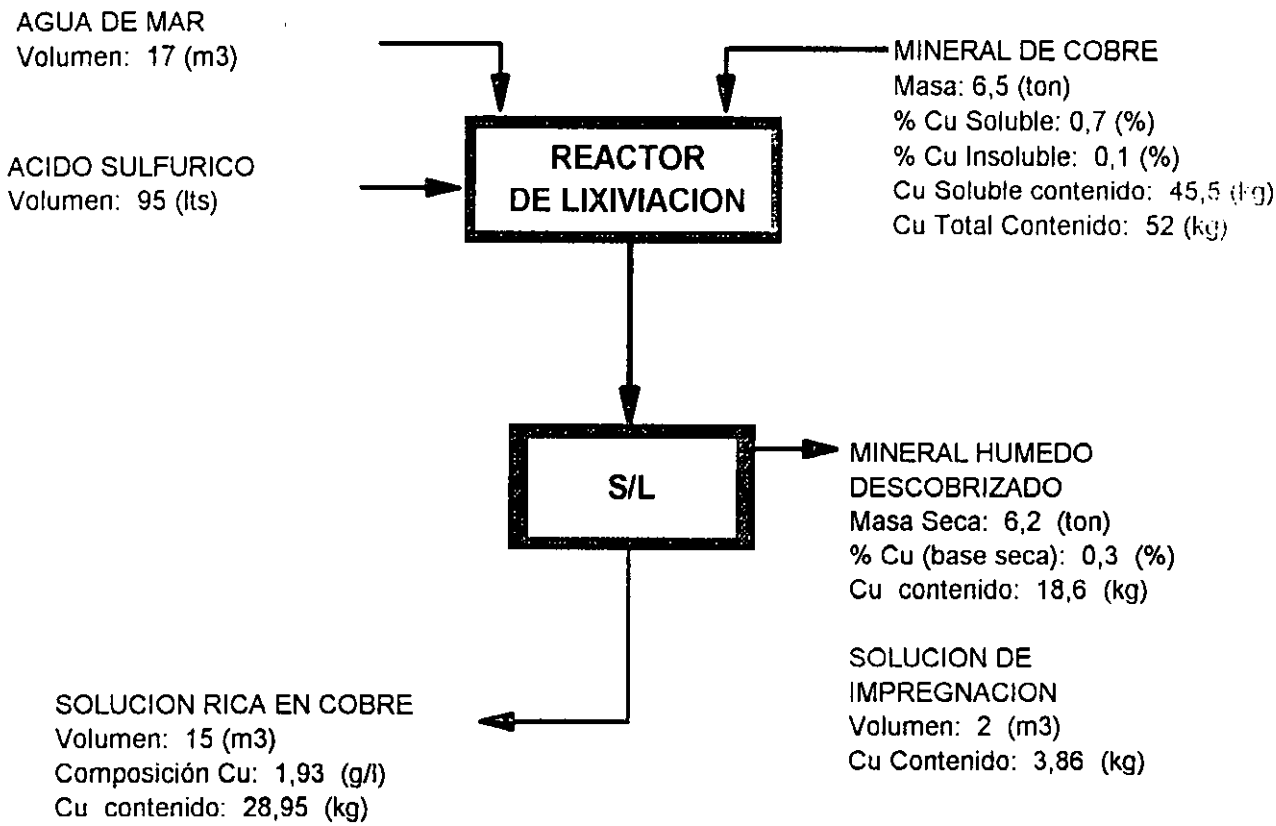
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 105,4 %

LIXIVIACION N°3

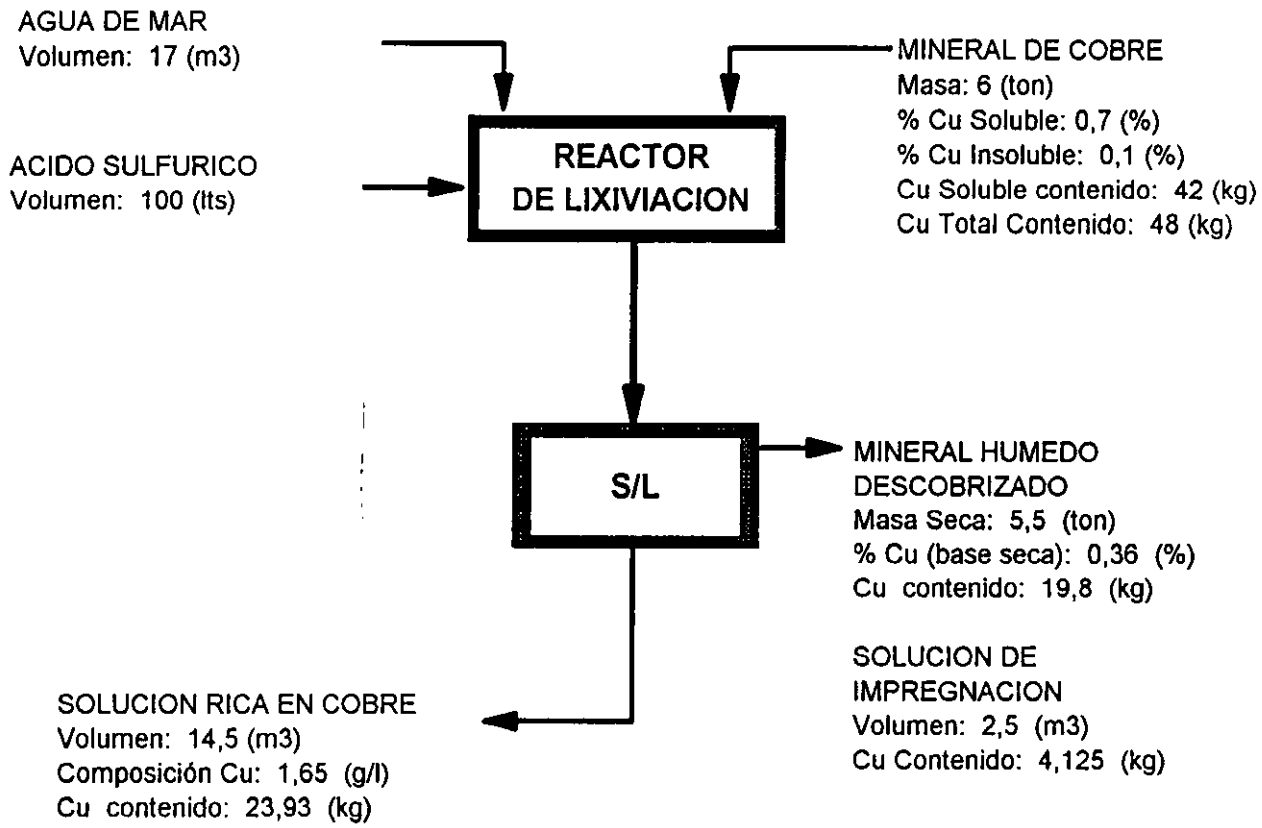
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 72,11 %

LIXIVIACION N°4

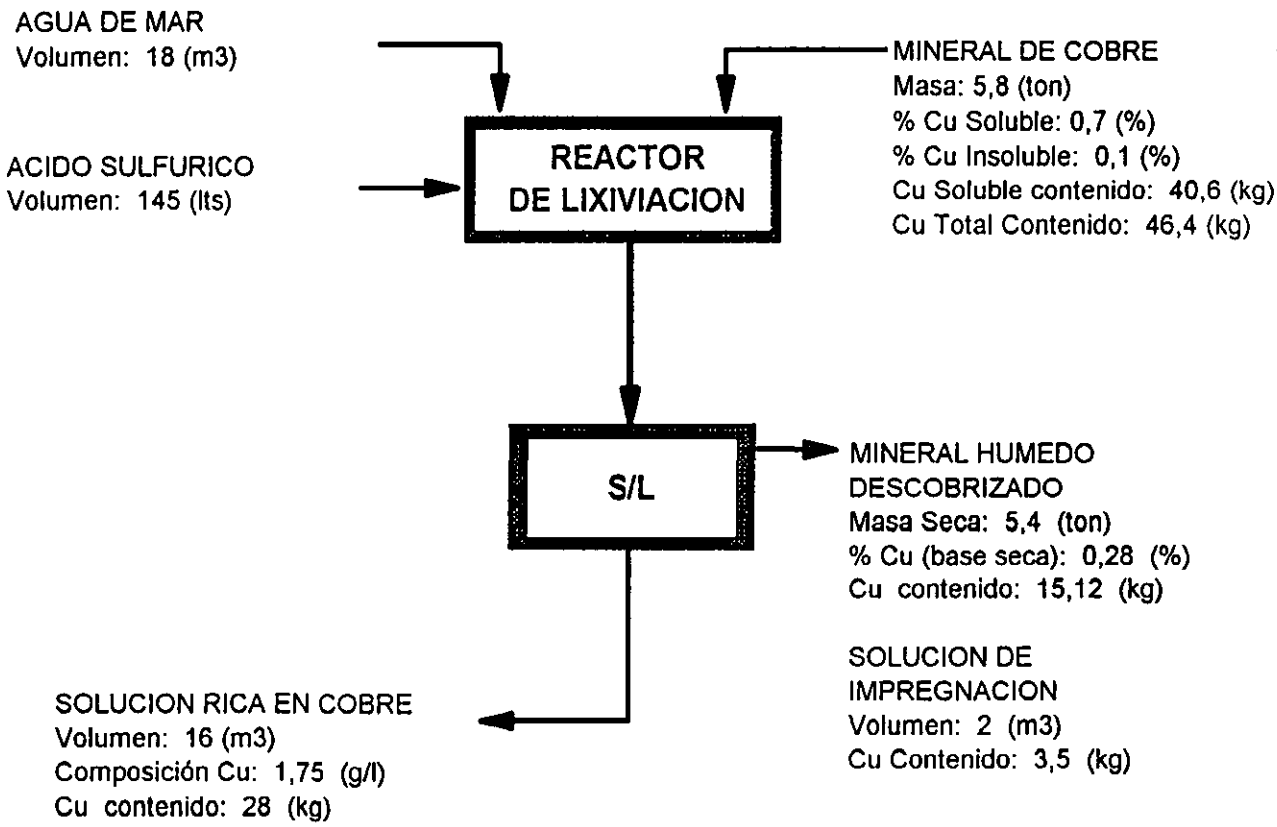
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 66,8 %

LIXIVIACION N°5

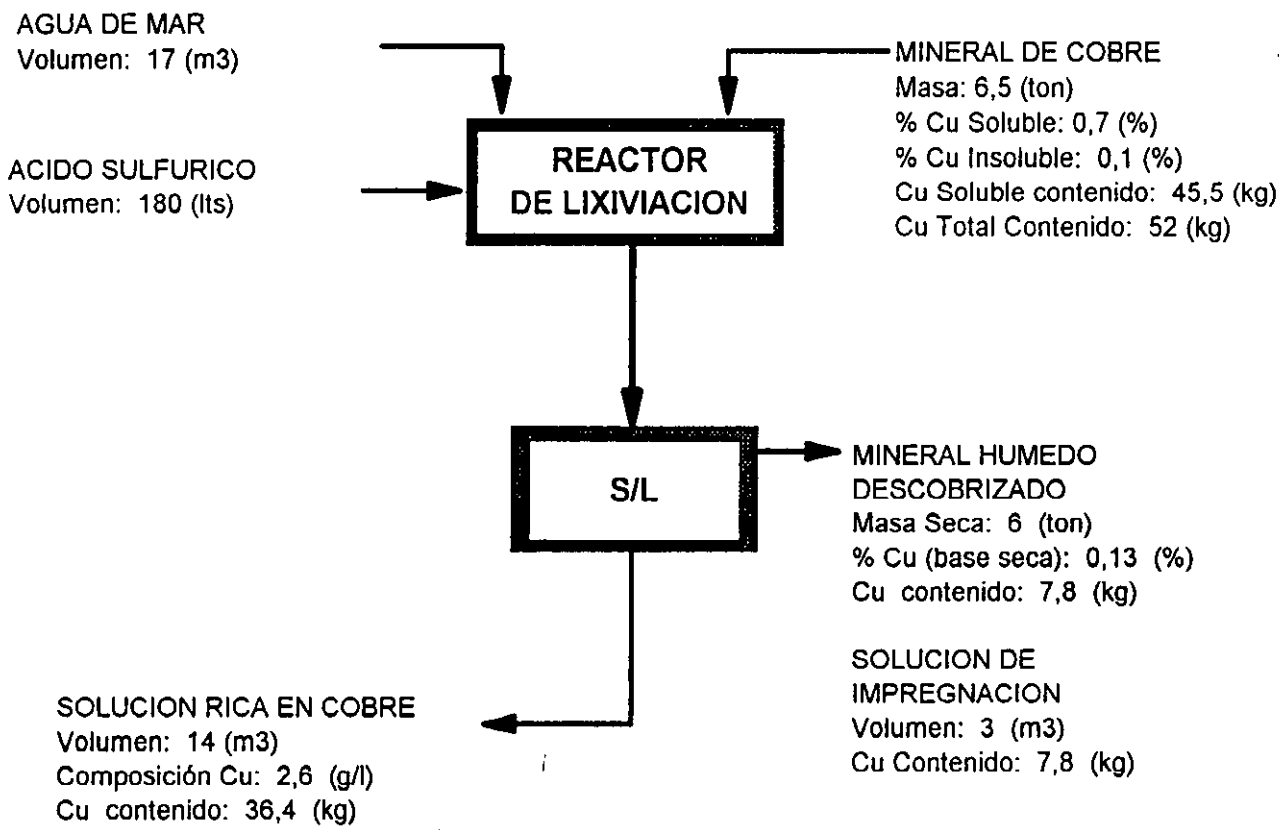
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 77,6 %

LIXIVIACION N°6

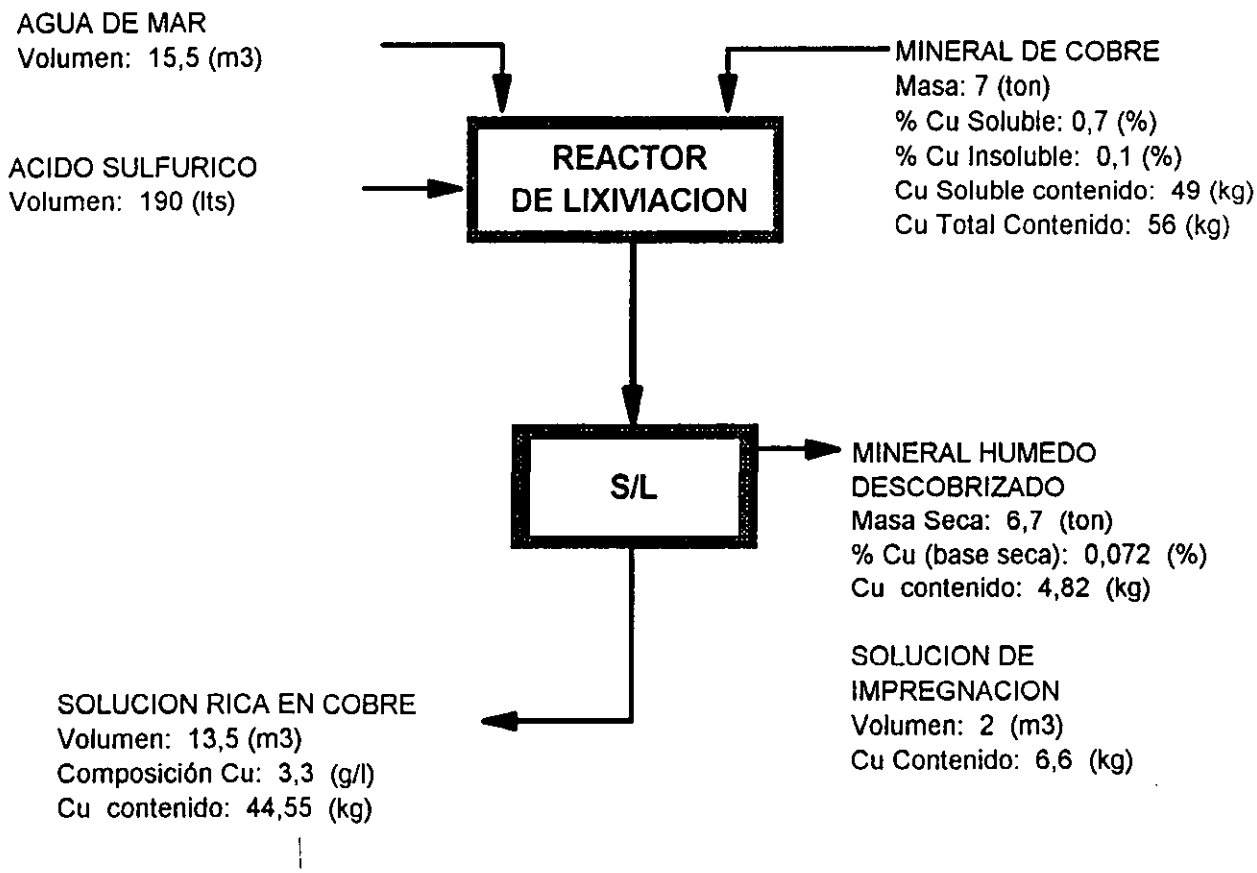
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 97,14 %

LIXIVIACION N°7

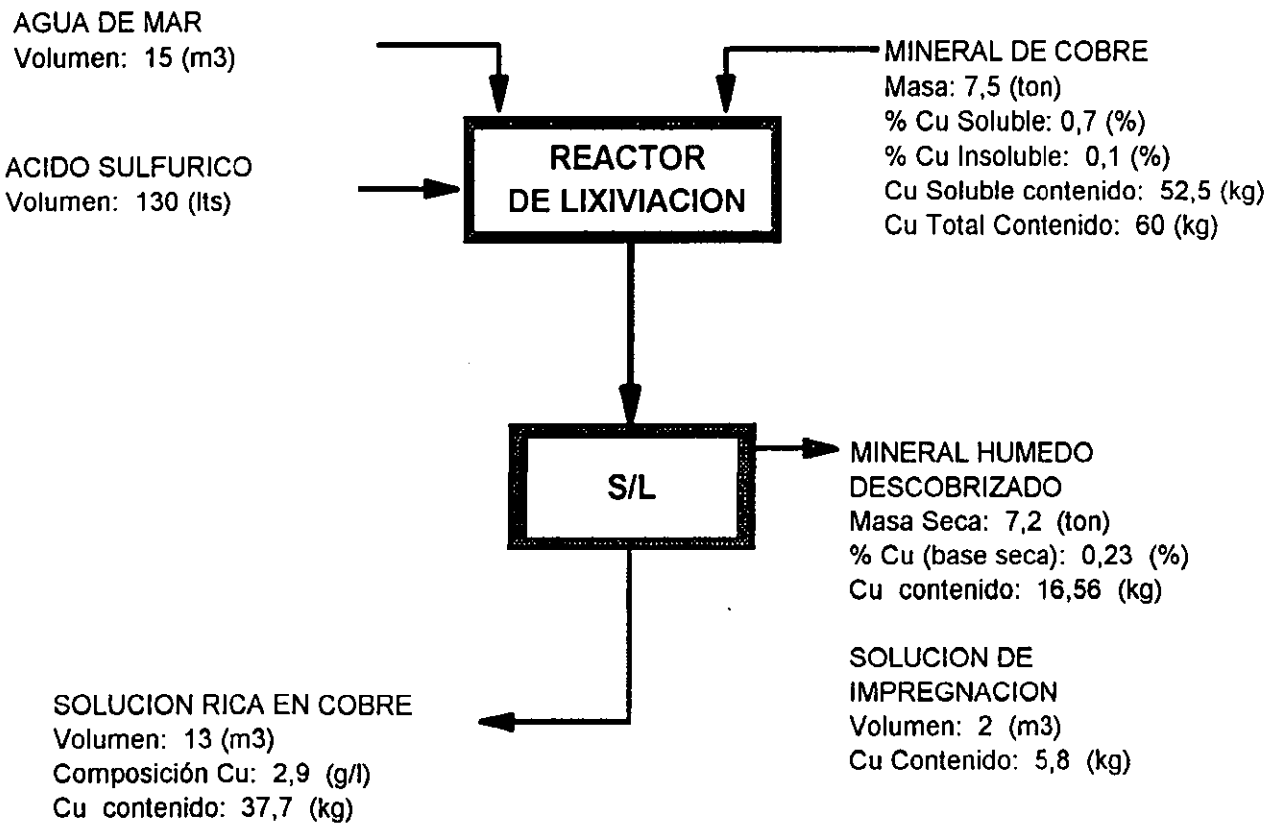
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 104,4 %

LIXIVIACION N°8

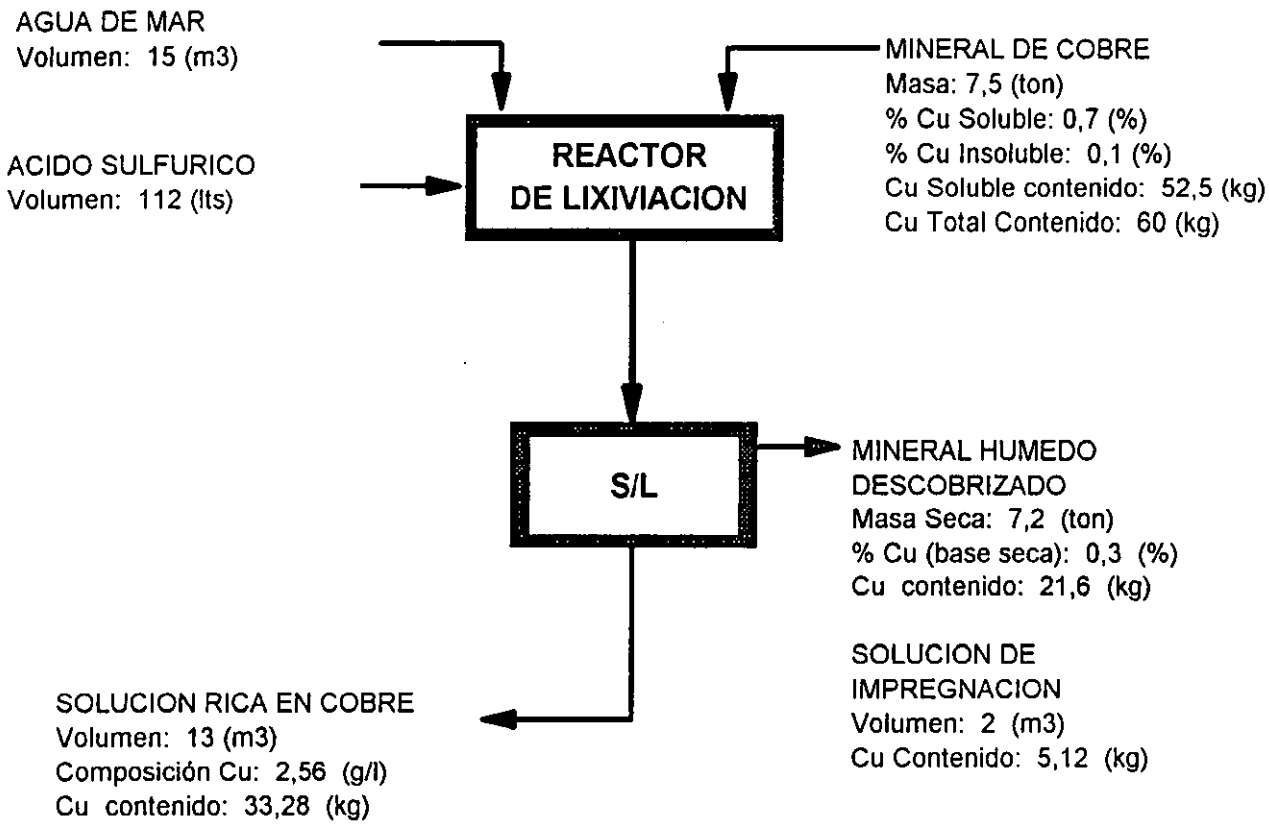
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 82,86 %

LIXIVIACION N°9

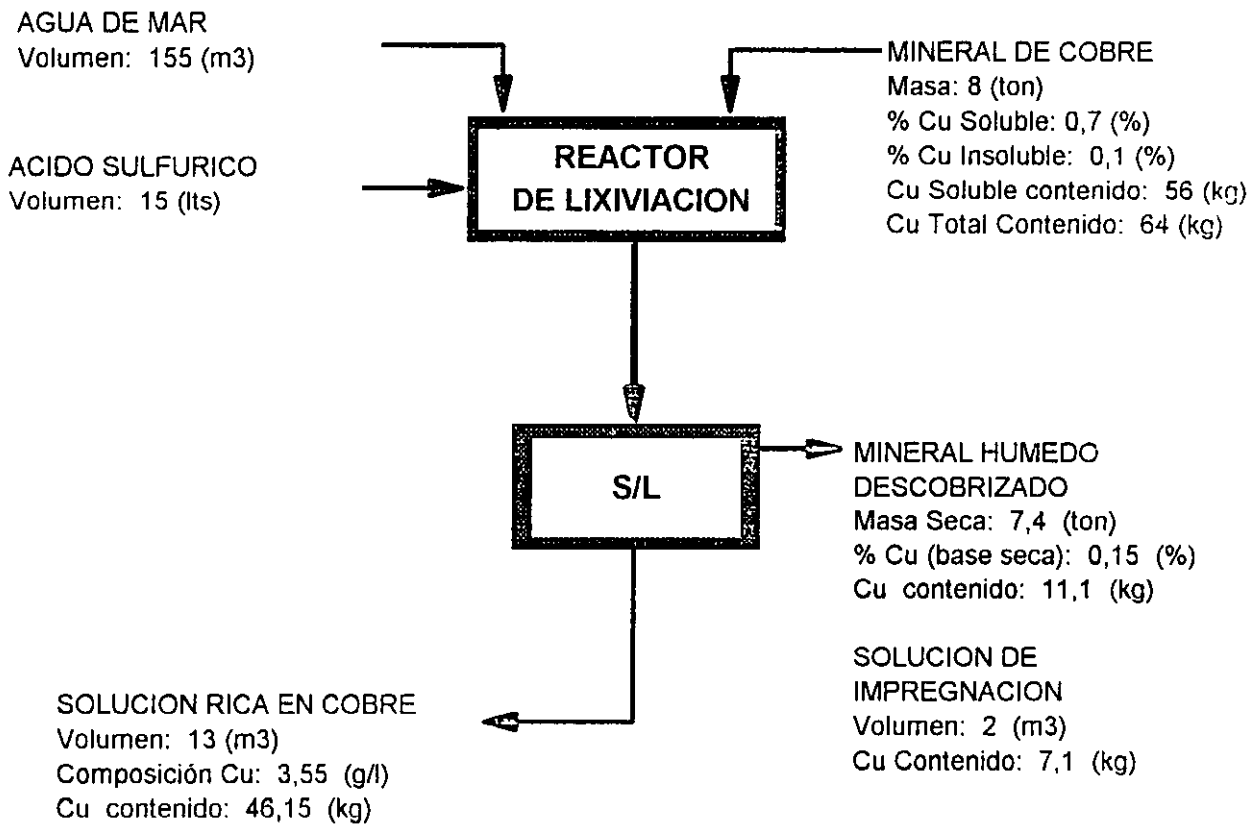
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 73,14 %

LIXIVIACION N°10

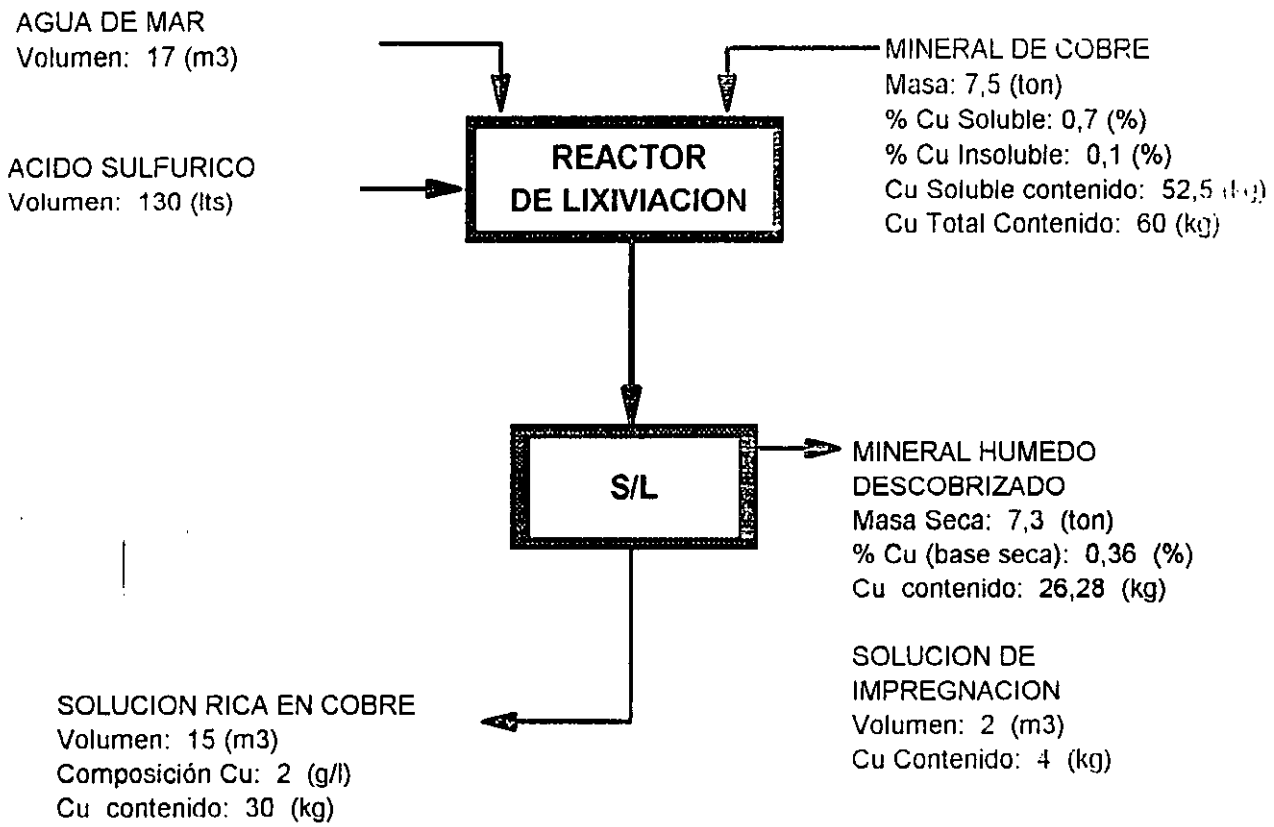
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 95,1 %

LIXIVIACION N°11

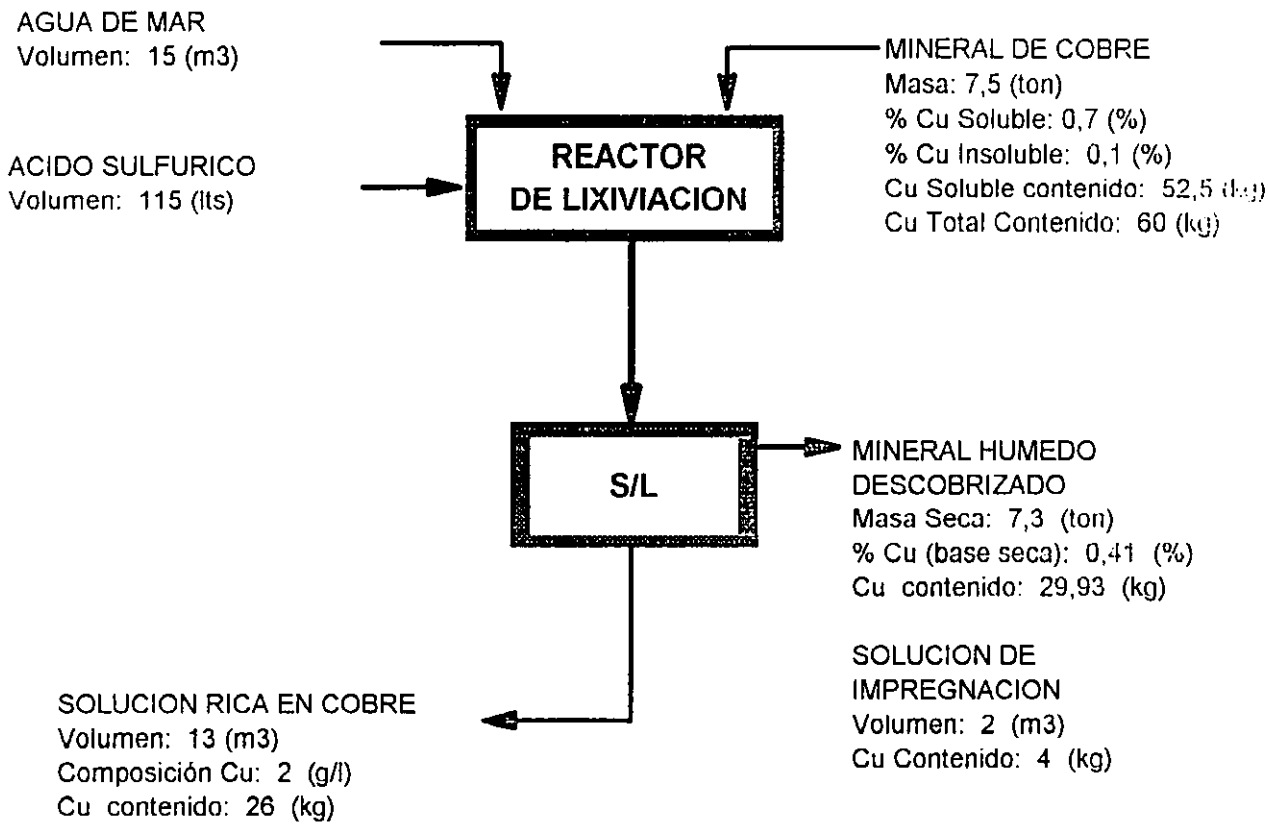
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 64,76 %

LIXIVIACION N°12

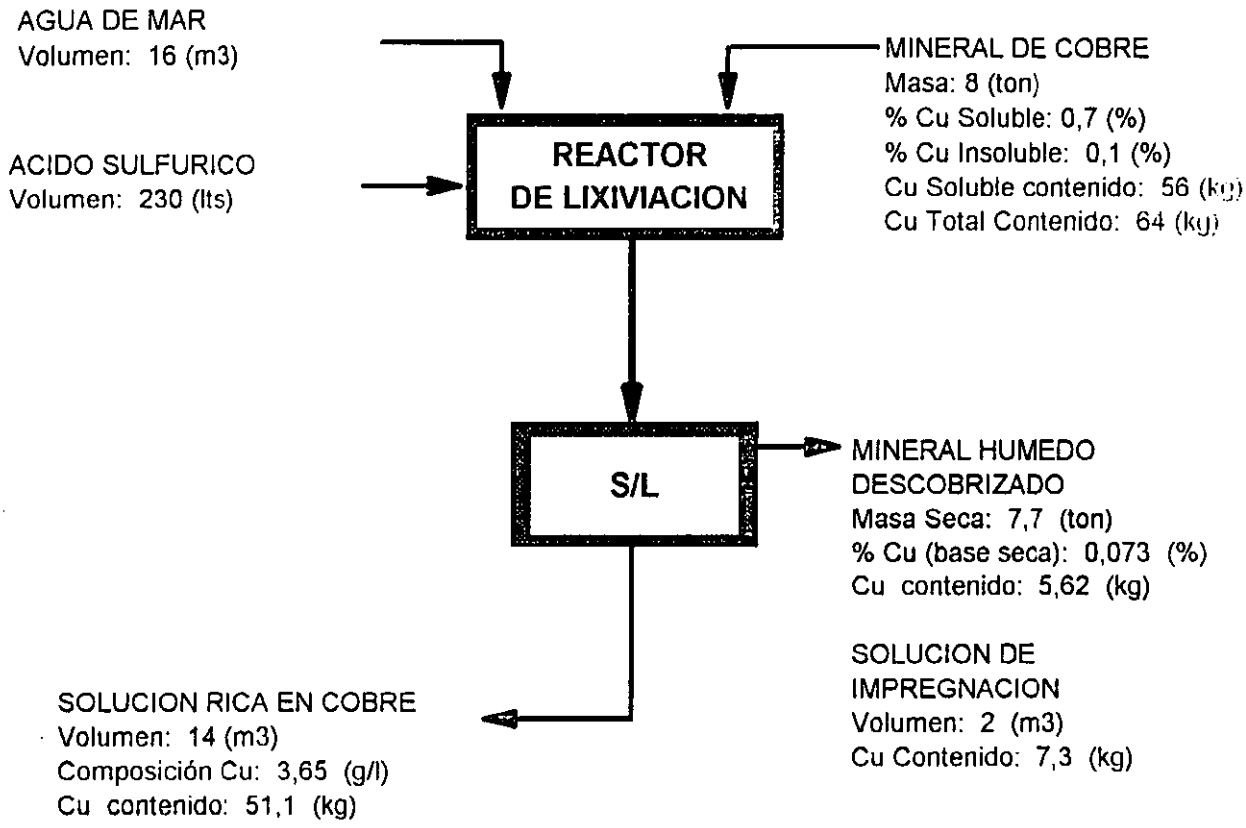
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 57,14 %

LIXIVIACION N°13

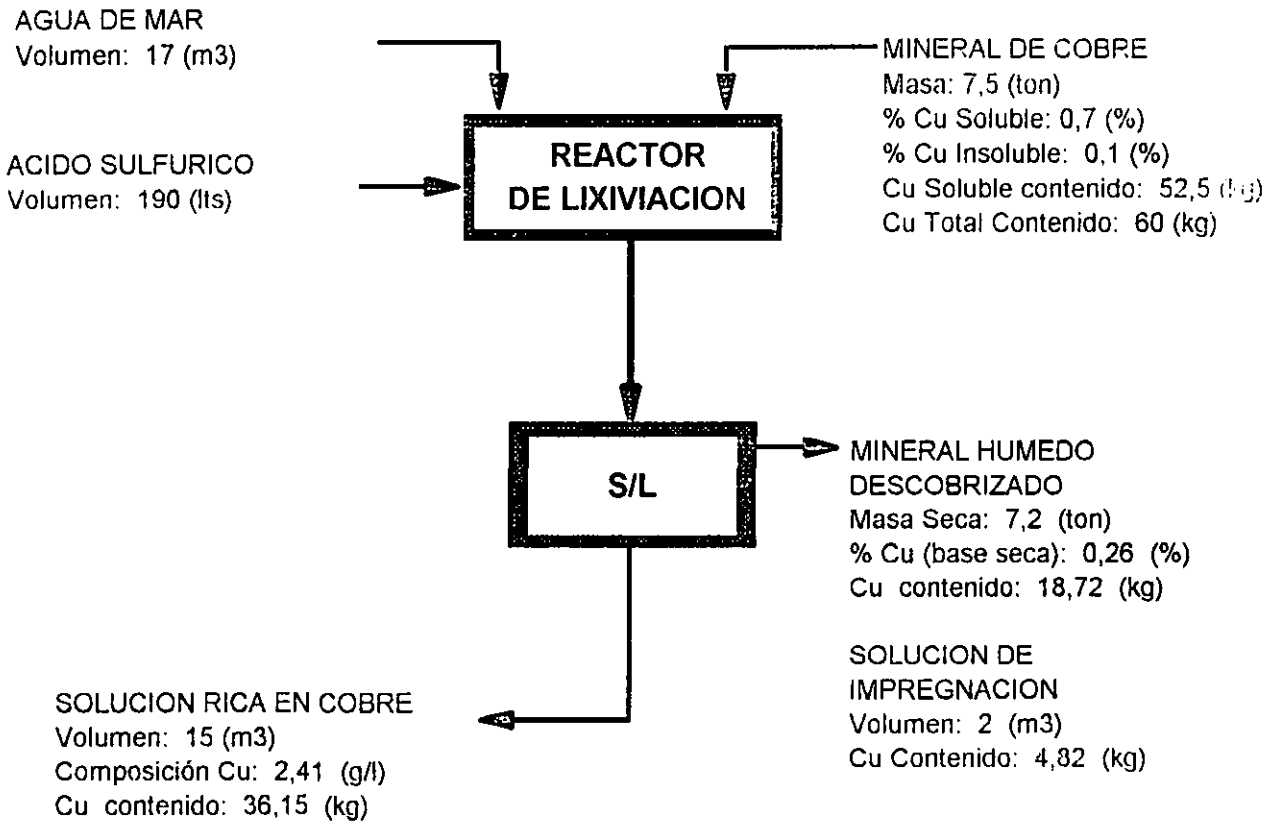
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 104,29 %

LIXIVIACION N°14

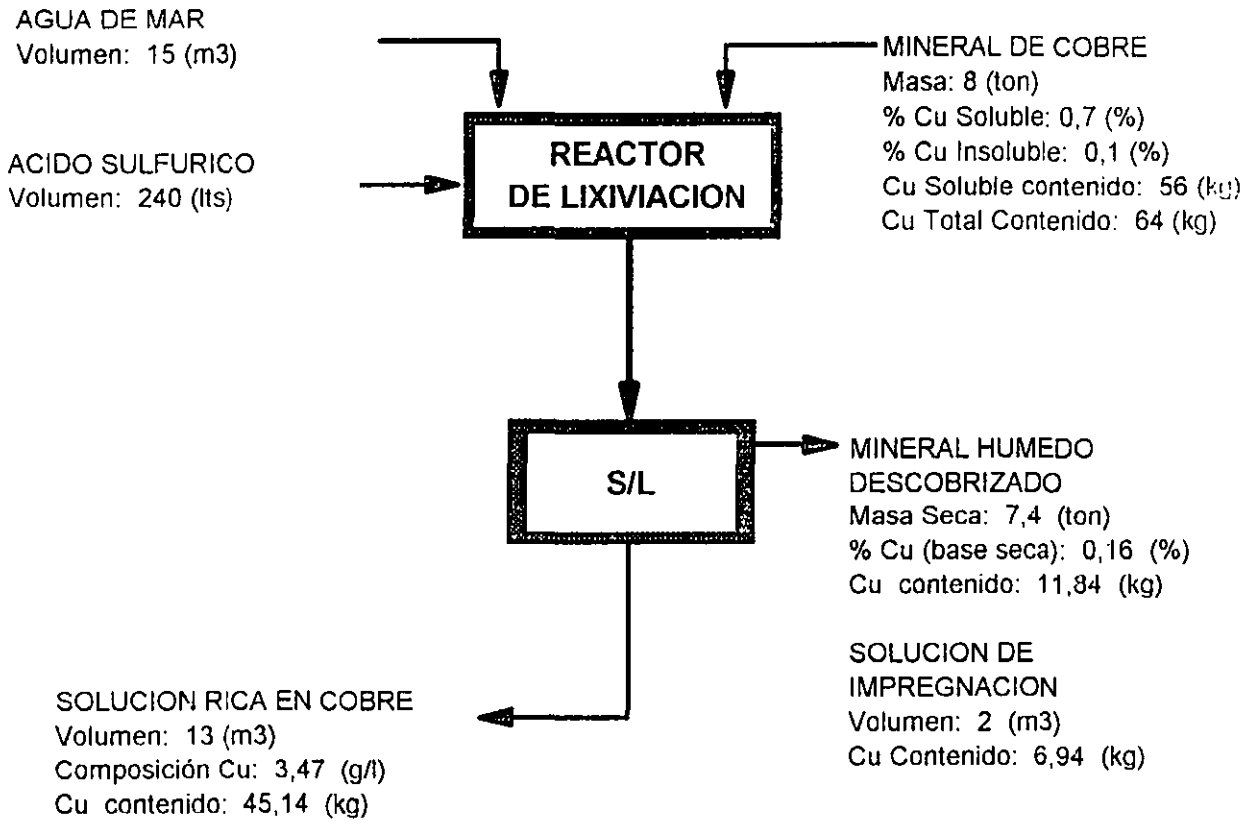
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 78,79 %

LIXIVIACION N°15

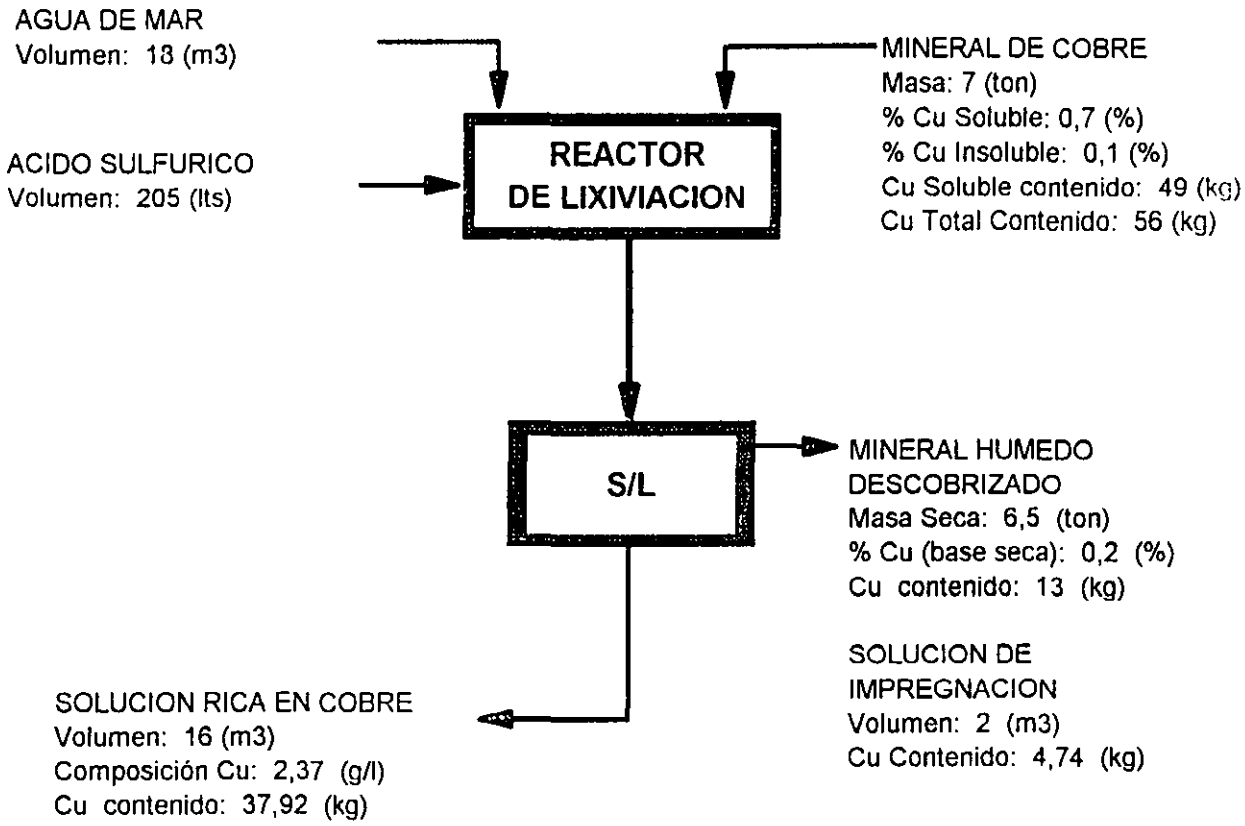
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 93 %

LIXIVIACION N°16

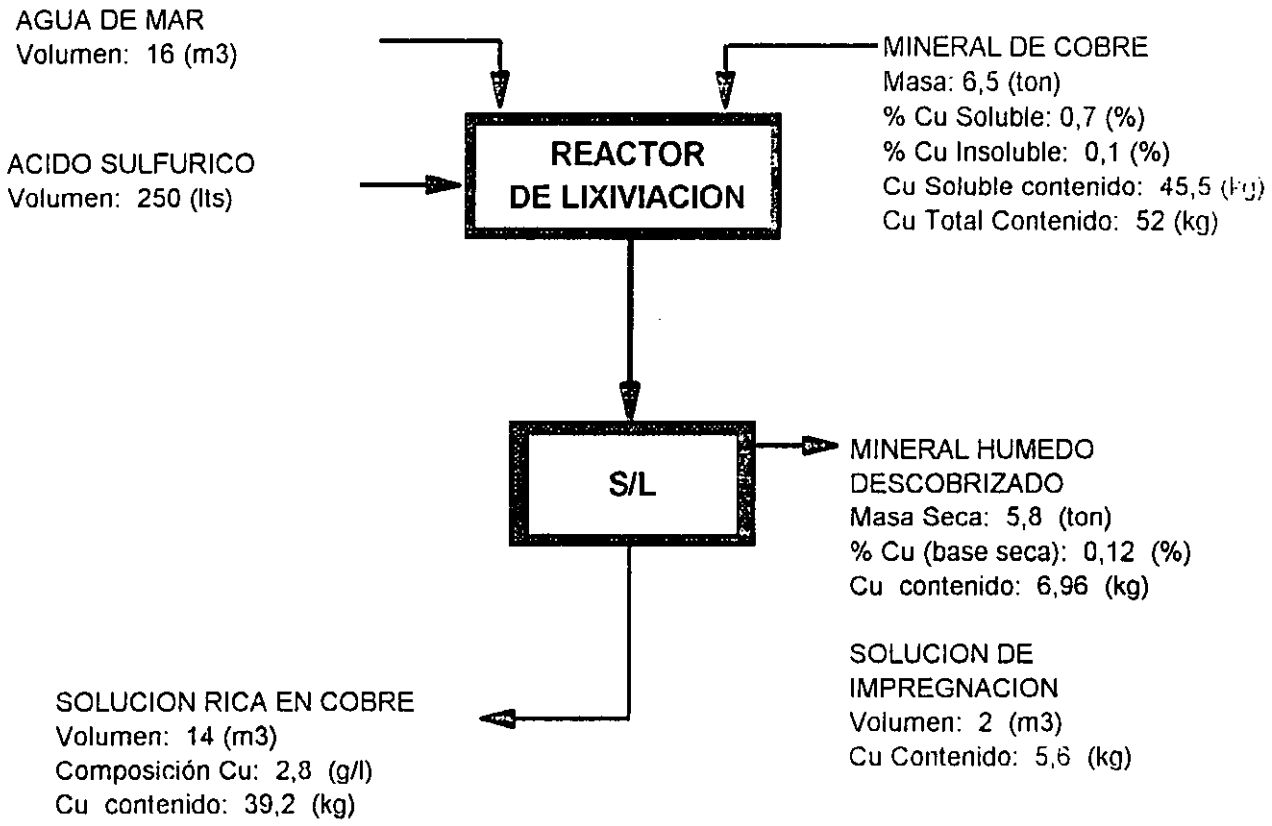
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 87,06 %

LIXIVIACION N°17

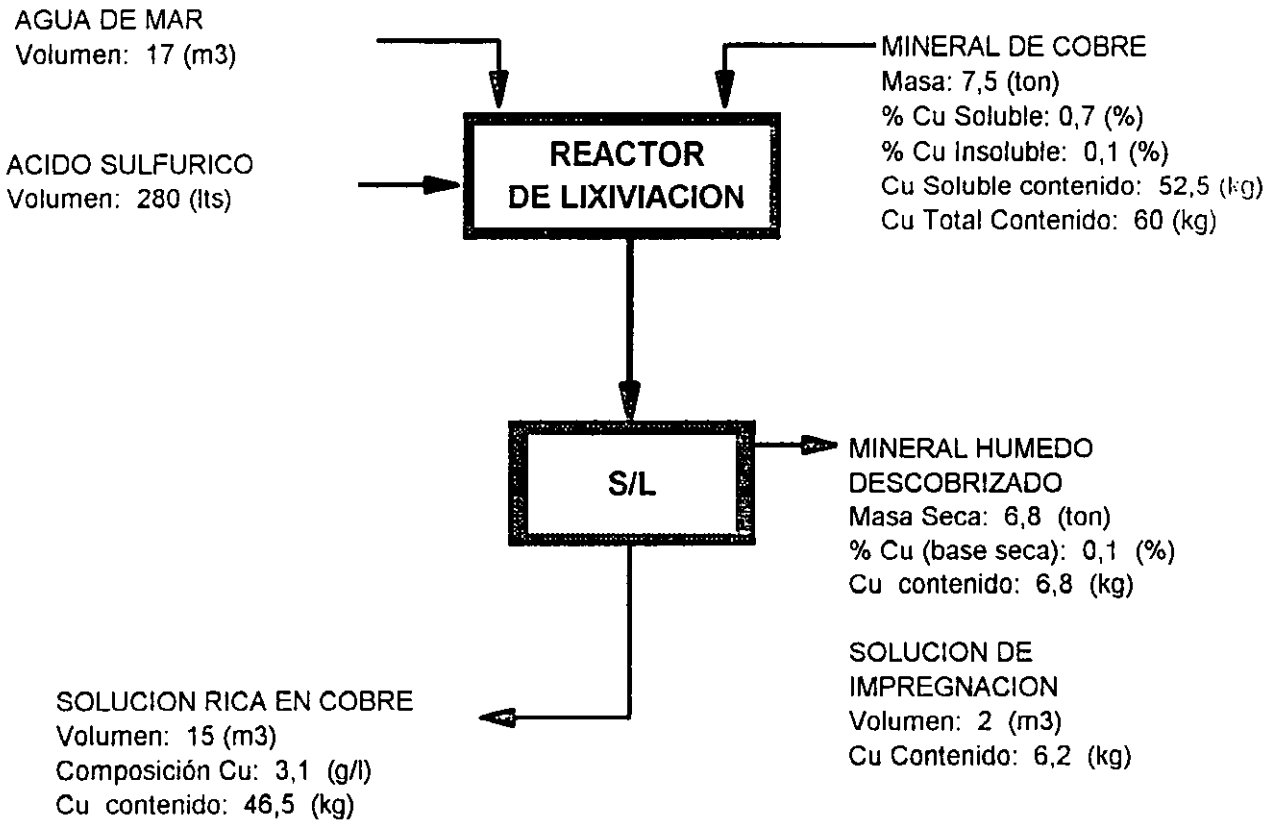
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 98,46 %

LIXIVIACION N°18

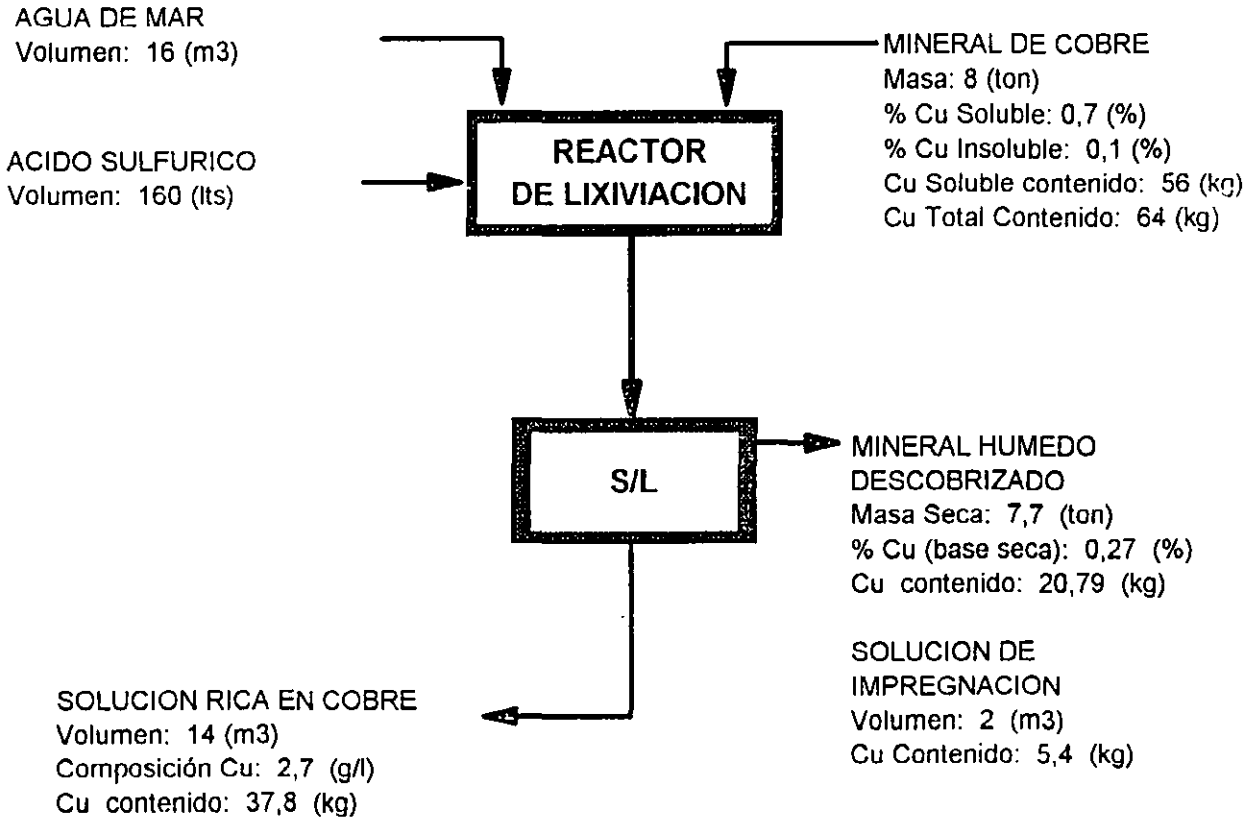
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 100,38 %

LIXIVIACION N°19

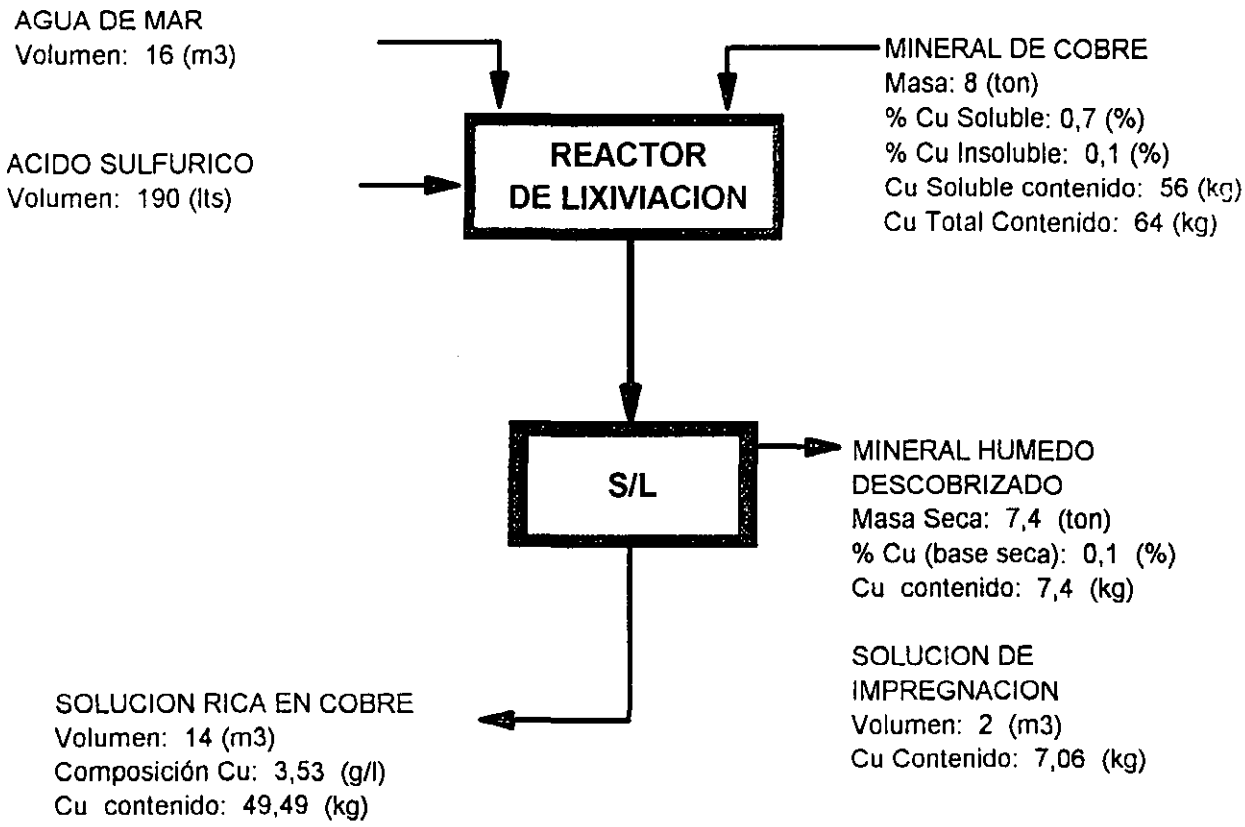
PRIMERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 77,14 %

LIXIVIACION N°20

PRIMERA CAMPAÑA



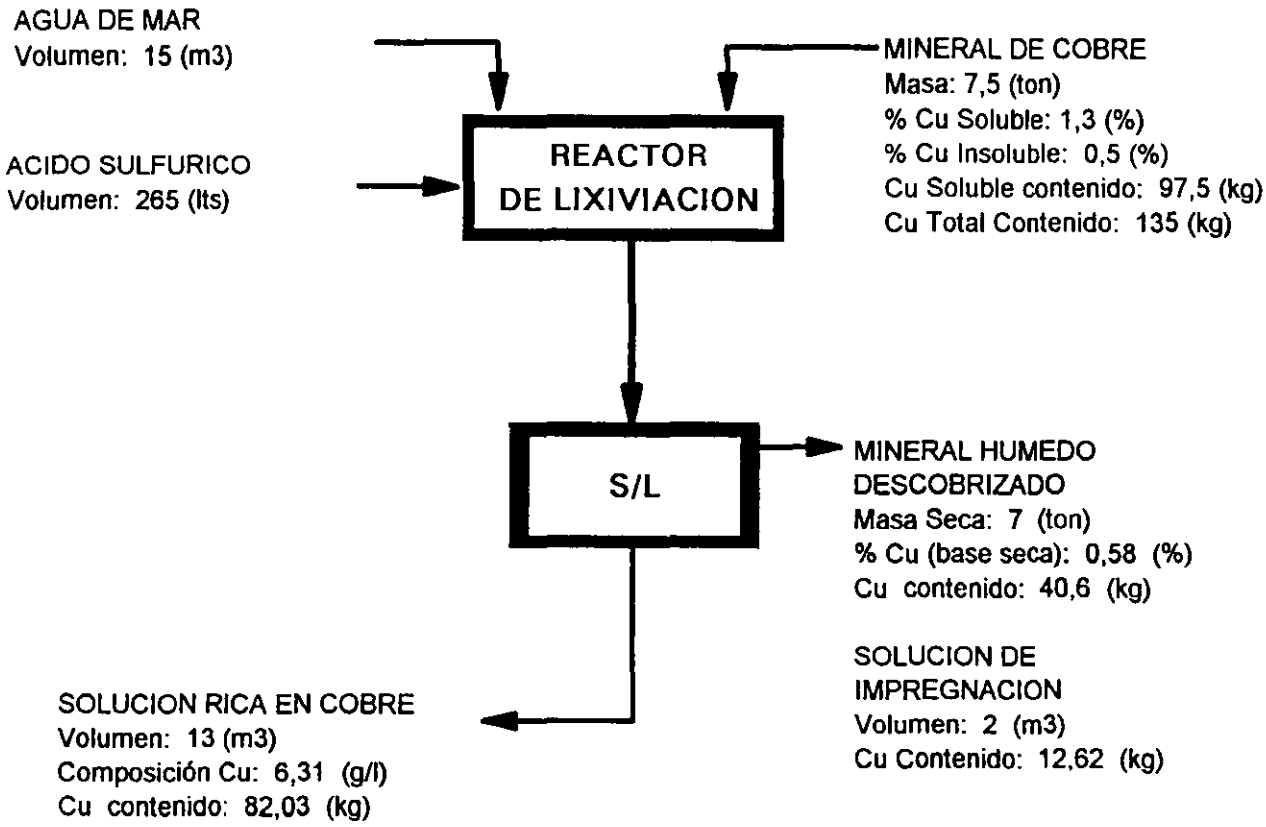
EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 100,98 %

SEGUNDA CAMPAÑA

Ley Mineral	:	**1,3 % Cu Soluble** **0,5 % Cu Insoluble**
Número de Lixiviaciones	:	**17**
Mineral Tratado	:	**128,7 toneladas**
Eficiencia de Lixiviación Promedio	:	**99,38 %**

LIXIVIACION N° 1

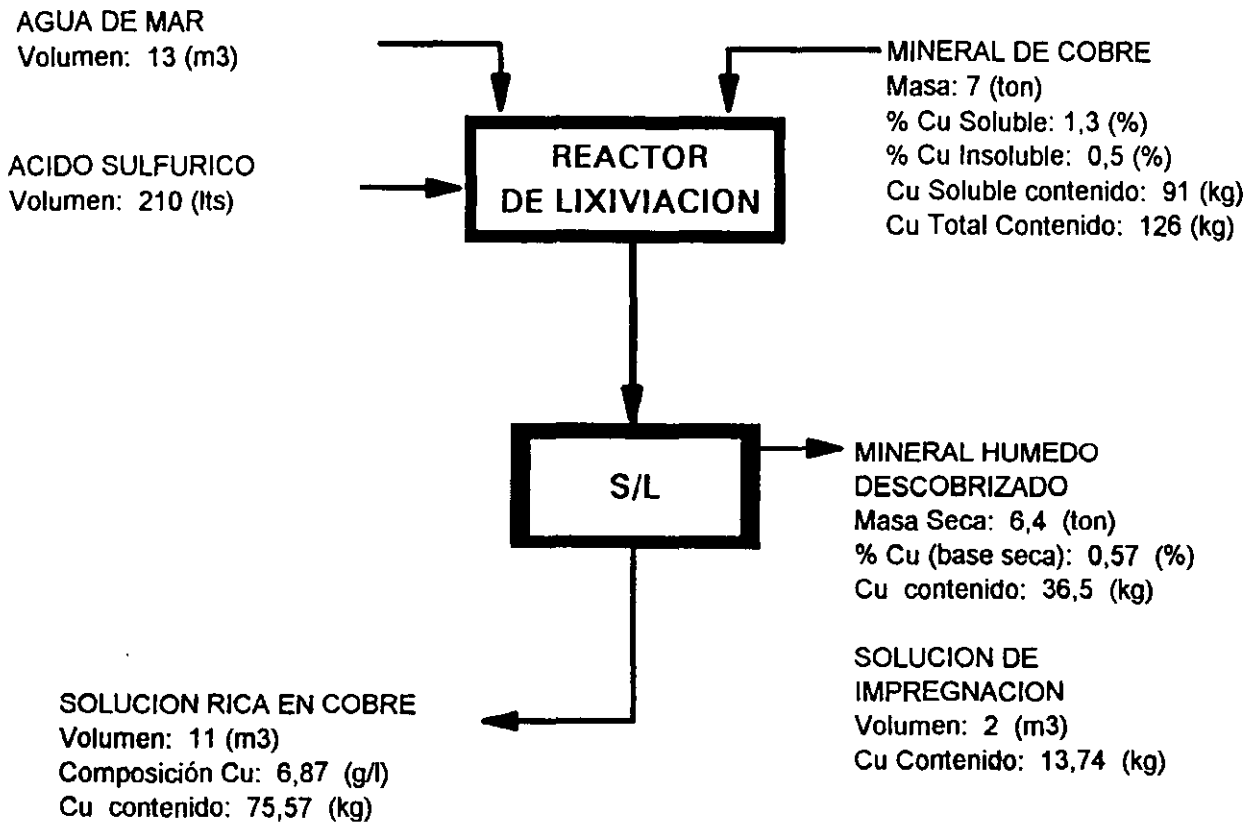
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 97,08 %

LIXIVIACION N° 2

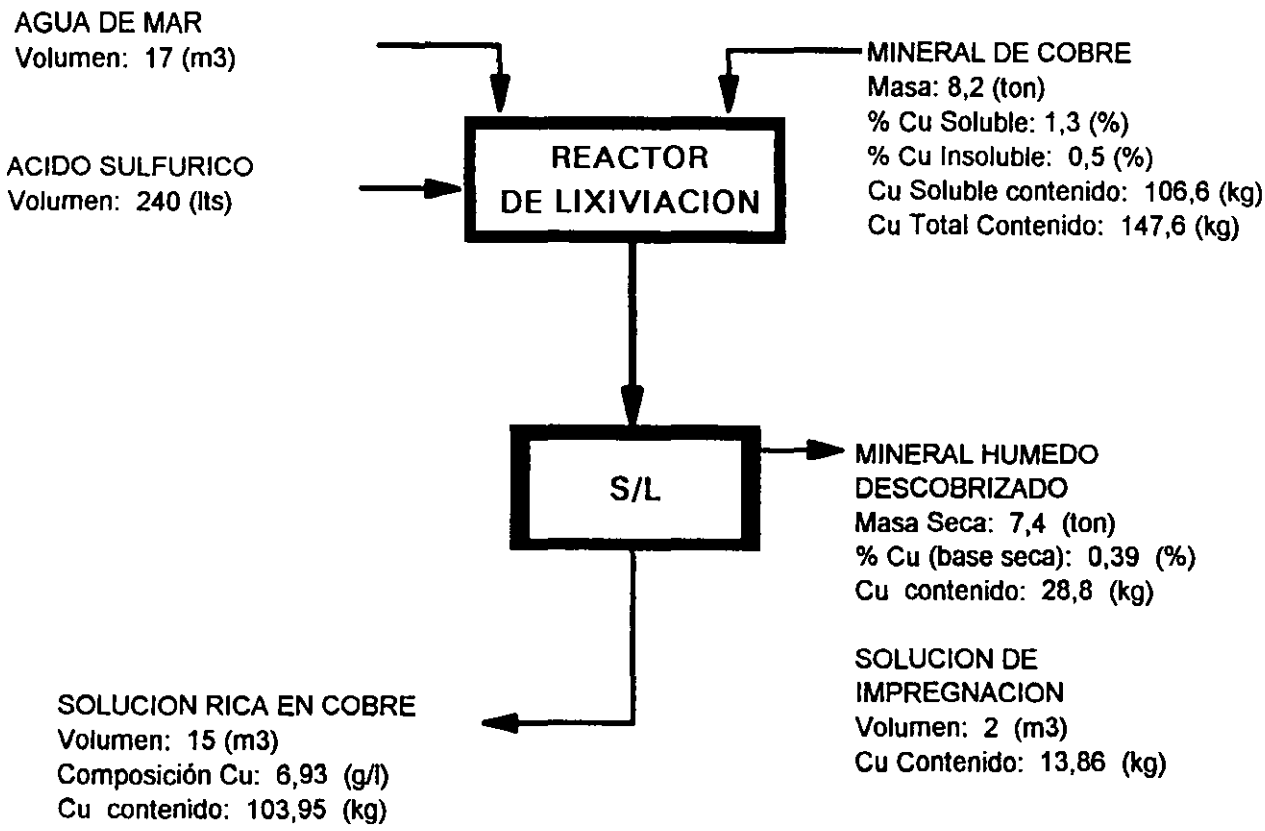
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 98,14 %

LIXIVIACION N° 3

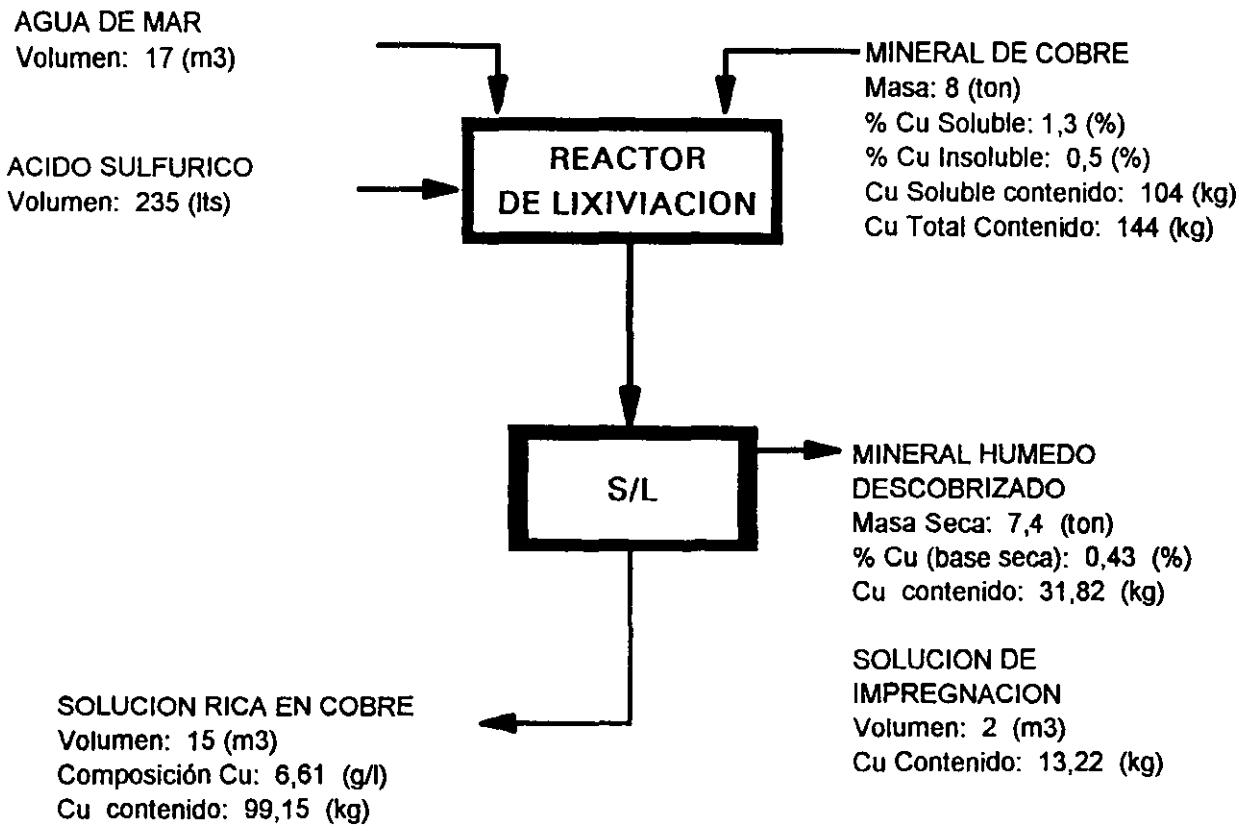
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 110,52 %

LIXIVIACION N°4

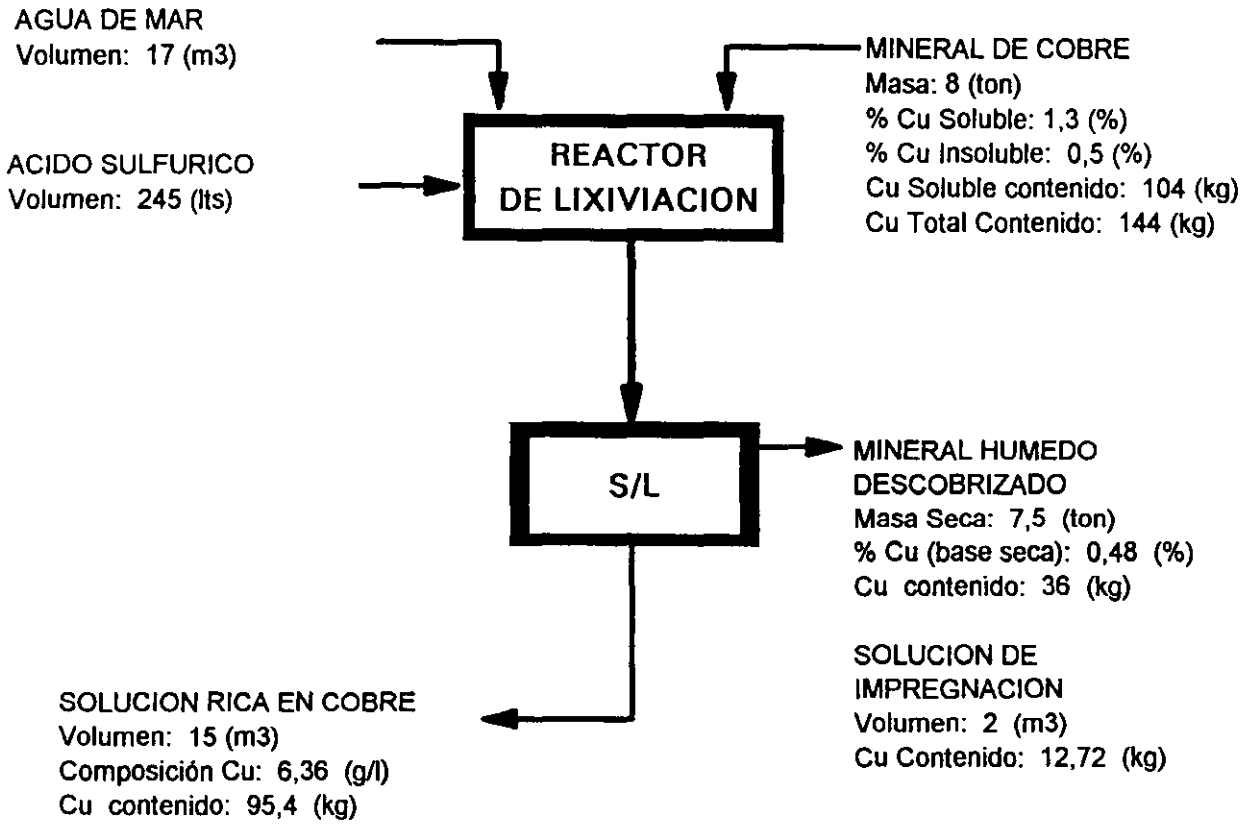
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 108,05 %

LIXIVIACION N° 5

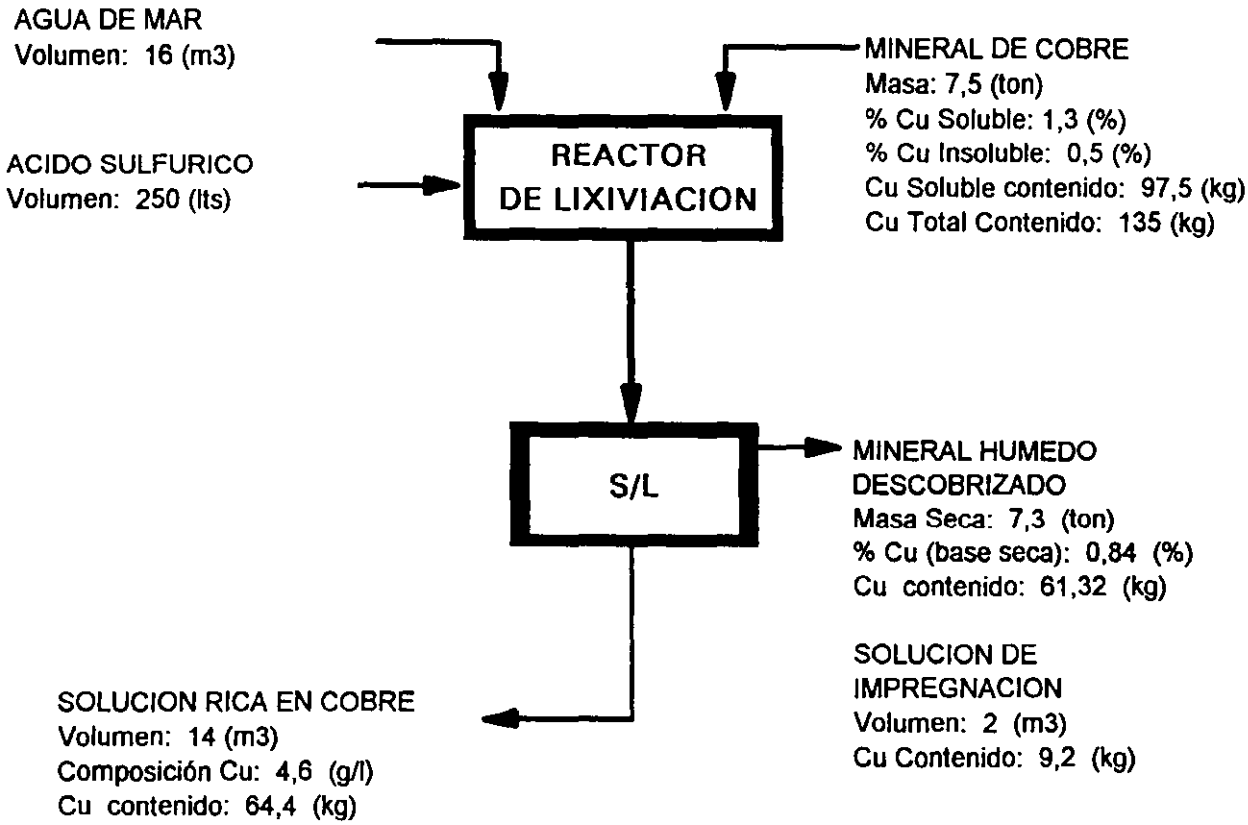
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 103,4 %

LIXIVIACION N°6

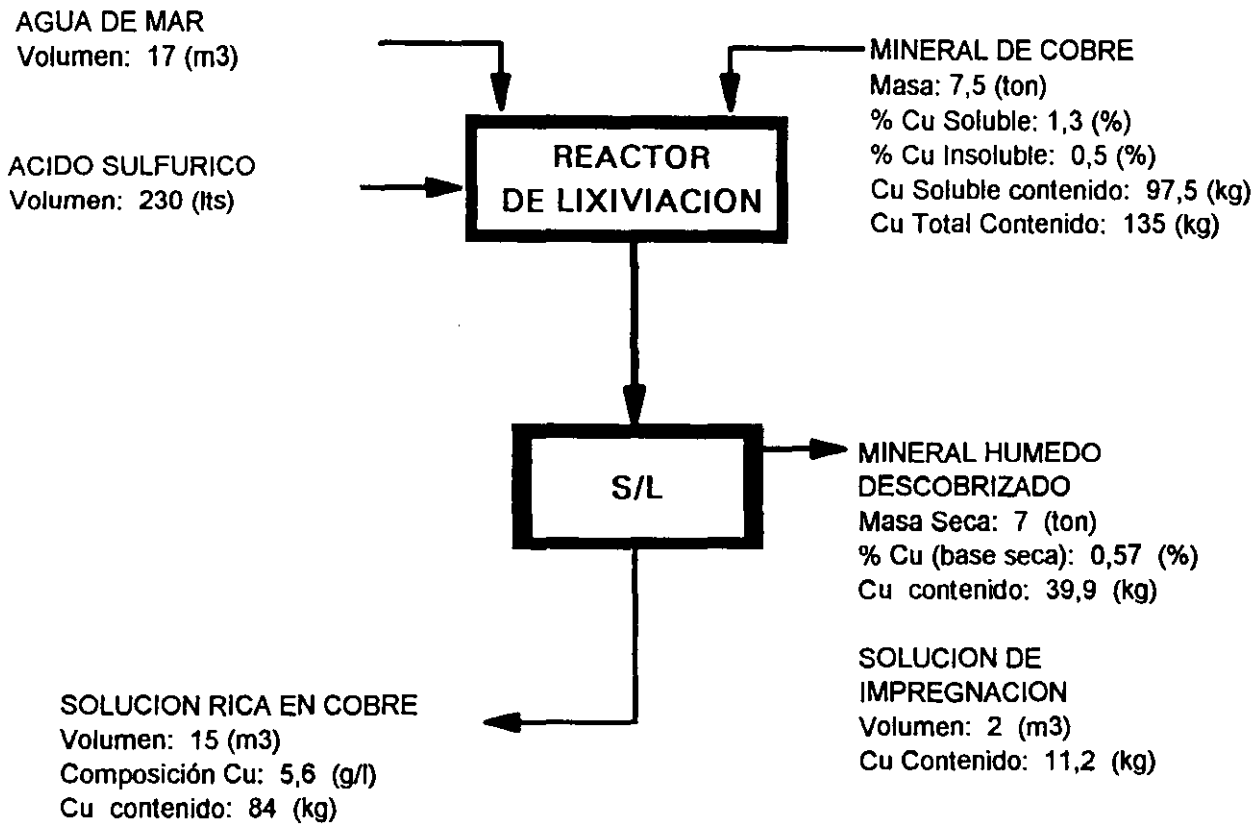
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 75,49 %

LIXIVIACION N° 7

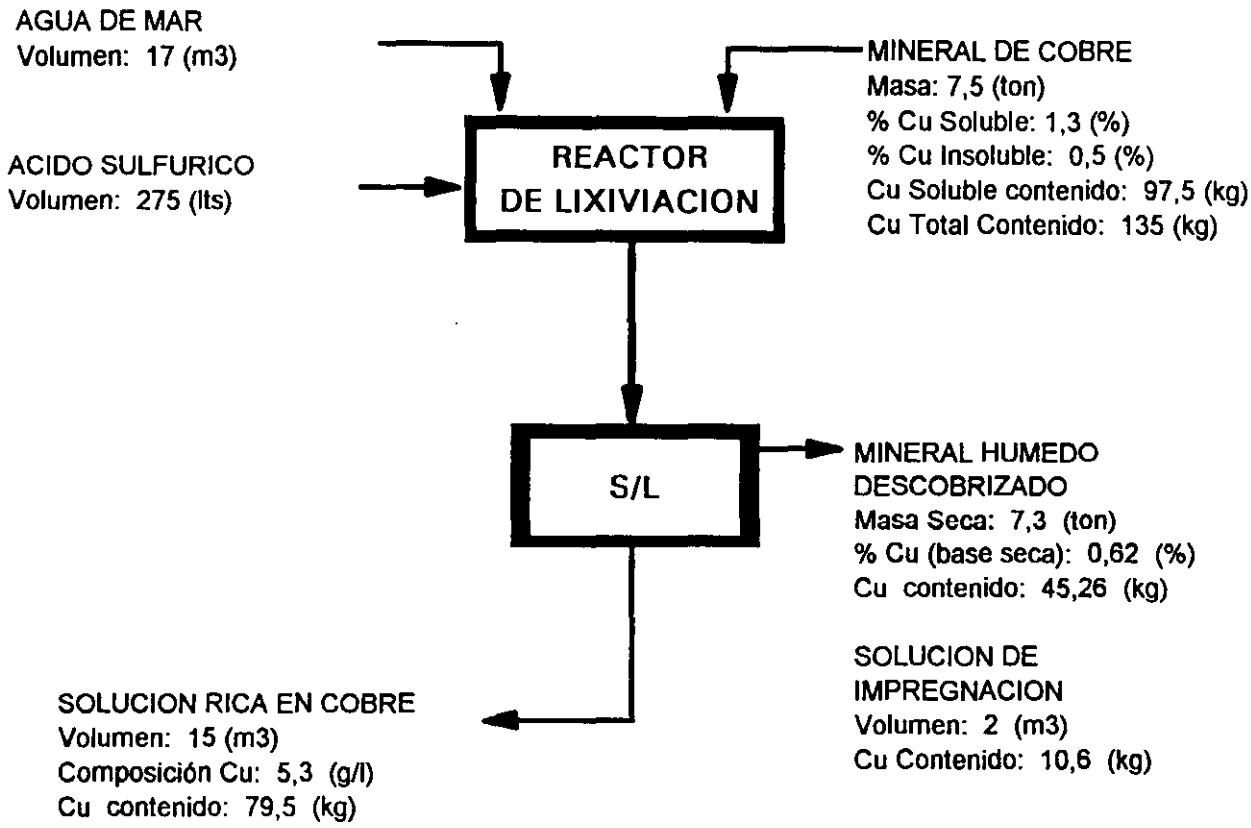
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 97,64 %

LIXIVIACION N°8

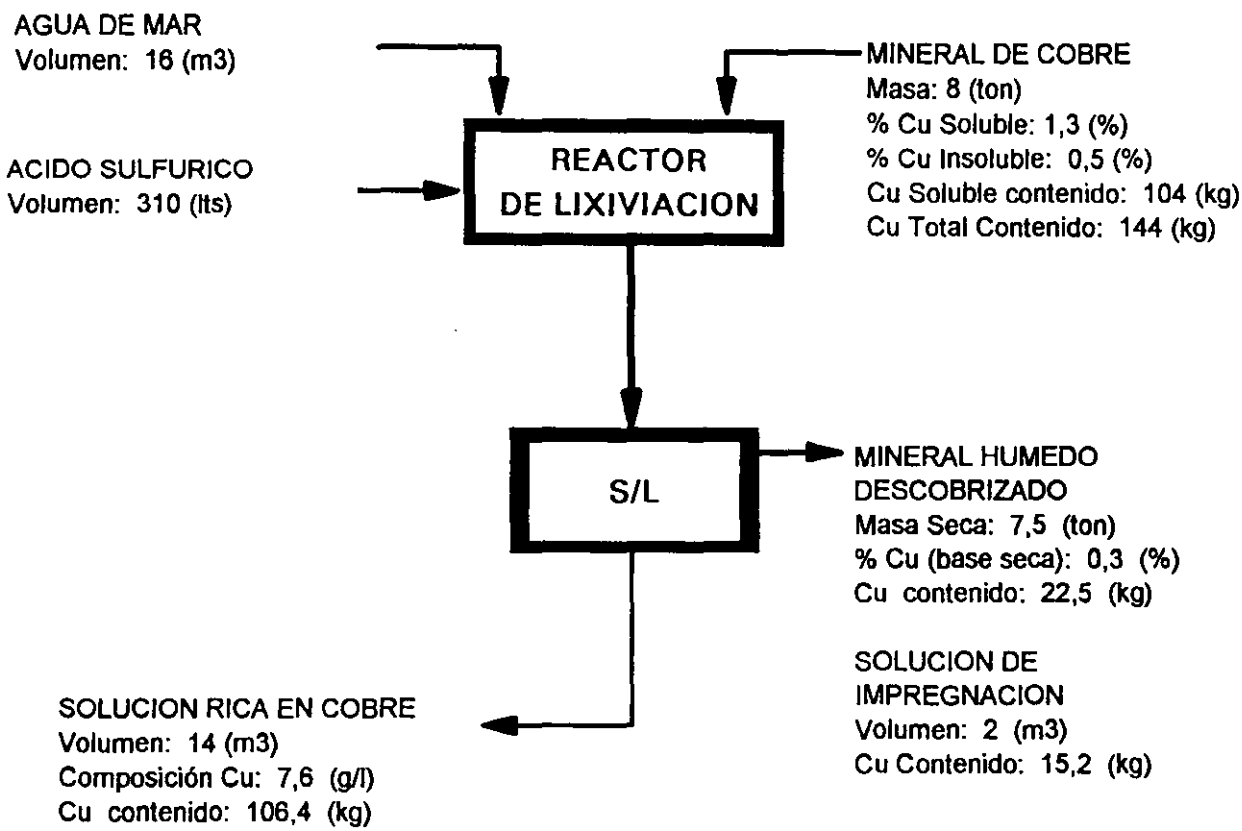
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 92,4 %

LIXIVIACION N°9

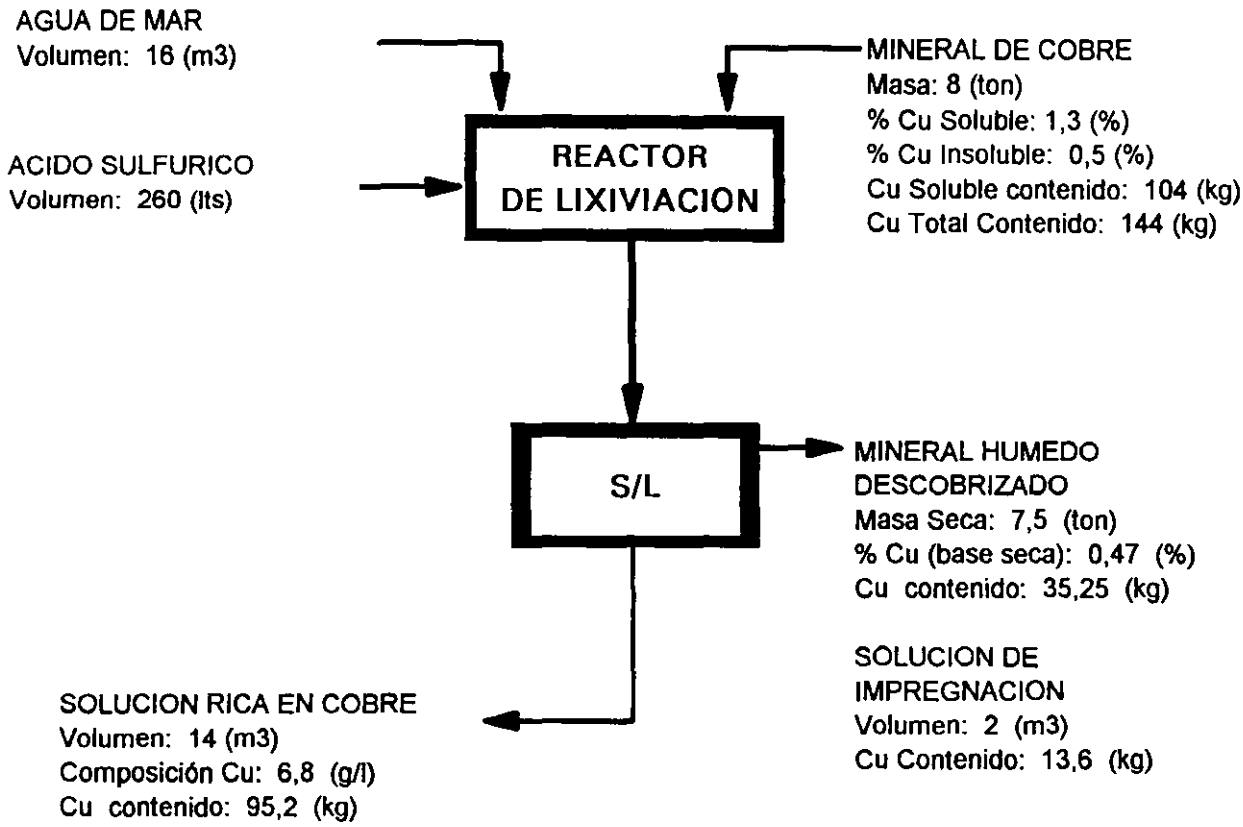
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 116,92 %

LIXIVIACION N° 10

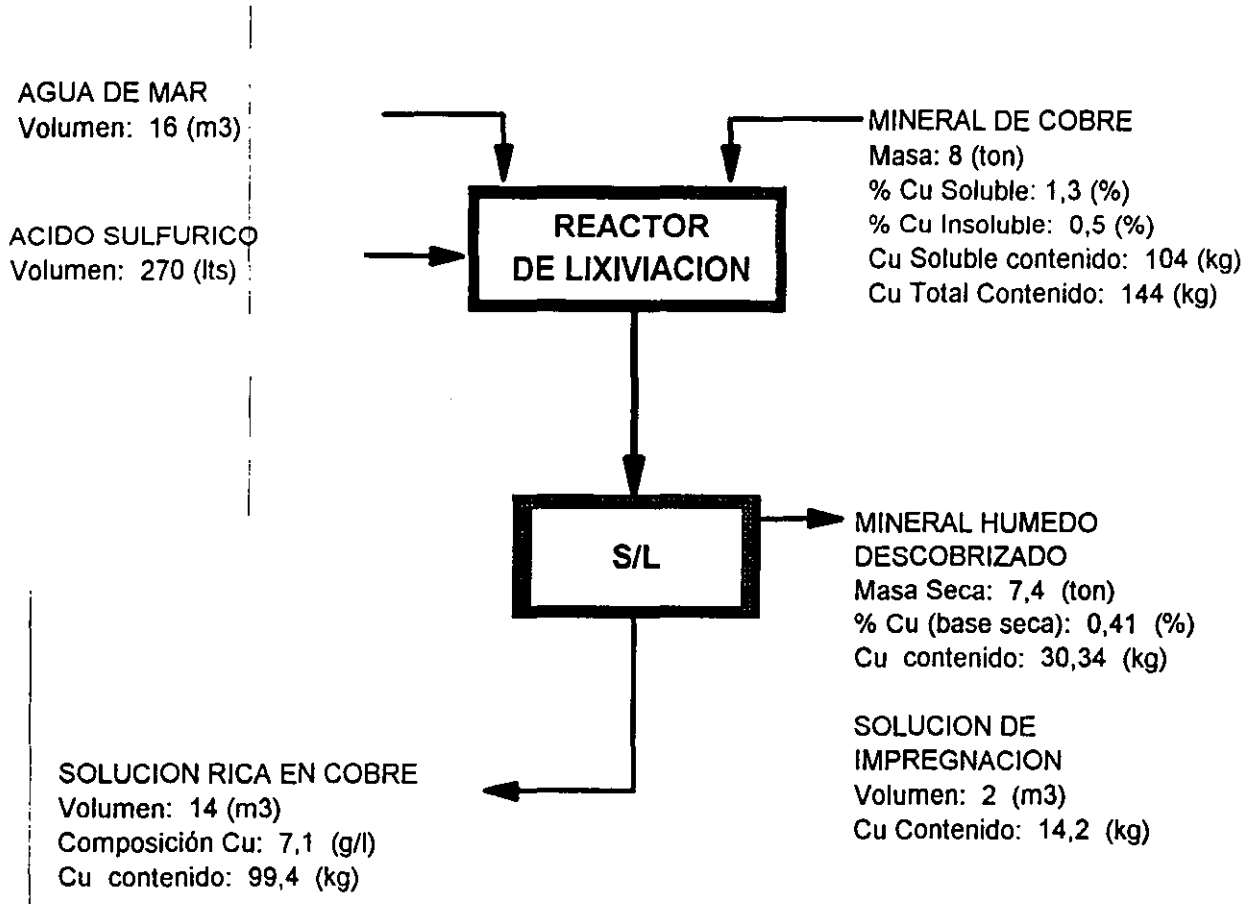
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 104,62 %

LIXIVIACION N°11

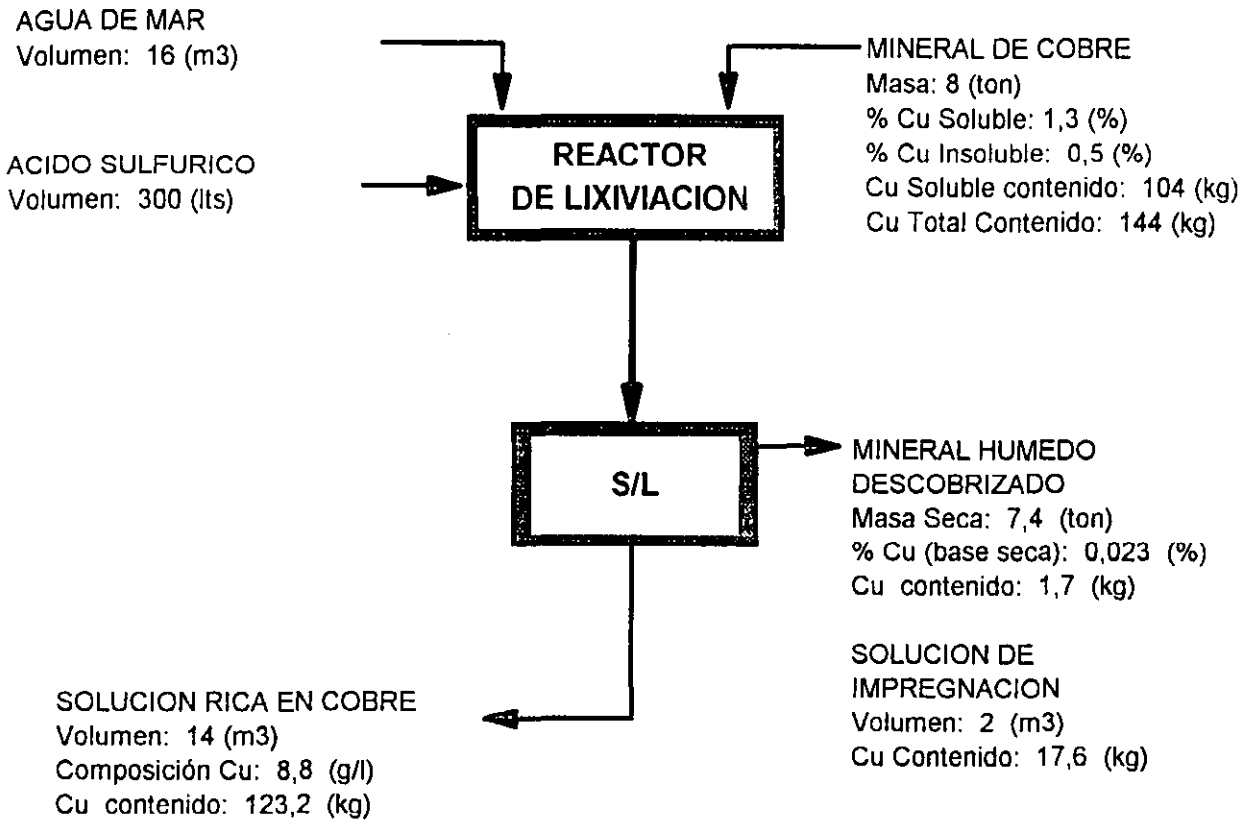
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 109,23 %

LIXIVIACION N°12

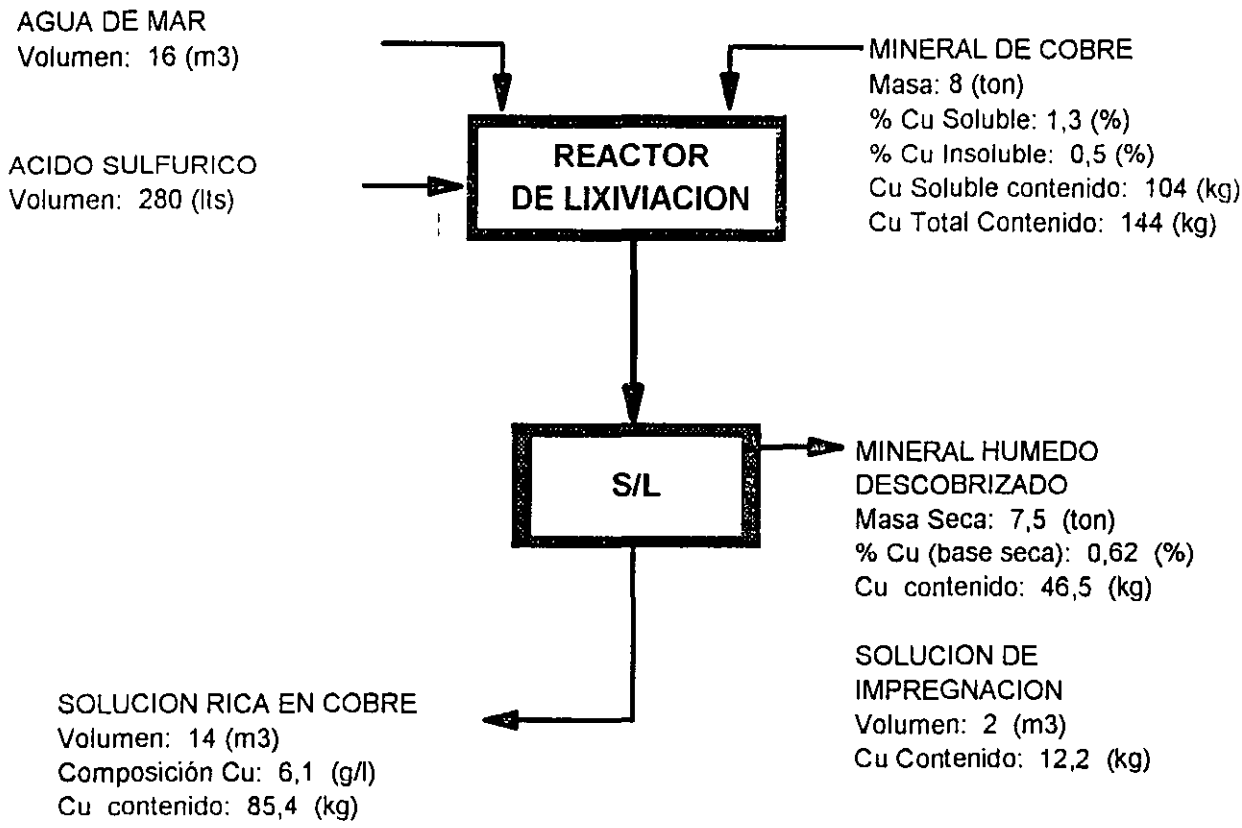
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 135,38 %

LIXIVIACION N°13

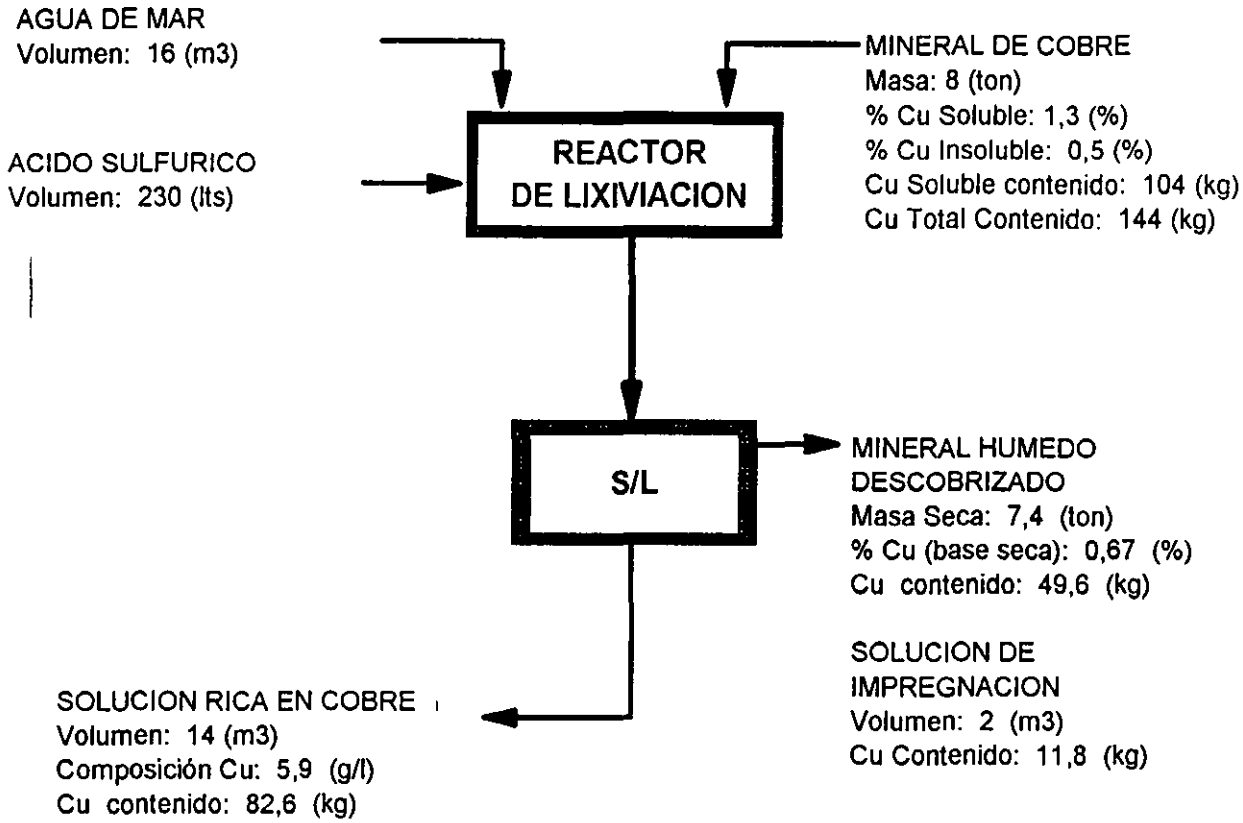
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 93,84 %

LIXIVIACION N°14

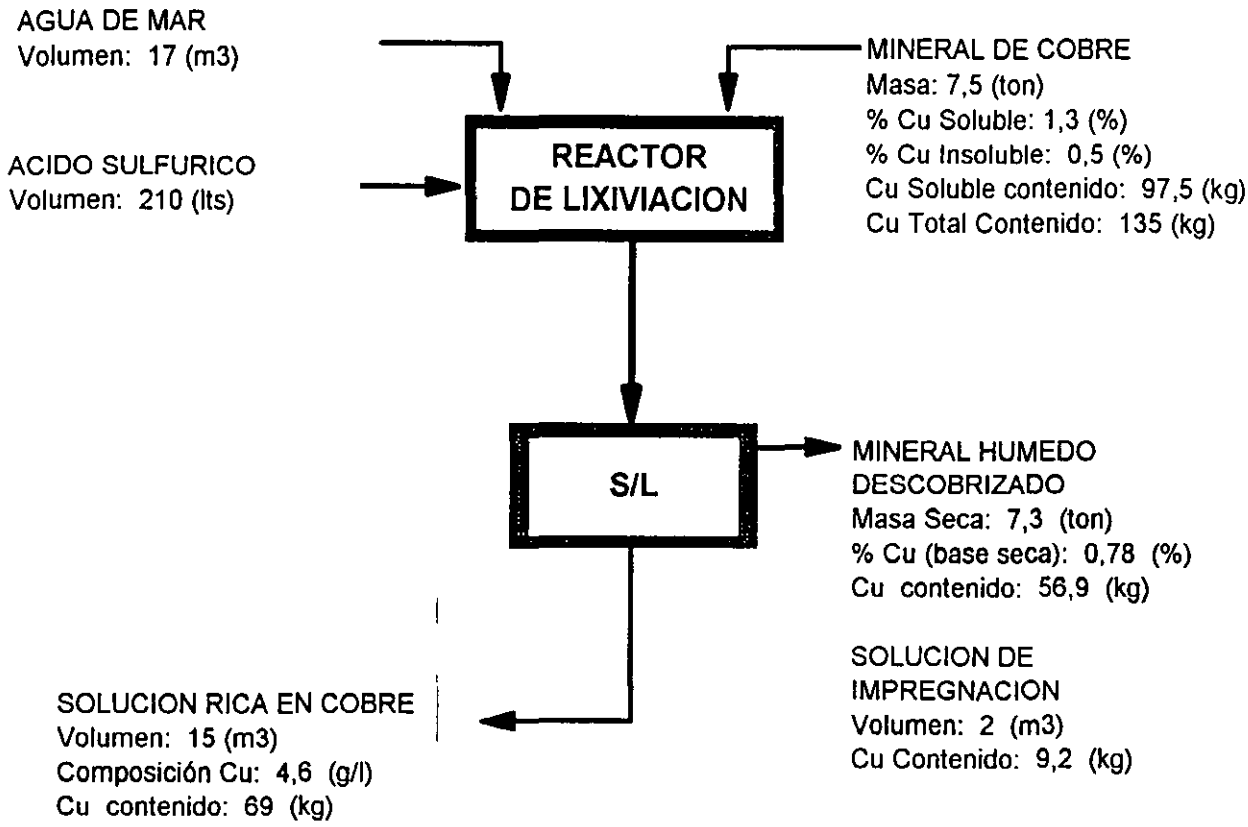
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 90,77 %

LIXIVIACION N°15

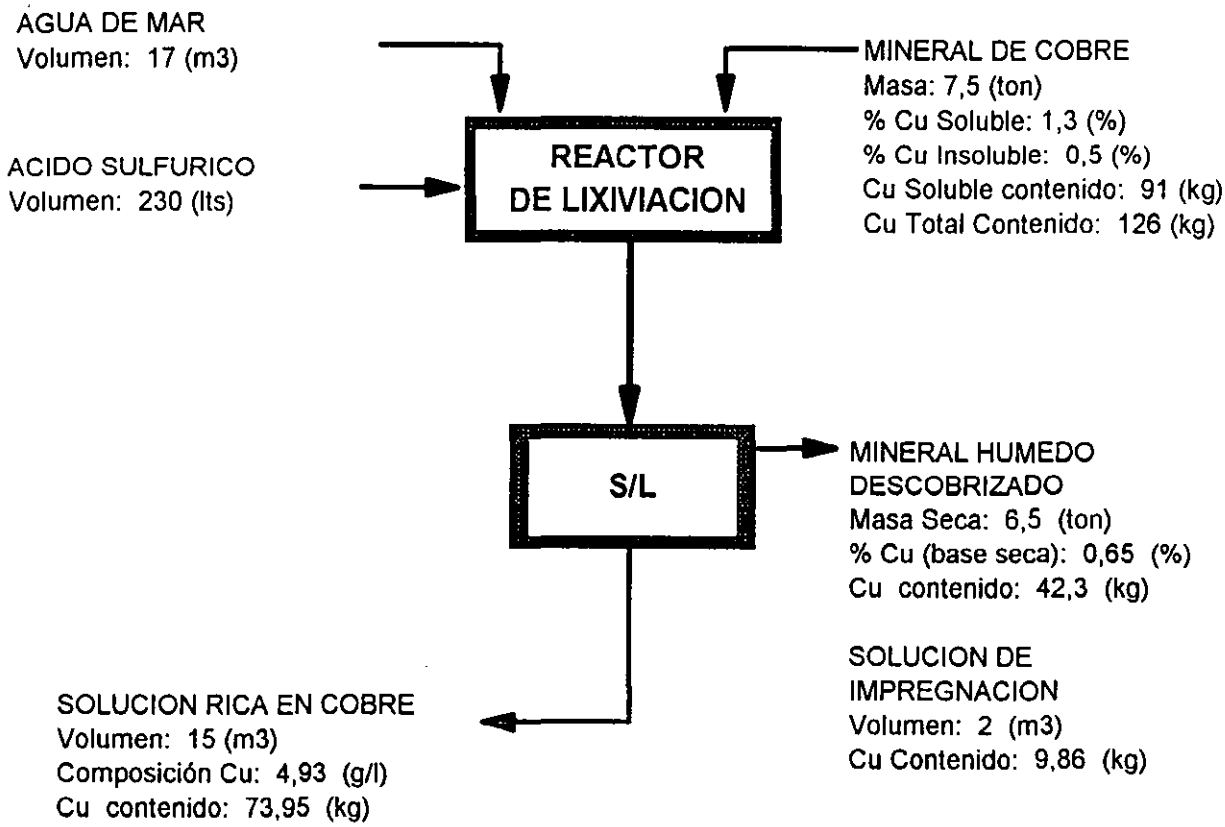
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 80,2 %

LIXIVIACION N°16

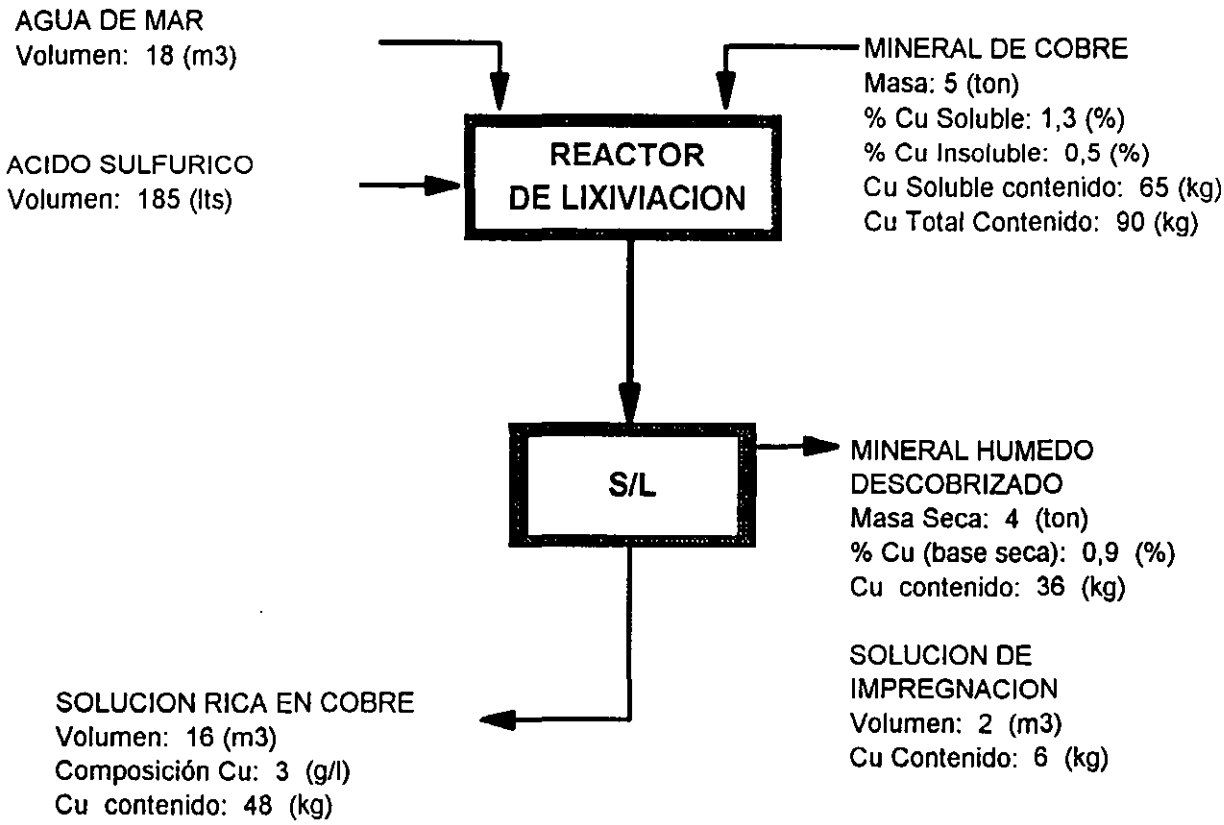
SEGUNDA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 92,1 %

LIXIVIACION N°17

SEGUNDA CAMPAÑA



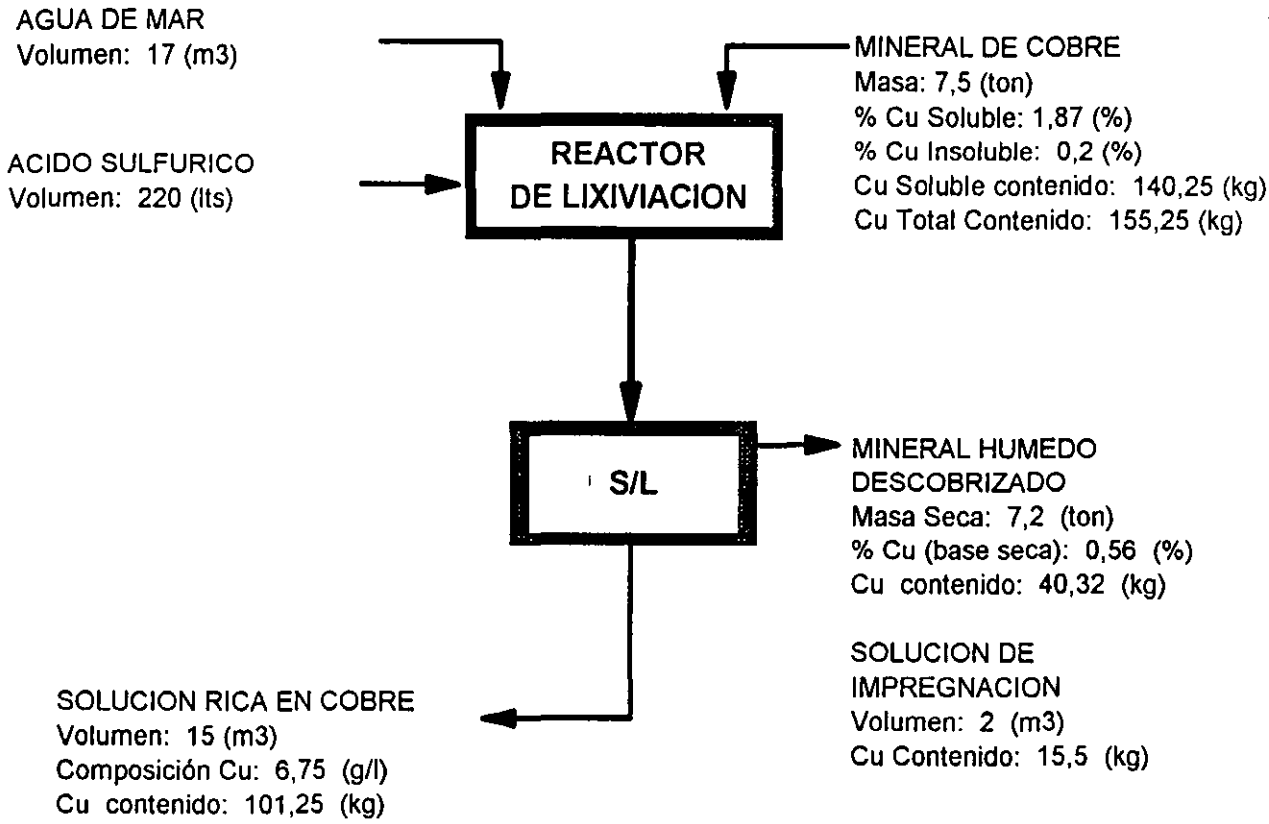
EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 83,08 %

TERCERA CAMPAÑA

Ley Mineral	:	**1,87 % Cu Soluble** **0,2 % Cu Insoluble**
Número de Lixiviaciones	:	**17**
Mineral Tratado	:	**125 toneladas**
Eficiencia de Lixiviación Promedio	:	**94,36 %**

LIXIVIACION N°1

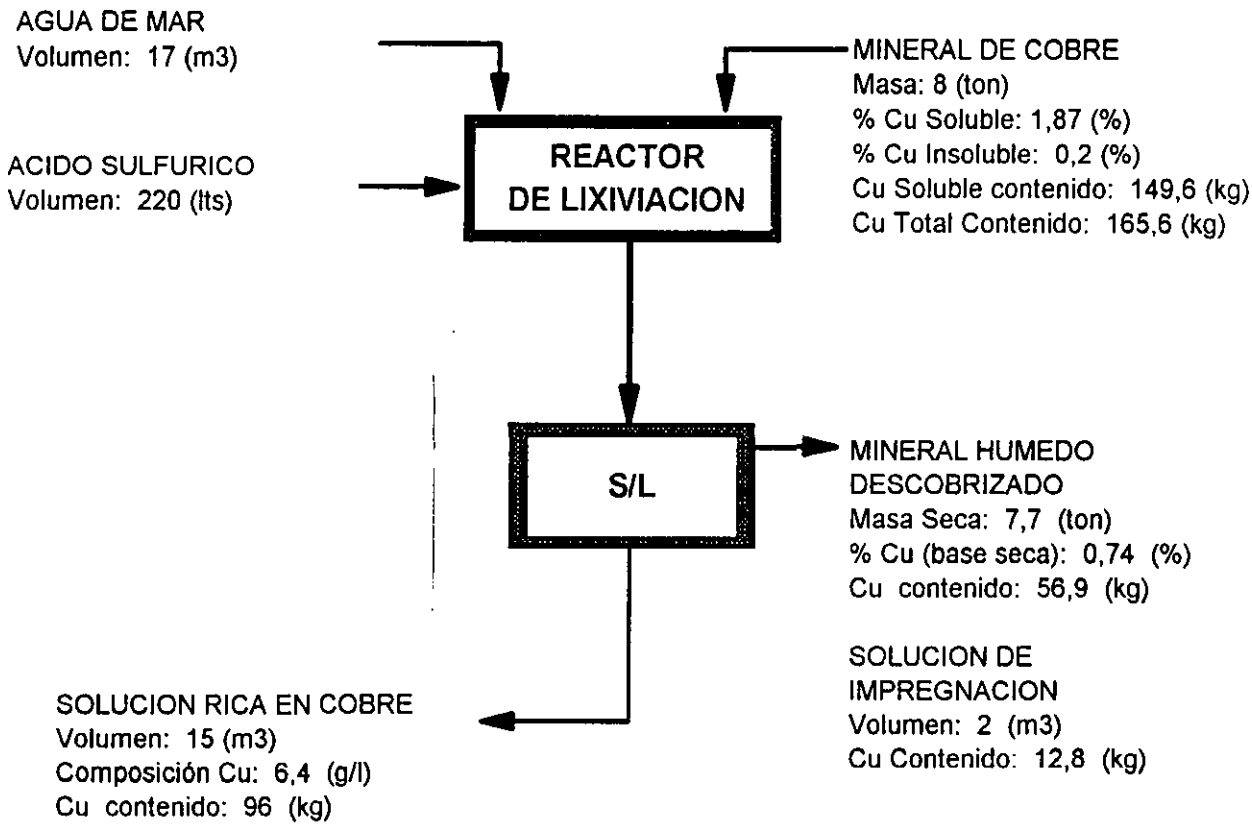
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 81,82 %

LIXIVIACION N°2

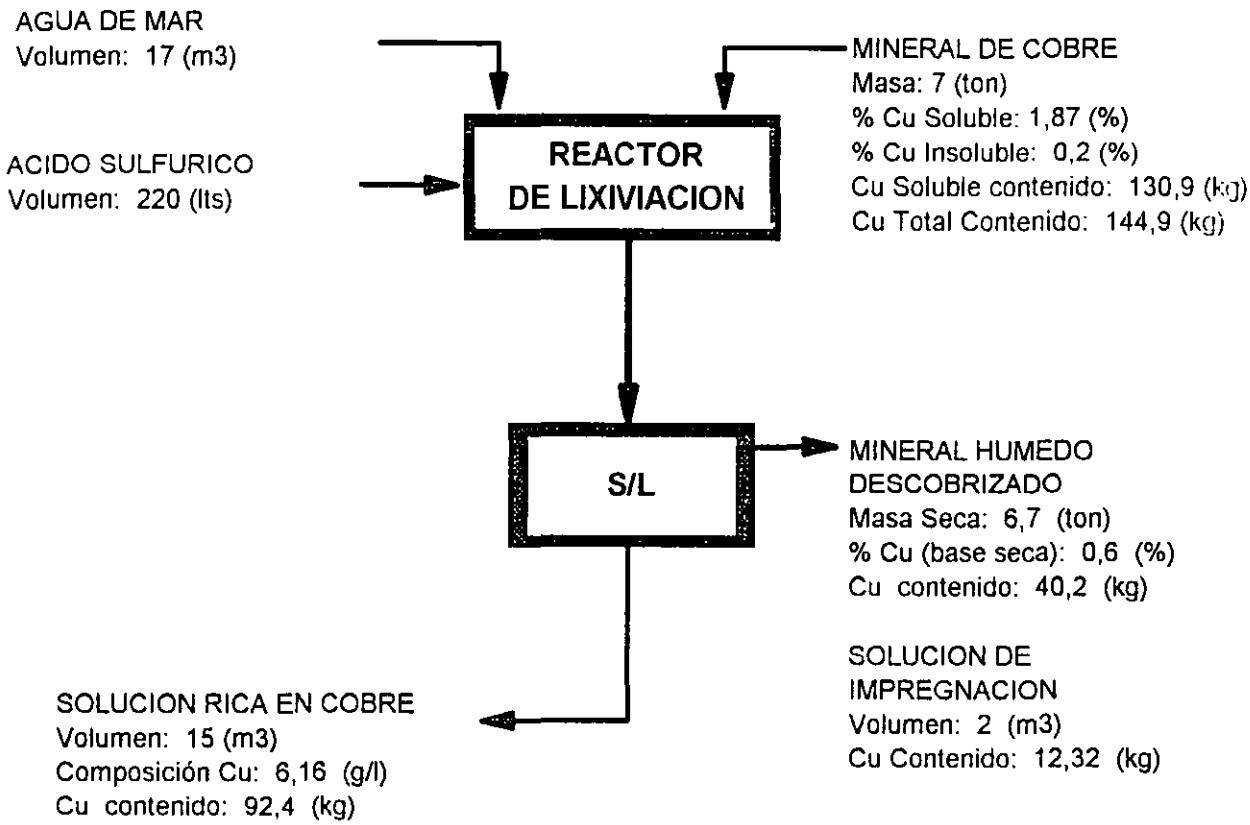
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 72,73 %

LIXIVIACION N°3

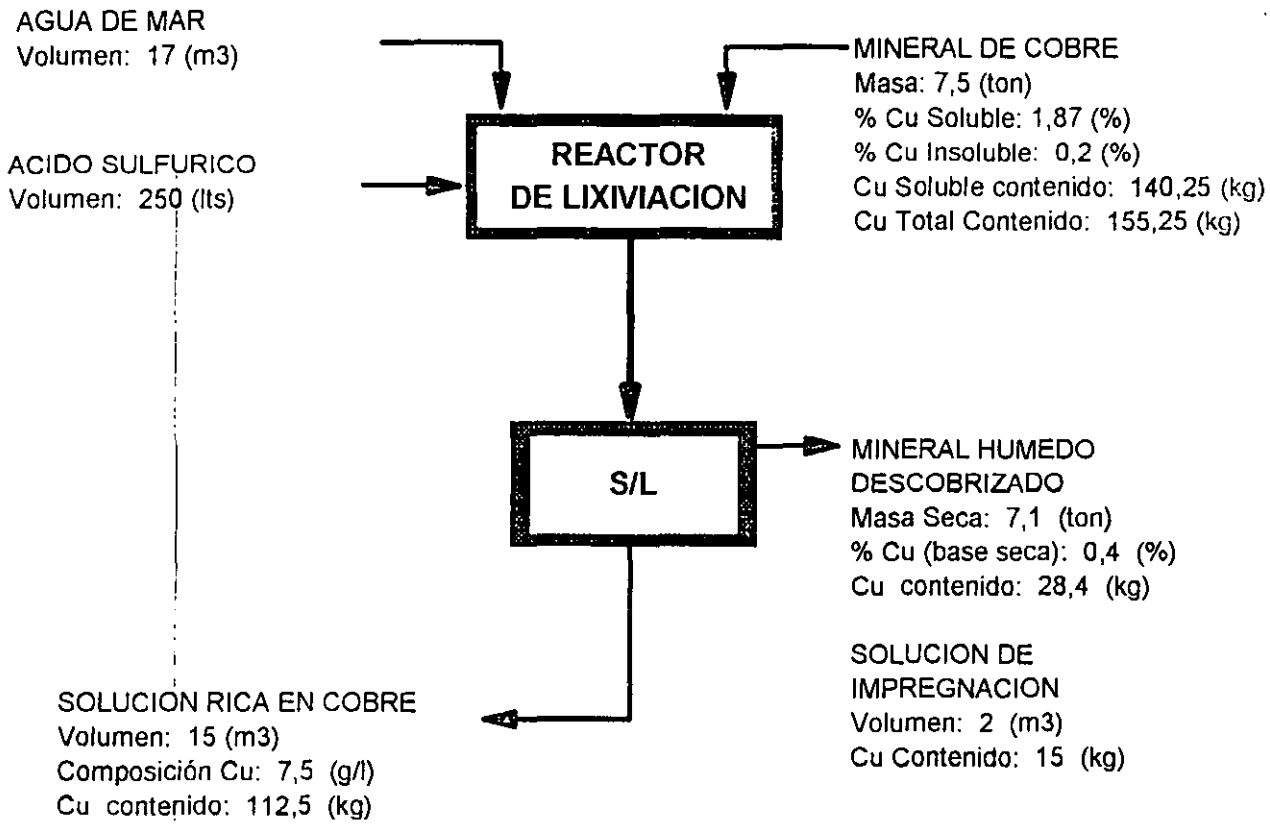
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 80 %

LIXIVIACION N°4

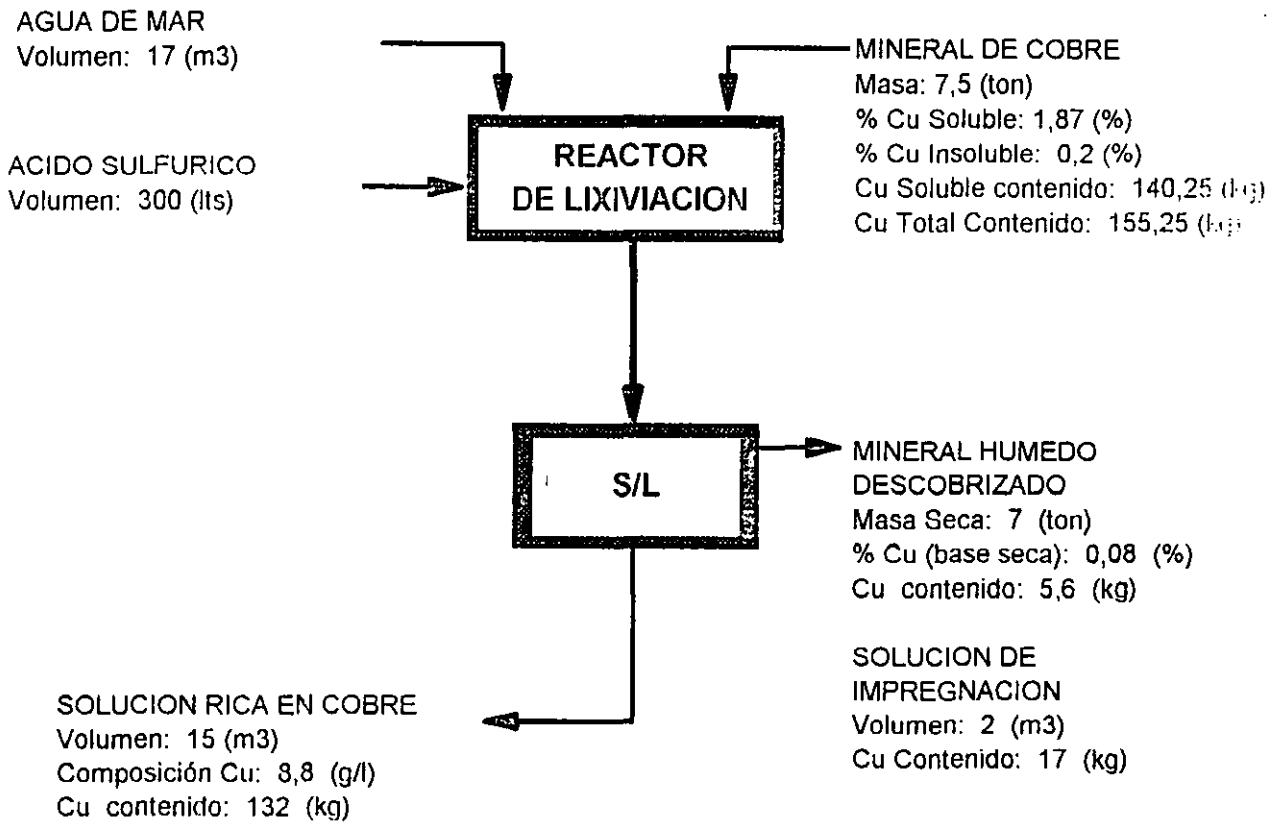
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 90,1 %

LIXIVIACION N°5

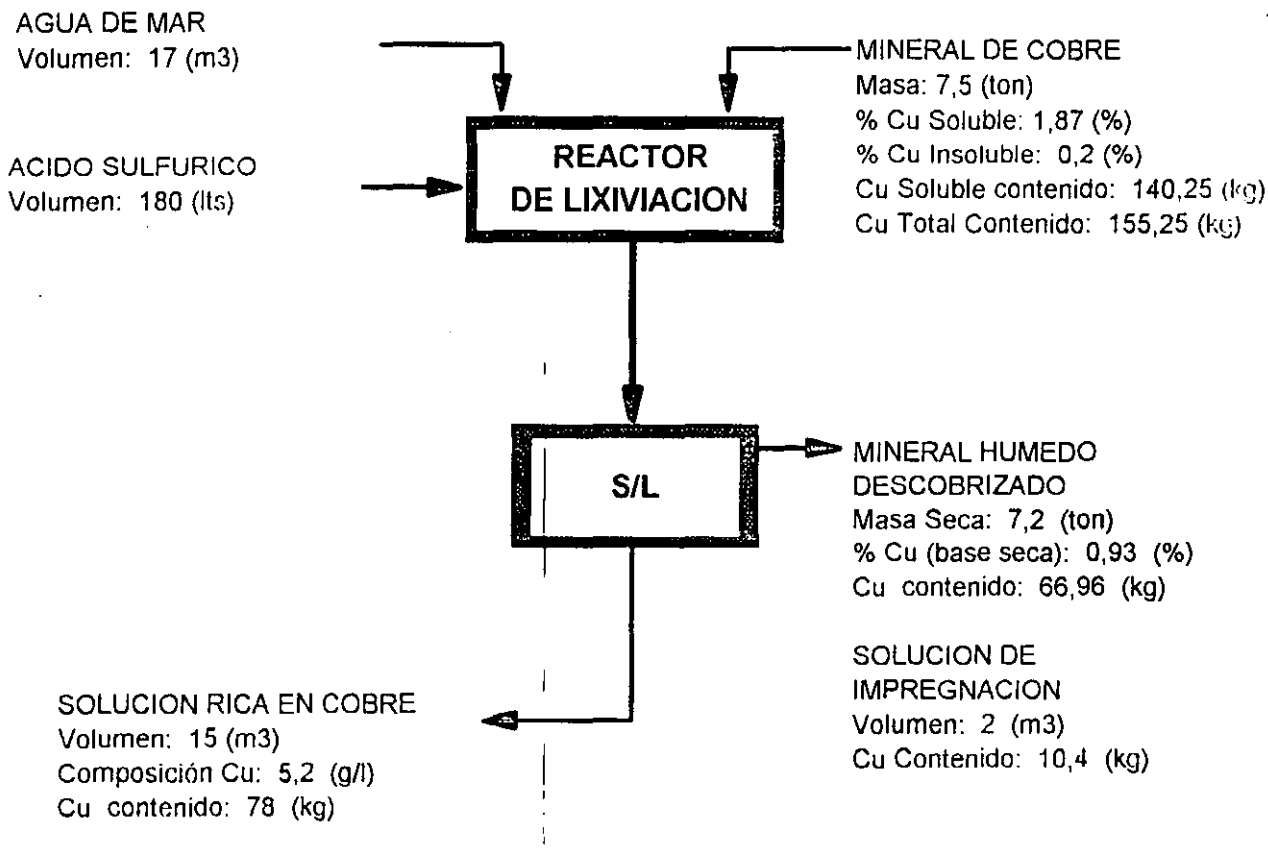
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 106,67 %

LIXIVIACION N°6

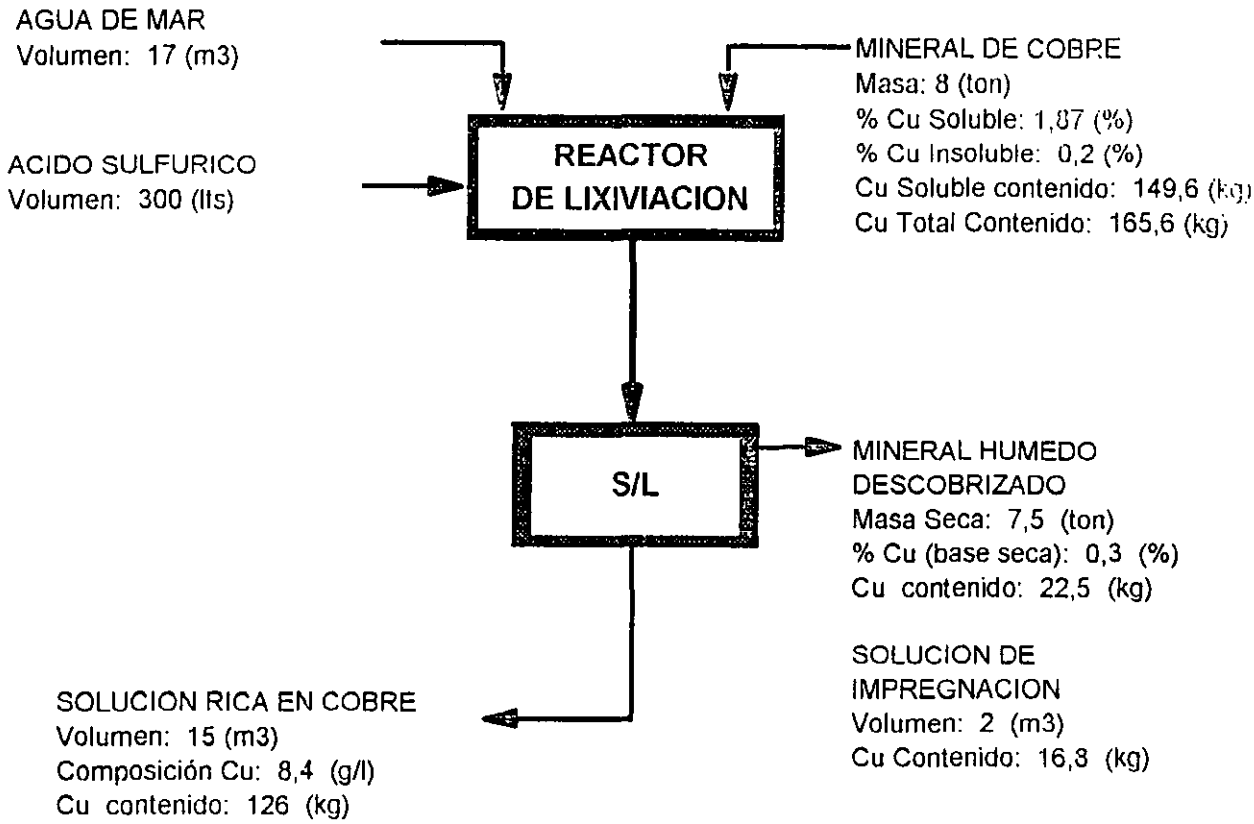
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 63,03 %

LIXIVIACION N°7

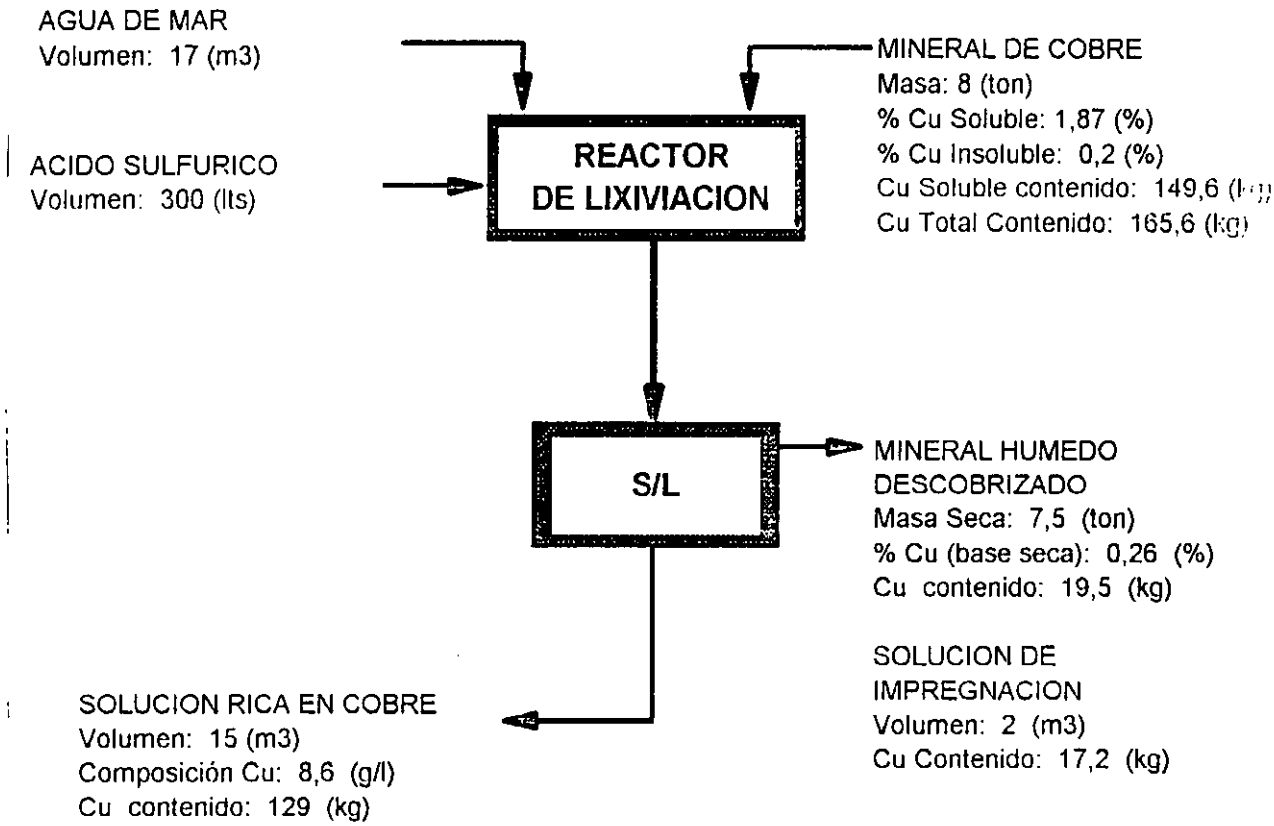
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 95,46 %

LIXIVIACION N°8

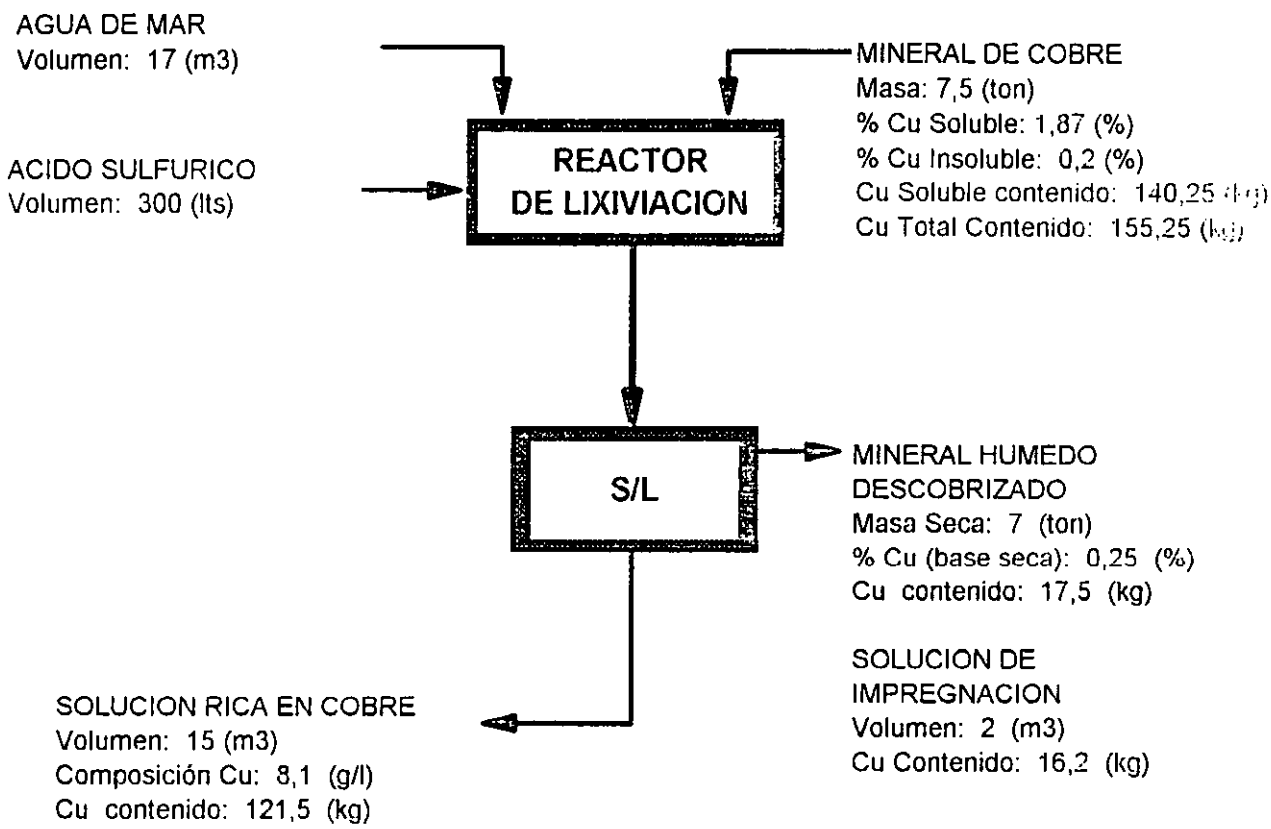
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 97,73 %

LIXIVIACION N°9

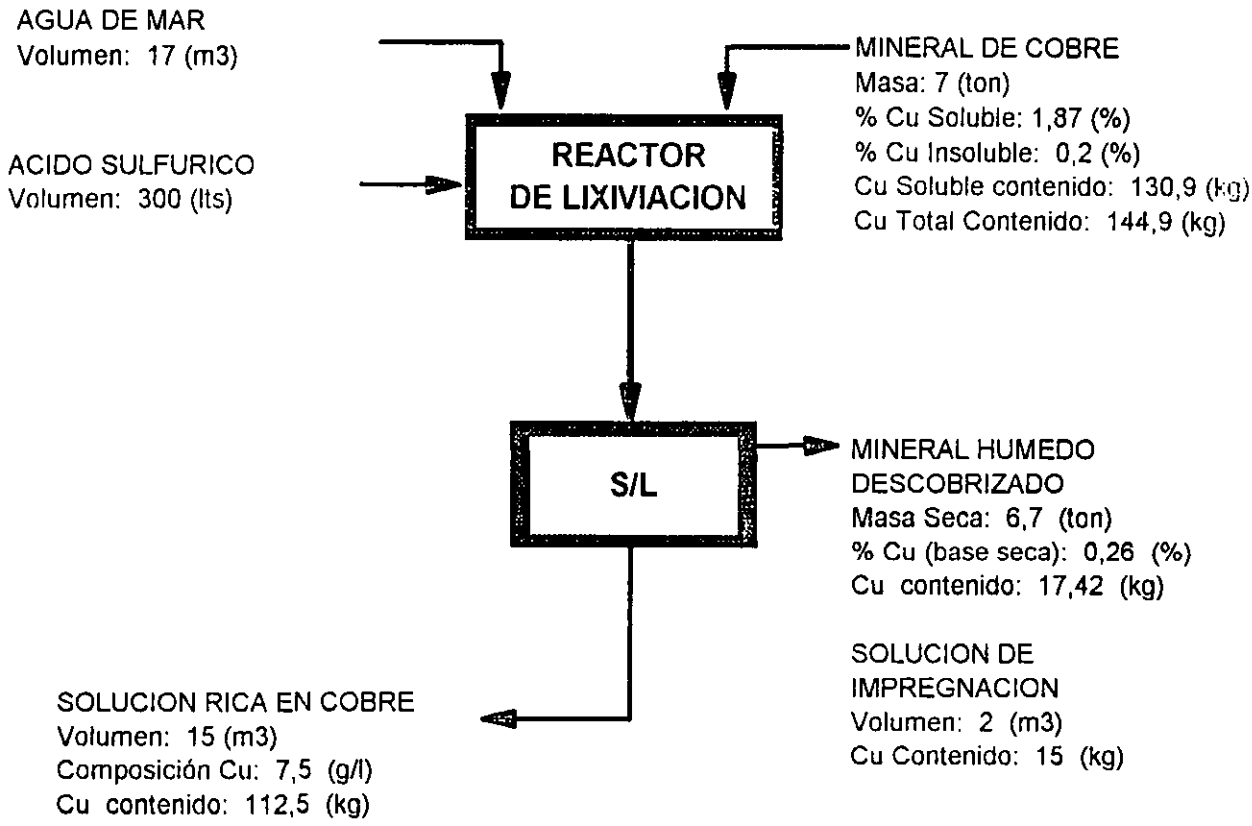
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 98,19 %

LIXIVIACION N°10

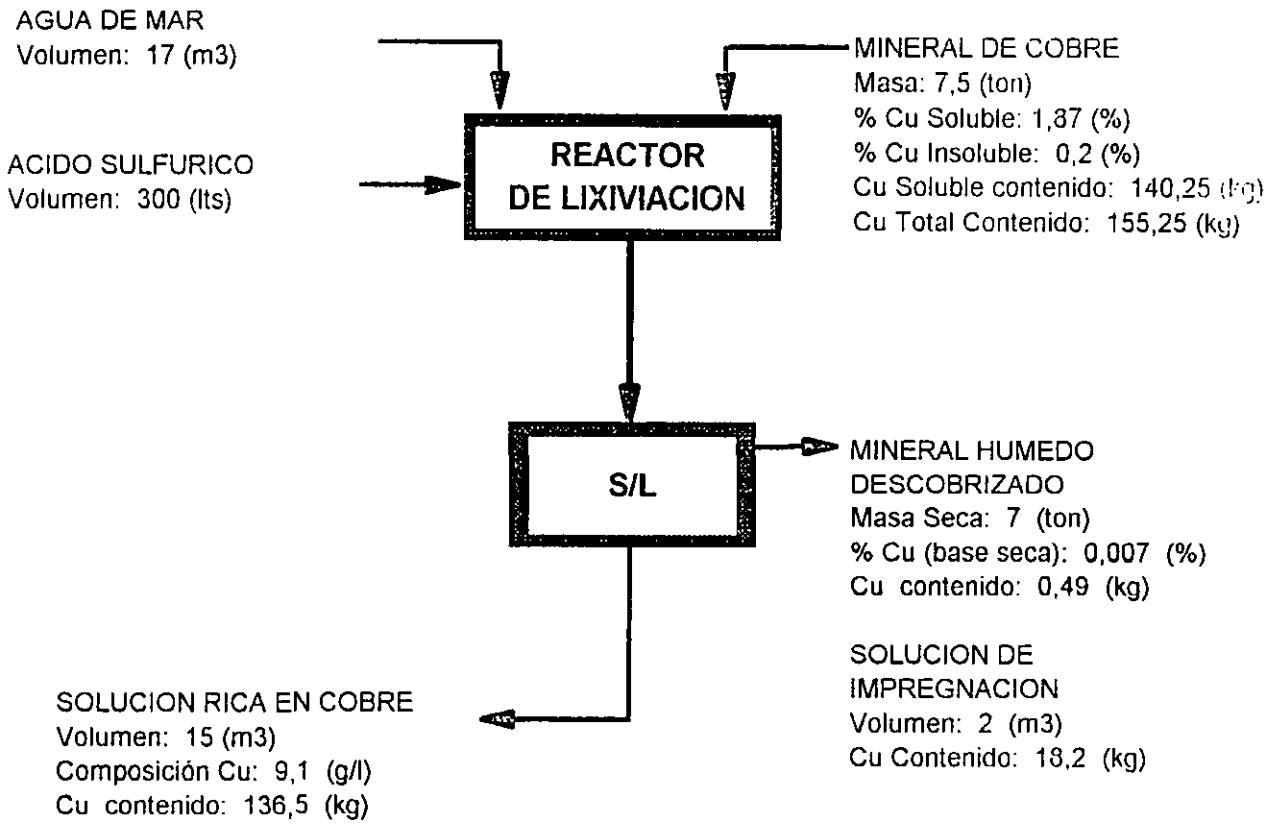
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 97,4 %

LIXIVIACION N°11

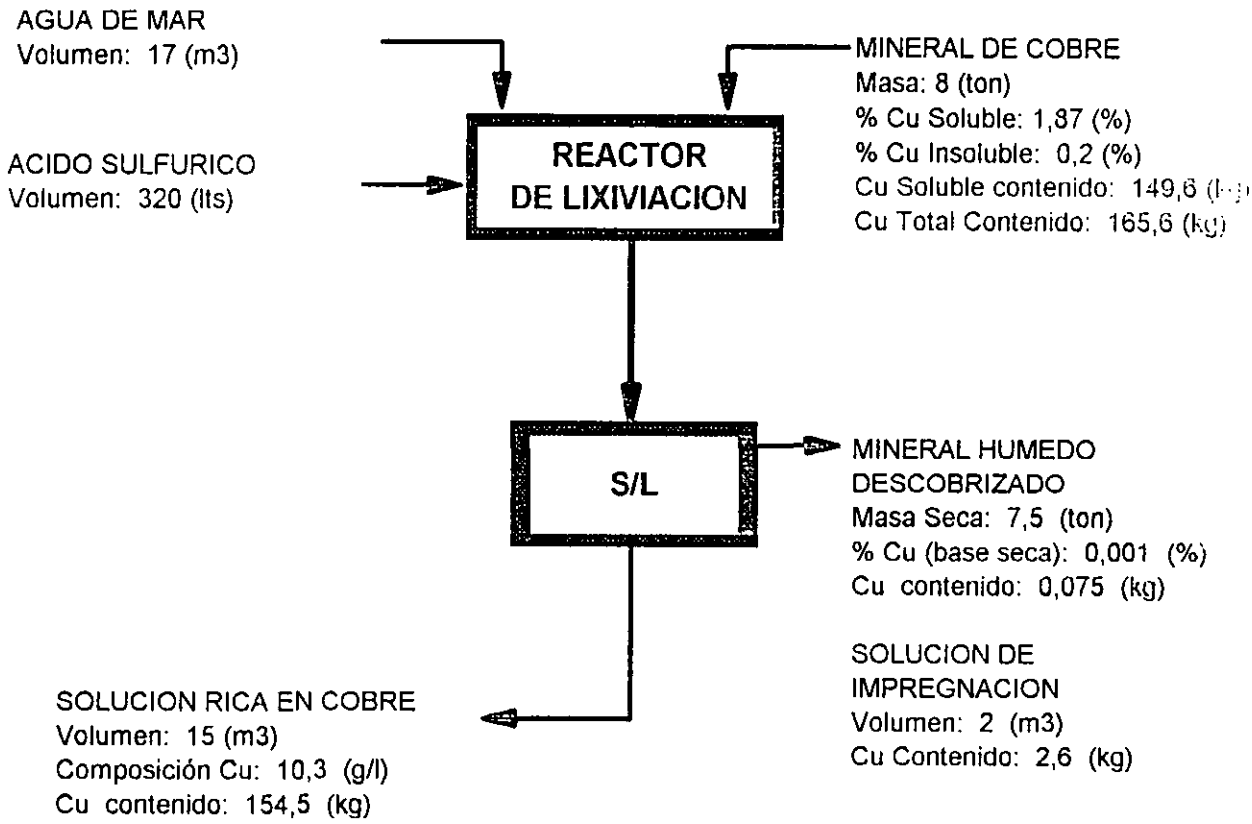
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 110,30 %

LIXIVIACION N°12

TERCERA CAMPAÑA

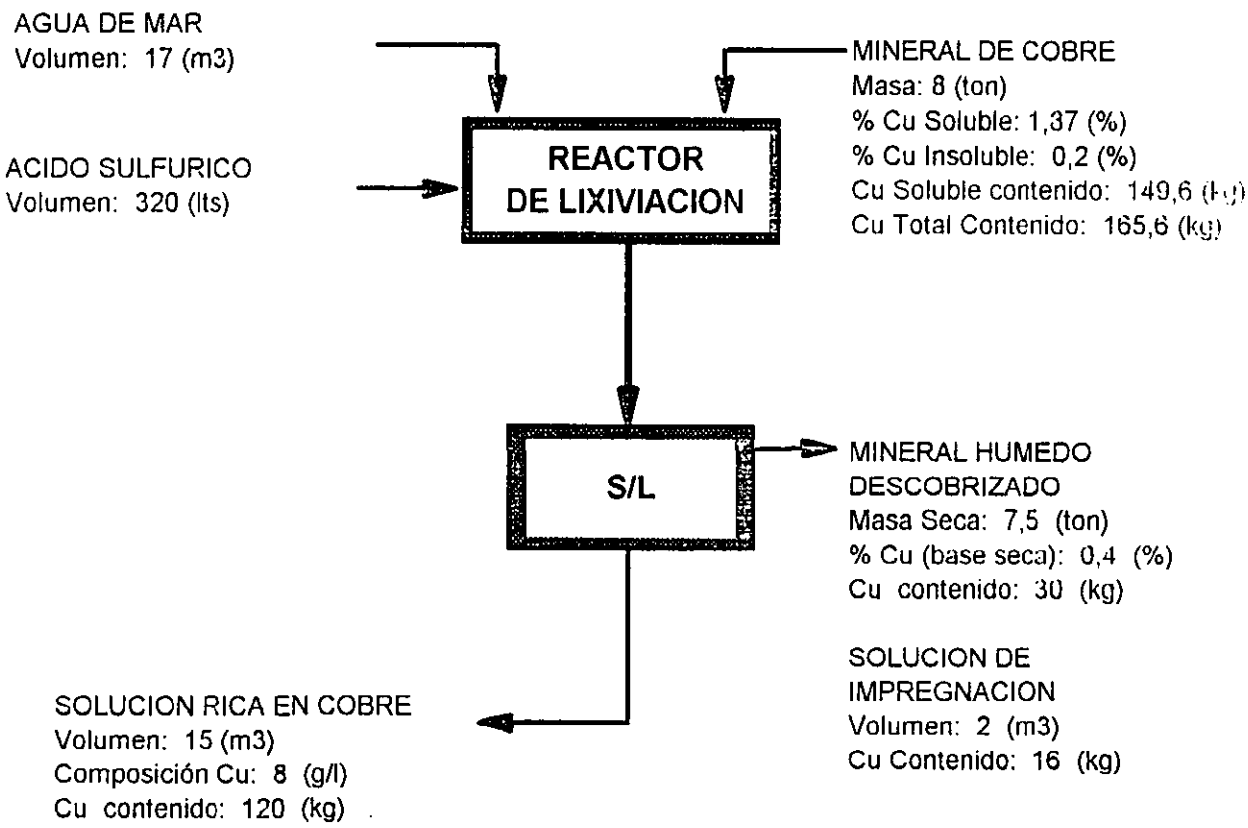


EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 117,05 %

Nota: En esta prueba se analizó el mineral descobrizado, el cual acusó contenidos de cobre al nivel de trazas, ratificando el presente balance de masas

LIXIVIACION N°13

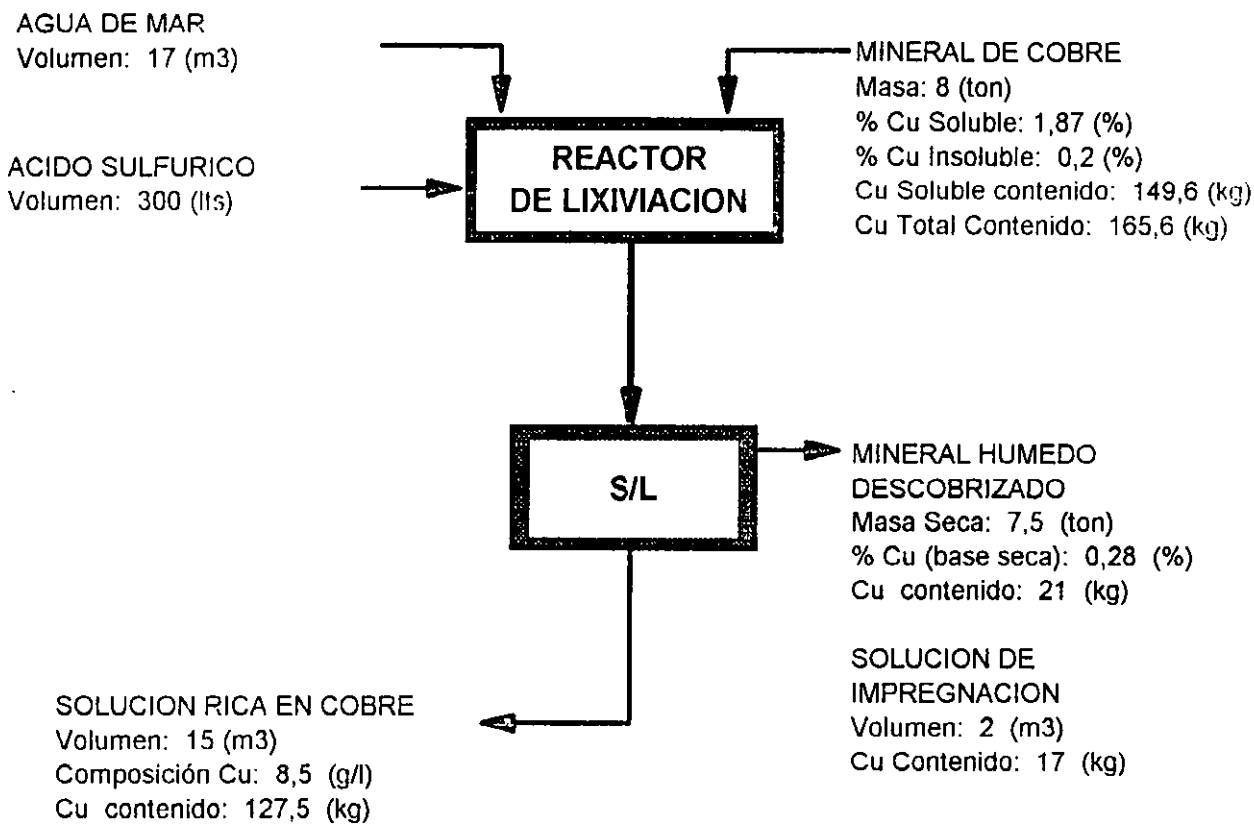
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 90,91 %

LIXIVIACION N°14

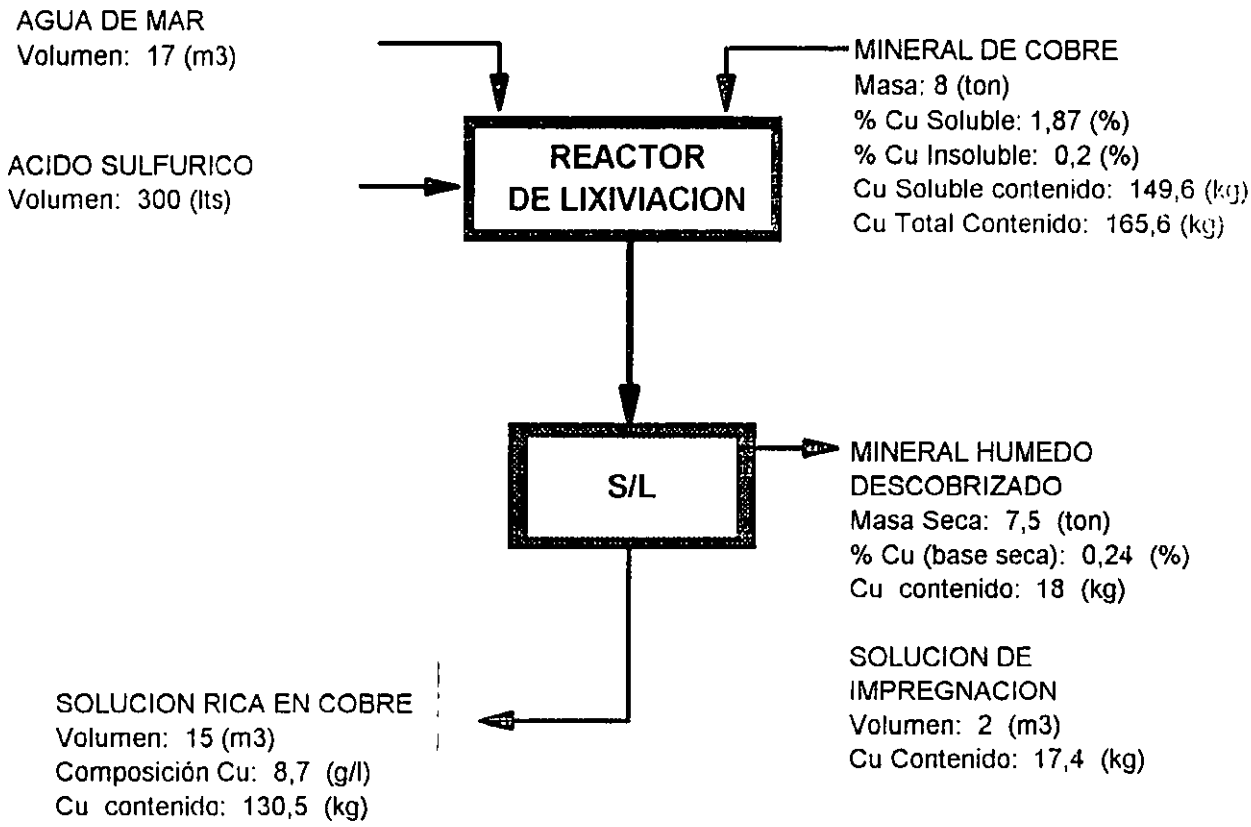
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 96,59 %

LIXIVIACION N°15

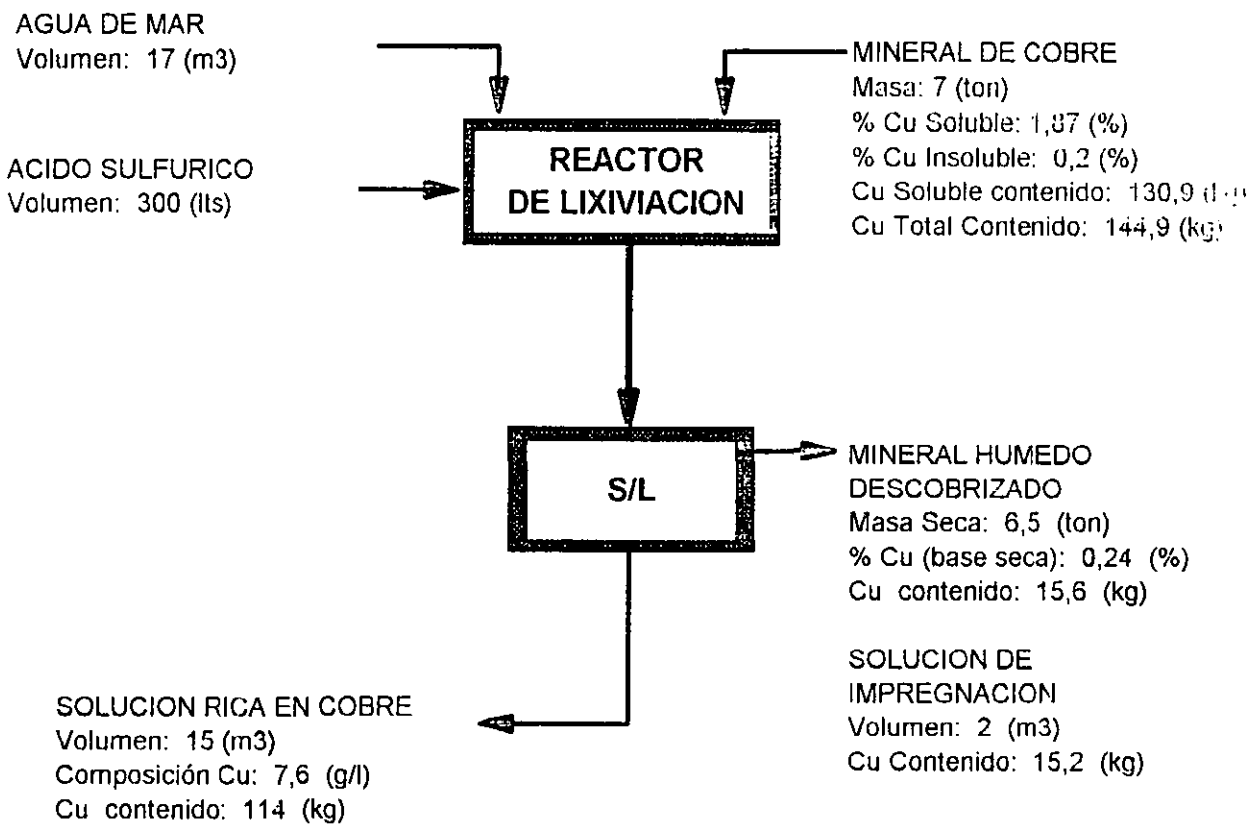
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 98,86 %

LIXIVIACION N°16

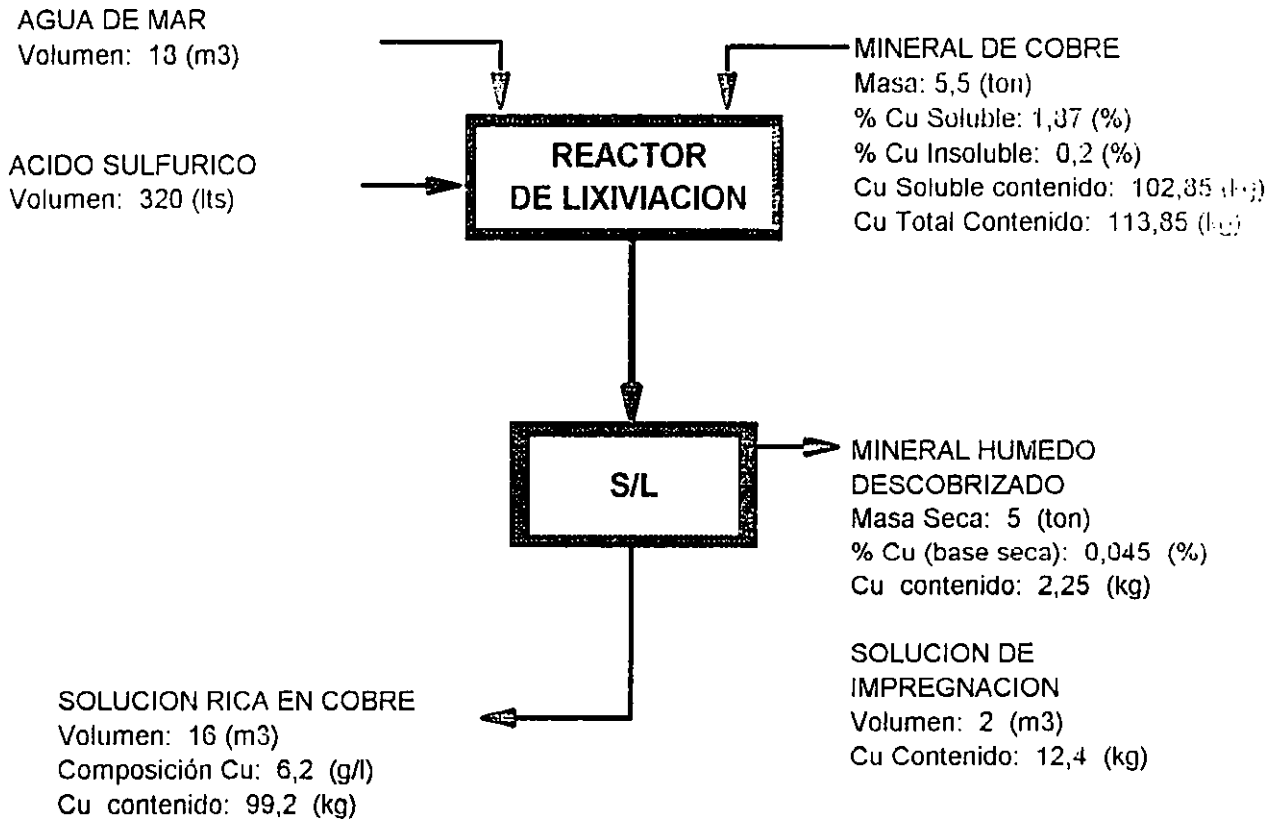
TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 98,7 %

LIXIVIACION N°17

TERCERA CAMPAÑA



EFICIENCIA DE LIXIVIACION DE COBRE: 108,51 %

3. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

Como resultado del Proyecto de Investigación Sulfurum, podemos destacar el diseño, dimensionamiento y construcción de una Planta Piloto con capacidad nominal de 35 toneladas por día. Sin embargo y pese a los esfuerzos desplegados por el grupo de investigadores responsables técnicamente de este Proyecto, dicha construcción no se ajustó estrictamente a un escalamiento óptimo, en general la falta de percepción para escalar aquellos parámetros operacionales, considerados fundamentales para el éxito de los resultados, derivó en un incumplimiento de las metas productivas planificadas y las cuales hacían de este proyecto un proceso sustentable.

Si bien el resultado particular de alguna de las pruebas realizadas demuestran que este proceso es técnicamente factible, sin embargo este mismo proceso requiere de un estudio de ingeniería básica de manera de establecer claramente la inversión requerida para lograr un proceso económicamente factible, es decir la experiencia obtenida en Copiapó deja en evidencia los problemas técnicos a ser resueltos, tales como una eficiente separación sólido / líquido, que permita minimizar tareas secundarias de manera de lograr mejores capacidades de carga de la Planta.

La Tabla N°4, muestra las principales desviaciones operacionales detectadas en las instalaciones piloto existentes en Copiapó. Estas desviaciones son comparadas con los parámetros de diseño originales y los cuales fueron establecidos en el Proyecto de Prefactibilidad realizado por la Universidad Católica de Valparaíso.

Tabla N°4 Desviaciones Operacionales Detectadas en Planta Piloto, (Copiapó), Comparadas con los Parámetros Obtenidos del Estudio Realizado por la Universidad Católica de Valparaíso.

PARAMETRO	PLANTA PILOTO (Copiapó)	ESTUDIO PREFACTIBILIDAD (Universidad Católica de Valparaíso)
Razón L/S	Aprox. 2/1	3/1
Concentración H_2SO_4 (g/l)	14 a 33	30
Granulometría del Mineral	Irregular	100 % bajo 1/4"
Agitación (rpm)	Aprox. 10	50 - 60

La disminución en la razón líquido/sólido claramente es atribuible a un inadecuado control en la adición del agua de mar. Sumado a lo anterior, debemos considerar los inadecuados criterios empleados en los cálculos de los volúmenes de ácido sulfúrico adicionado, en suma la solución lixiviante en gran medida no cumplió con los requerimientos de concentración y volumen en un gran número de pruebas con la evidente disminución de la eficiencia de solubilización del cobre soluble presente en el mineral.

Por otra parte, la granulometría del mineral empleado en la realización de las pruebas, (yampo), si bien presenta elevados porcentajes de finos, presenta además significativos porcentajes de sobretamaño, (5 - 8 % sobre malla 1/4"), lo que nos dice que este sobretamaño no brinda el grado de liberación adecuado de los minerales oxidados de cobre que en ella se encuentran, entorpeciendo la solubilización de estos.

Además se debe considerar el deficiente y desuniforme sistema de agitación del reactor de lixiviación, lo cual contribuyó en gran medida a no obtener el grado de atrición requerido en la disgregasión de este sobretamaño.

Finalmente y pese a todas las consideraciones anteriores, se debe destacar que el proceso de lixiviación de cobre soluble con empleo de agua de mar y ácido sulfúrico es técnicamente factible, en particular las 400 toneladas de mineral tratadas en este proyecto permitió establecer una eficiencia global de recuperación del orden de 93 %, lo que se considera exitoso aun cuando las instalaciones son definitivamente deficientes e inadecuadas. Del mismo modo se destaca la obtención de 3,8 toneladas de cemento de cobre de alta pureza, las cuales responden a 70 ensayos de precipitación llevados a cabo.

Particularmente, la lixiviación N° 12, Segunda Campaña, entre otras permite establecer:

Existen ventajas comparativas respecto de los actuales sistemas de lixiviación, puesto que en 30 minutos se logró una eficiencia de 135 %, lo que además ratifica las proyecciones de este proceso respecto a poder lixiviar incluso cobre en matriz de sulfuro. Lo anterior tiene su base en el hecho que en la actualidad no se ha logrado lixiviar económicamente sulfuros de cobre y por el contrario los sistemas industriales no superan el 90 % de eficiencia de lixiviación de oxidos de cobre en procesos que tienen una duración de hasta 20 días y más, (lixiviación en pilas).

BIBLIOTECA CORFO