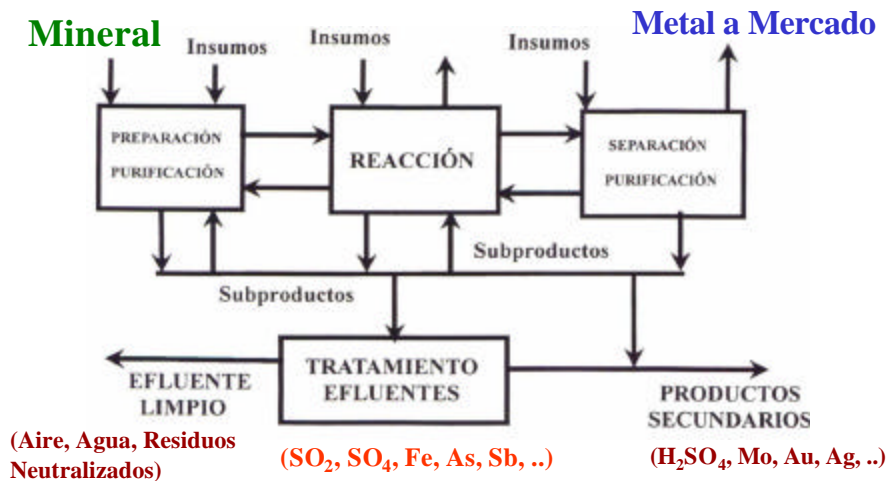


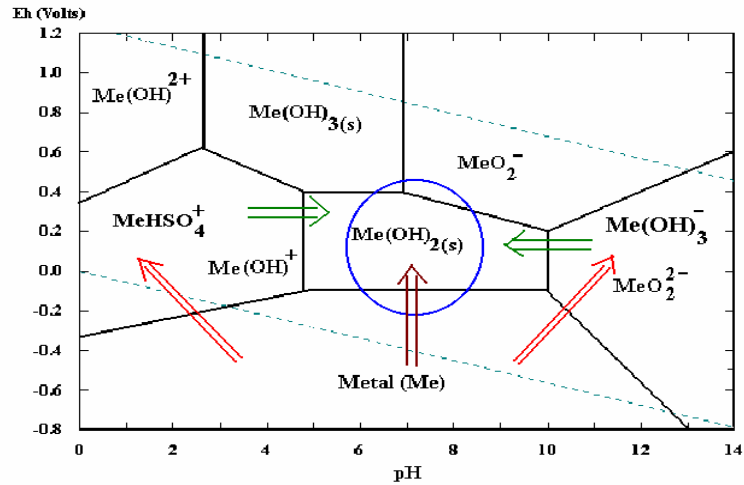
PROCESOS DE SEPARACION EN HIDROMETALURGIA



TRATAMIENTO DE SOLUCIONES DE LIXIVIACIÓN

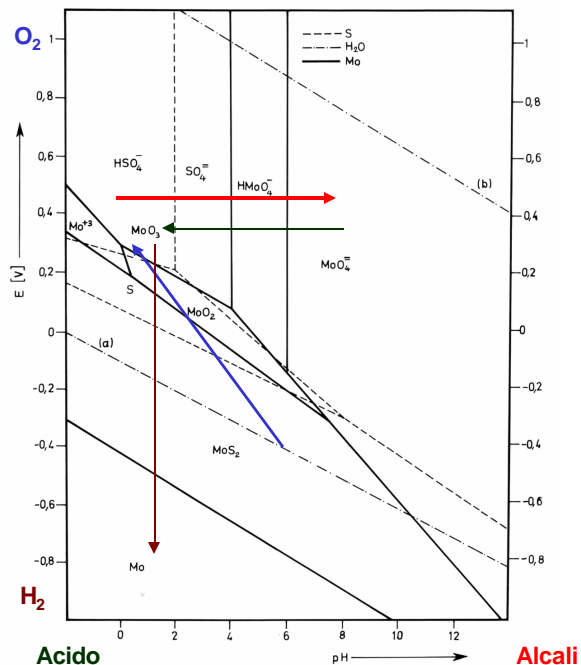
Especies	Concentración Residual, ppm	Concentración Comercial, ppm	Norma Agua de Riego, ppm
H ₂ SO ₄	1.000-200.000	1.000-200.000	pH = 8-9 SO ₄ < 750
Cu	10-200	1.000-60.000	0,5
Fe	1.000-10.000	-	5
Al	1.000-10.000	-	5
Mg	1.000-10.000	-	< 5 ppm
As	10-3.000	-	< 0,05 ppm

Sistema: Agua - Metal - Reactivo (ácido, base)



Precipitados: Carbonatos (MeCO_3); Cloruros (MeCl); Fosfatos (MePO_4); Hidróxidos (MeOH); Metales; (Me^0); Organo-metálicos (MeR_{org}); Sulfuros (MeS).

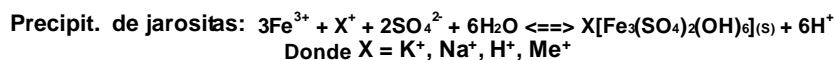
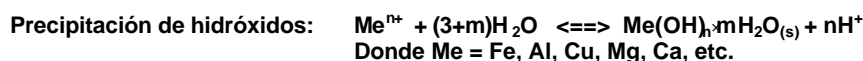
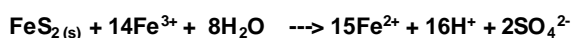
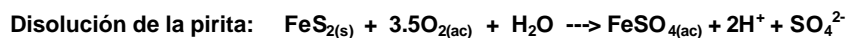
**Diagrama
Potencial Redox
vs. pH
Molibdeno**



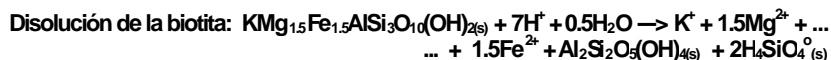
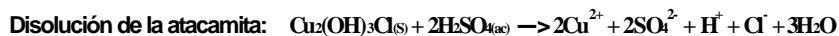
GENERACIÓN DE ACIDO

La acidez de una solución corresponde a la concentración de solutos disueltos que son capaces de reaccionar con un agente neutralizante alcalino $[\text{Ca}(\text{OH})_2, \text{NaOH}, \text{CaCO}_3]$

$$\text{Acidez Total} = [\text{H}^+] + [\text{MeHL}] - [\text{MeOH}] + 3[\text{Fe}^{3+}] + 3[\text{Al}^{3+}] + 2[\text{Mg}^{2+}] + ..$$



CONSUMO DE ACIDO

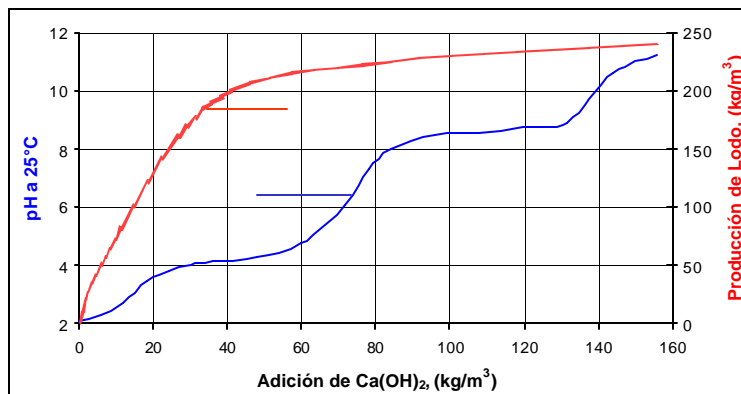


Consumo de cal requerido para neutralizar una solución de refino industrial

Variable	Concentración (g/L) / valor
Al	3.90
Mg	6.01
Fe(total)	1.50
Fe(II)	0.11
Zn	2.60
Cu	0.60
Ca	0.50
Cloruro total	0.90
Sulfato total	63.50
Acidez libre como H ₂ SO ₄	10.10
Acidez total como H ₂ SO ₄	37.52
pH a 25°C	1.26
Eh a 25°C, (mV)	716
Conductividad a 25°C, (mS/cm)	50.10

- Disolución $\text{CaO(s)} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$
- Disociación $\text{HSO}_4^- \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$
- Neutralización $\text{OH}^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$
- Hidrólisis $\text{Me}^{n+} + (n+m)\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Me(OH)}_n\text{mH}_2\text{O(s)} + n\text{H}^+$
- Oxidación $\text{Fe}^{2+} + 0.25\text{O}_{2(\text{ac})} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 0.5\text{H}_2\text{O}$
- Precipitación $\text{Fe}^{3+} + (2+n)\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O(s)} + 3\text{H}^+$
- Precipitación $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O(s)}$

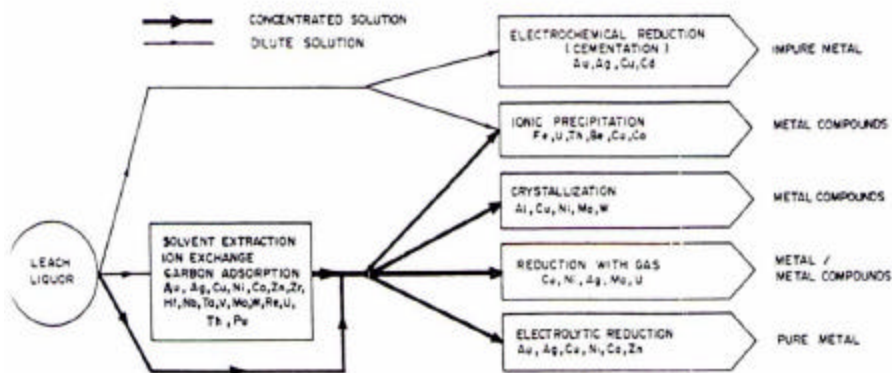
Neutralización de una Solución de Refino Industrial con Cal



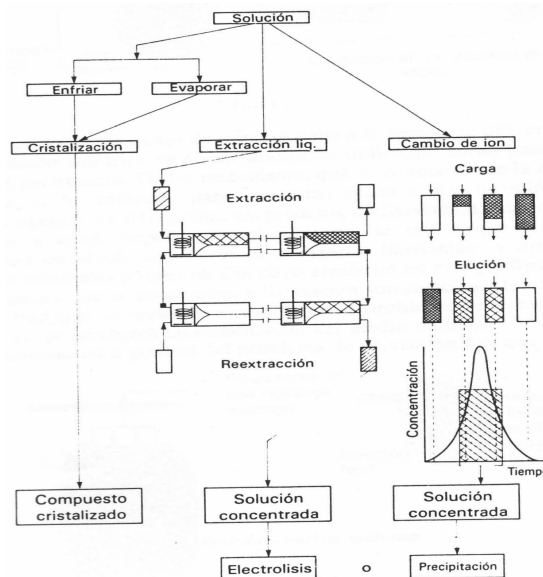
Tecnologías de Separación

- Adsorción (biosorción, sorción, carbón activado)
- Precipitación (iónica, hidrolítica, térmica, biológica, etc)
- Cementación, Cristalización, Intercambio Iónico.
- Coagulación, Floculación, Decantación
- Extracción Líquido-Líquido, Extracción por Solventes
- Electrólisis, Evaporación (forzada, solar),
- Flotación (colectores, por aire disuelto)
- Membranas (osmosis inversa (OI), electrodiálisis (ED), membranas líquidas, ultrafiltración (UF))
- Reacción ó separaciones químicamente inducidas (hidrólisis, reducción, oxidación, precipitación con gases).
- Biológicos (biosorción, bioacumulación, biomineralización, biooxidación, bioreducción, etc.).

Tecnología Para el Tratamiento de Soluciones Lixiviantes (Gupta 1990)



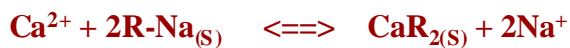
PROCESOS de SEPARACIÓN y CONCENTRACIÓN de SOLUCIONES EFLUENTES de PROCESOS de LIXIVIACIÓN



INTERCAMBIO IONICO (IX)

Tecnología usada para ablandar y desmineralizar el agua (remoción de calcio, magnesio, carbonatos, cloruros, etc.), y recuperar iones (purificación del uranio).

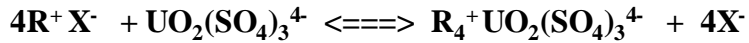
- Ablandamiento de Agua (Resina Catiónica)
- Desmineralización de Agua (Resinas: Catiónica + Aniónica)
- Ablandamiento (CaCO_3 , CaCl_2):



- Desmineralización (MeX):



Purificación del Uranio



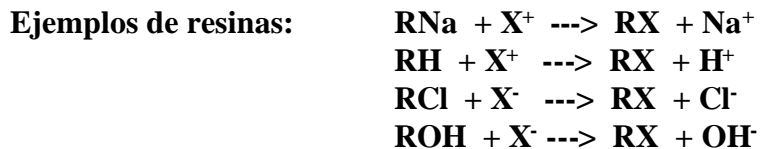
donde $X^- = NO_3^-, Cl^-, HSO_4^-$

Resinas IX: - Matrices de polímeros (poliestireno o poliacrilato),
- Zeolitas sintéticas (tamices moleculares).

Capacidad de Intercambio: 2-3 moles de metal / kg de resina

Grupos Funcionales de las Resinas:

- RSO_3^- (resina catiónica fuertemente ácida)
- RCO_2^- (resina catiónica débilmente ácida)
- NR_3^+ (resina aniónica fuertemente básica)
- NR_2H^+ ; $-NRH_2^+$ (resina aniónica débilmente básica)
- RNH_3^+



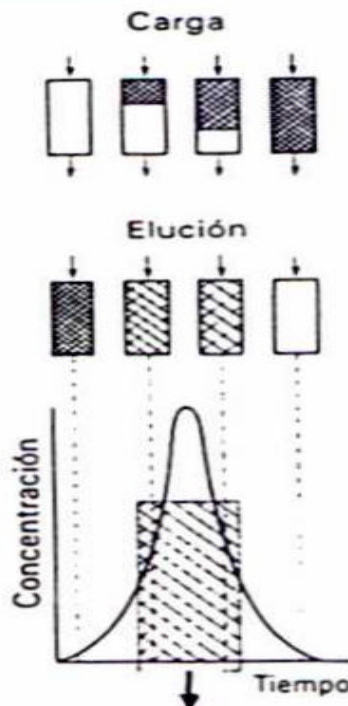
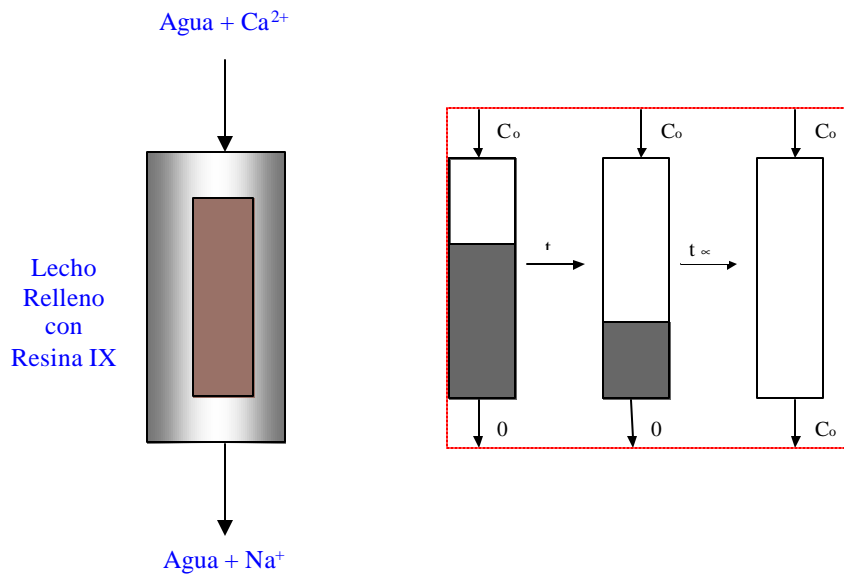
Las aguas tratadas quedan con $C < 0,01$ ppm.

Ventajas del IX: Reduce el volumen entre 20-30 veces

Alta recuperación (90%)
Gran selectividad

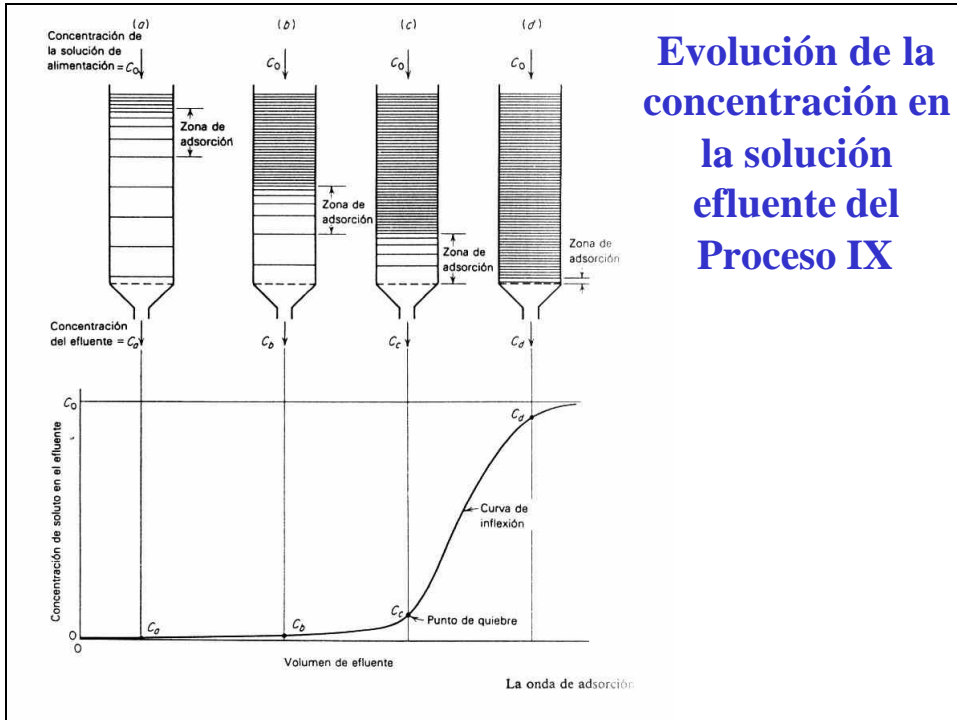
Etapas: Ciclo de carga, lavado para arrastrar la solución cargada, lavado ascendente, elución, 2º lavado ascendente, espera para volver al ciclo de operación.

Ablandamiento de Agua en Columna IX

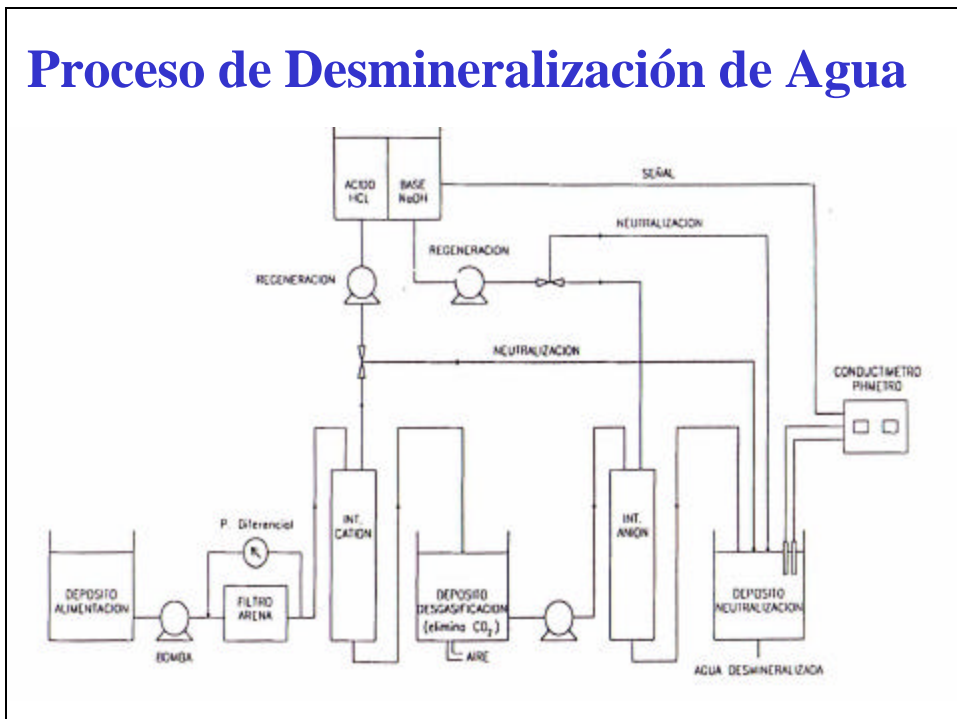


Ciclo de Carga-Descarga

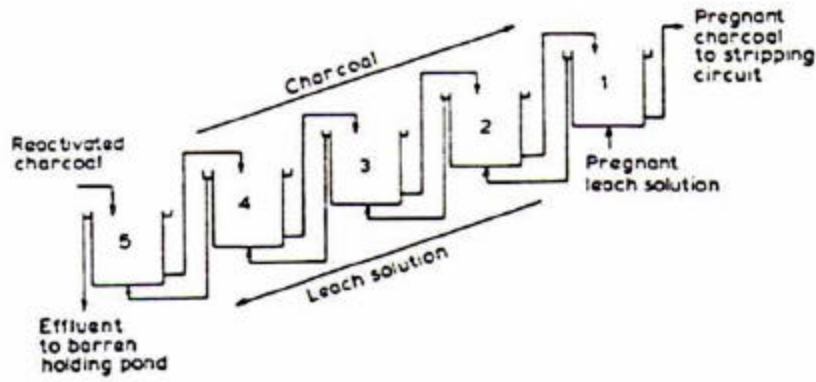
Evolución de la concentración en la solución efluente del Proceso IX



Proceso de Desmineralización de Agua



Adsorción con Carbón Activado



Circuito de 5 Etapas en Contracorriente para Recuperar Oro desde Soluciones Efluentes del Proceso de Cianuración

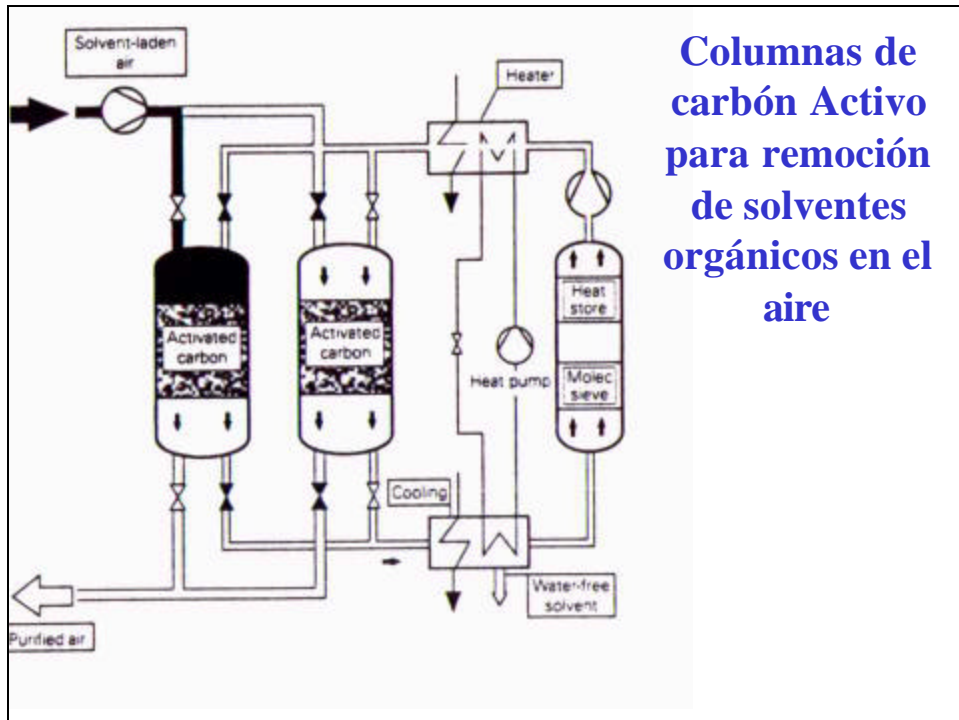
Proceso para Separar y Concentrar Au y Ag desde Soluciones Cianuradas:



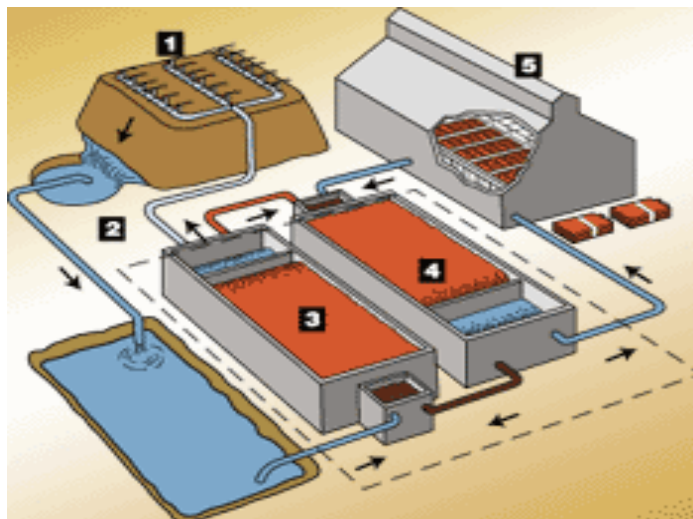
- Capacidad de adsorción: 0.5 mol de metal/kg de carbón.
- Superficie específica del carbón 6x16 mallas: 1200 m²/g.
- Operación en Etapas con Carga en Contracorriente:
Columnas ó Estanques Agitados

Descarga (desorción): con solución de soda cáustica:
NaOH al 1%, a 130 °C y a 75 psi
Tiempo de descarga: 3-5 horas.

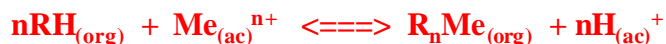
Regeneración del Carbón: Lavado con HNO₃
Combustión a 700°C en horno



EXTRACCION POR SOLVENTES (SX)



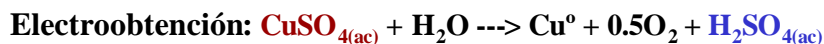
Proceso para Extraer y Concentrar Iones Metálicos:
Cu, U, Fe, Co, As, Zn, Ni, etc.



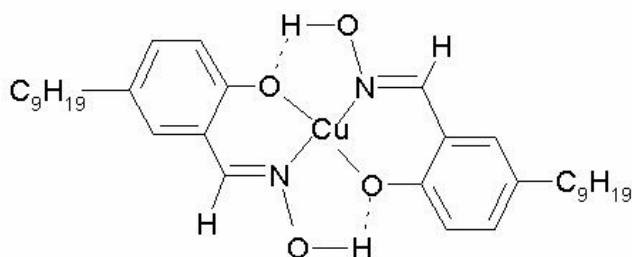
Primer Proceso Industrial de SX : USA en 1968.

Chile 1980 en SMP.

Proceso Para el Cobre



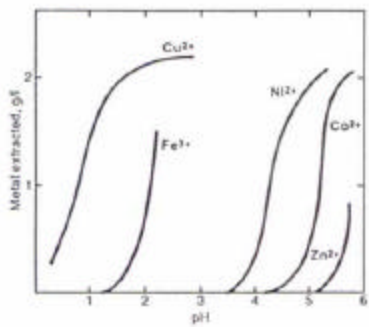
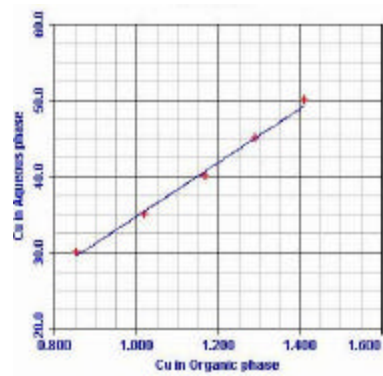
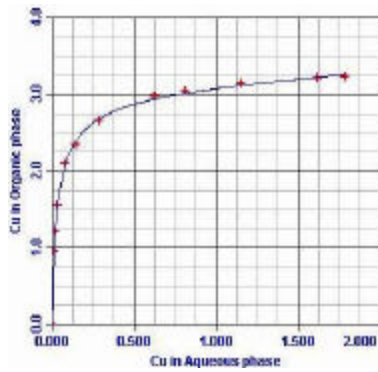
Extractantes: mezclas de ketoximas y aldoximas dispersas en solvente orgánico



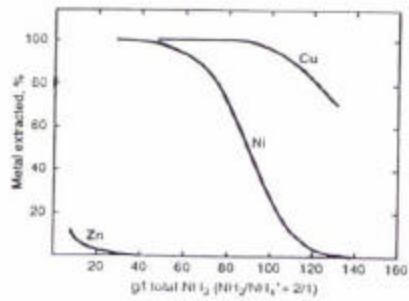
Solventes Orgánicos: Kerosen (Parafina), SCAID con alto punto de inflamación

Eficiencia de la Extracción: 95% en 1 minuto
 Control del Mezclado y Tamaño de Gota

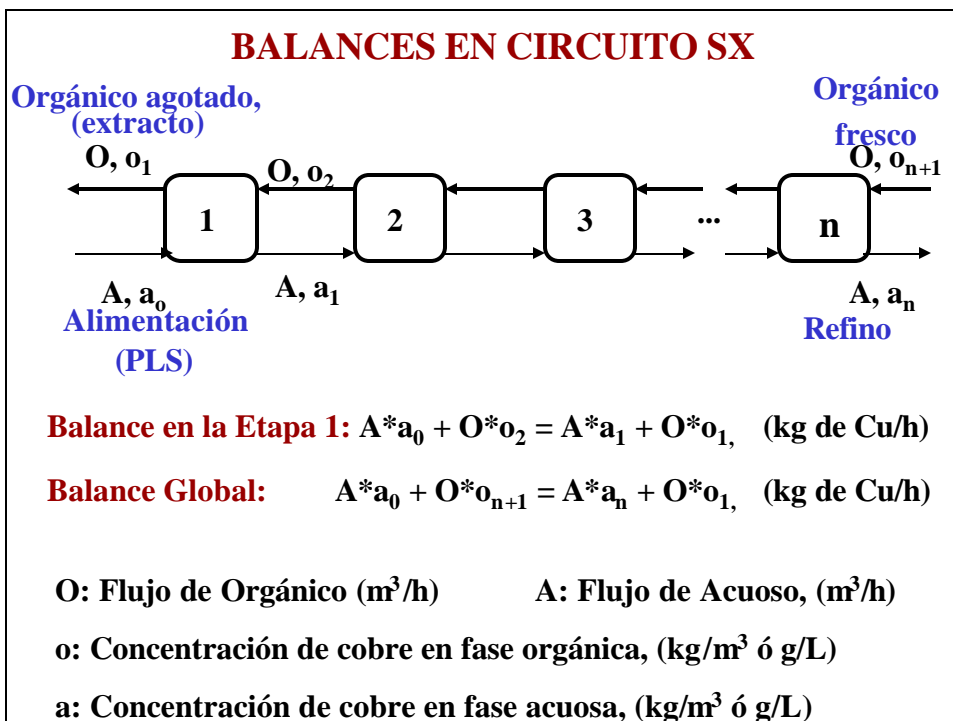
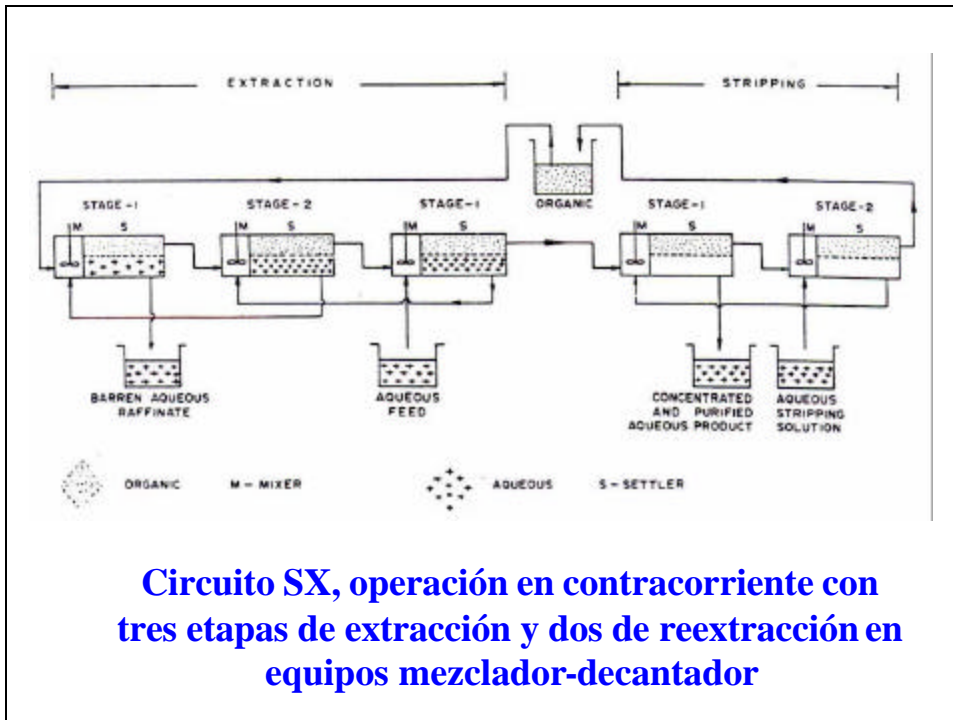
Isotermas de Extracción y Re-Extracción



Extraction of some metal ions with LIX-64N as a function of pH (Henkel Corporation).



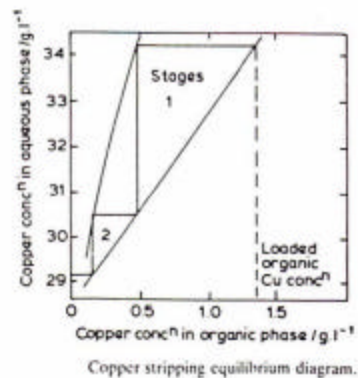
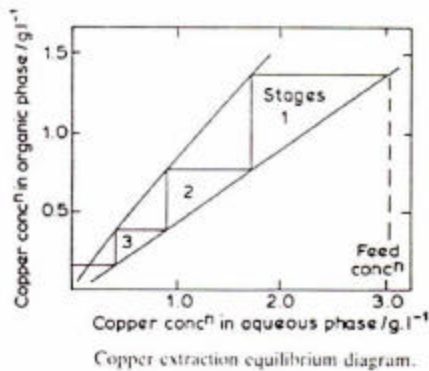
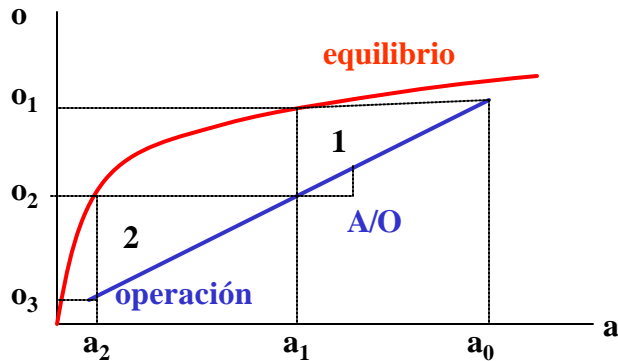
Extraction of metal ions from ammoniacal solution by LIX-64N (Henkel Corporation).



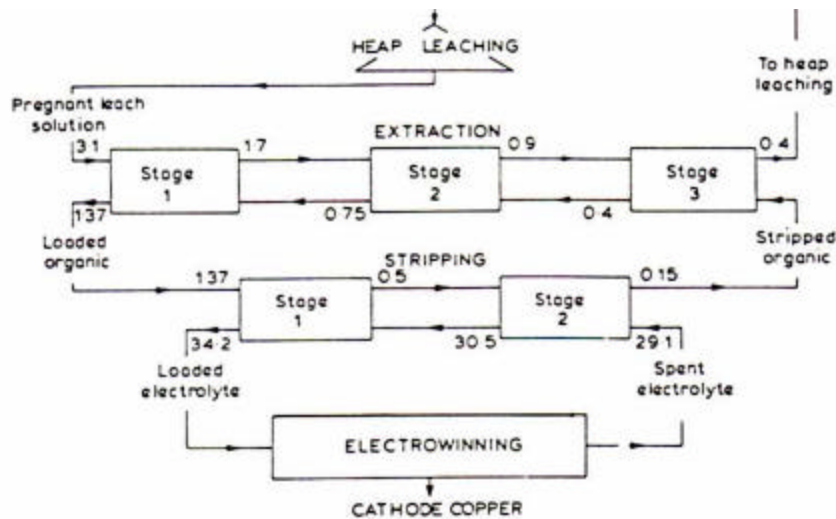
Balance Global: $A \cdot a_0 + O \cdot o_{n+1} = A \cdot a_n + O \cdot o_1$, (kg de Cu/h)

Línea de Operación: $o_1 = (A/O) (a_0 - a_n) + o_{n+1}$, (kg de Cu/h)

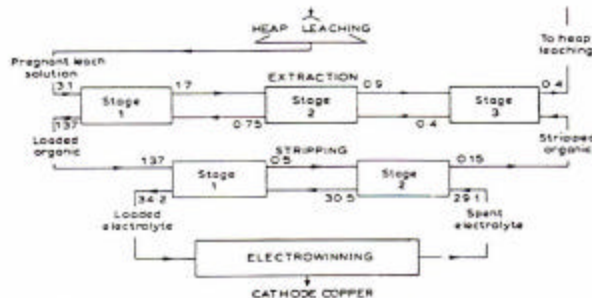
Razón Volumétrica de Fases = A/O = pendiente



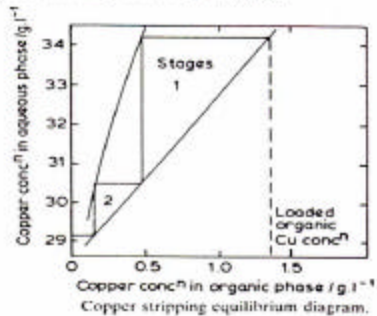
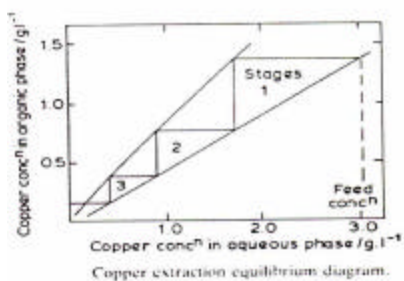
Diagramas de McCabe-Thiele



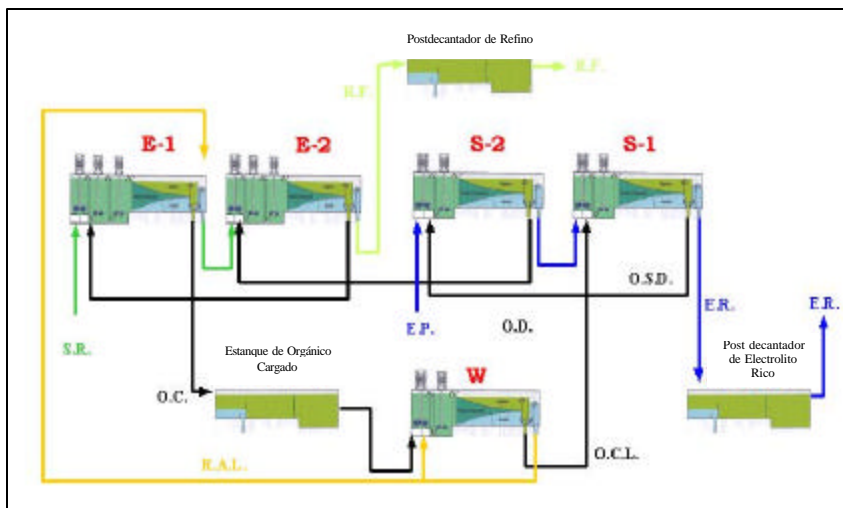
Bluebird Mine copper solvent extraction process (the numerical data give concentration (g.l^{-1}) of copper in phases entering and leaving each stage.



Bluebird Mine copper solvent extraction process (the numerical data give concentration (g.l^{-1}) of copper in phases entering and leaving each stage.



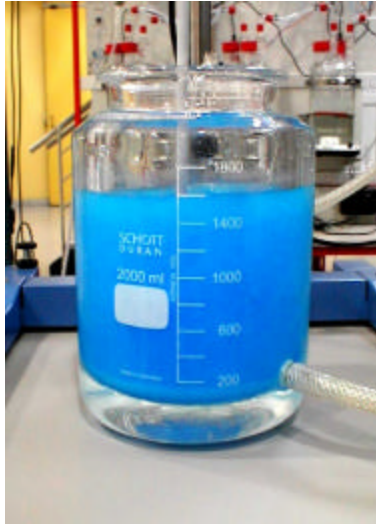
Proceso SX



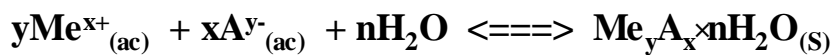
PARÁMETROS OPERACIONALES Y DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE SX

Tiempo anual de operaciones	d	365
Utilización	%	95
Tiempo efectivo Anual	d	347
Cobre en solución rica	gpl	2 a 10
Eficiencia de extracción	%	85 a 90
Equipos mezcladores decantadores		Convencionales
Configuración		2E; 1L; 2S; 2E; 1S; otros
Relación O:A en mezcladores		1, 2/1; 1/1
Tiempo de residencia en mezcladores		
• Extracción	min	3
• Reextracción y Lavado	min	2
Area Especifica de decantación	m ² /m ³	3 a 4
Reja distribuidora en decantador	N°	1
Rejas distribuidoras adicionales	N°	1 a 3
Velocidad de fase orgánico en decantación	cm/s	3 a 4
Altura total de líquido en decantación	m	0,75 a 0,9
Altura de fase orgánica en decantación	m	0,25 a 0,3
Incremento de Cu en reextracción	gpl	12 a 18
Tipo de reactivo a emplear		Cetoxima – aldoxima
Concentración de reactivo	%	10 a 30
Diluyente pto. Inflamación sobre 70°C		Parafina purificada
Arrastres		
• Acusoso en orgánico, cont. Acuosa	mg/L	400
• Acusoso en orgánico en etapa lavado	mg/L	250
• Orgánico en acusoso, cont. Orgánica	mg/L	50
Tiempo de retención en estanques		
• Orgánico	min	10 a 20
• Post decantador de refino	min	30 a 60
• Refino	min	100 a 150
• Post decantador de electrolito rico	min	40 a 90
Revestimiento de estanques		FRP; HDPE o mezcla de ellos

CRISTALIZACION



Equilibrio Físico-Químico



Variables: Concentración, Dilución y T^a .
Proceso: Lento y Caro.
Producto: Puro, Cristalino, Valioso.

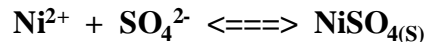
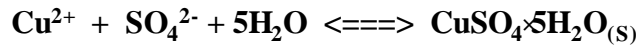
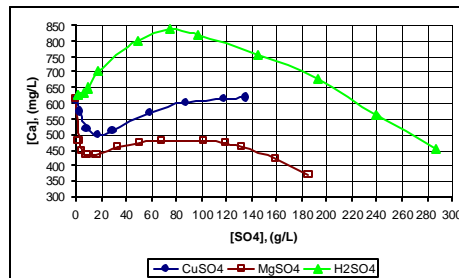
Ejemplos:

- Sales desde aguas superficiales (NaCl).
- Sales desde soluciones de lixiviación de minerales metálicos y no-metálicos (CuSO_4 , NaNO_3 , KNO_3 , Li_2CO_3 , etc.).
- Cristales con distinta agua de hidratación según la T^a y C.

SOLUBILIDAD

Concentración de equilibrio de un soluto o un mineral en una solución en condiciones definidas de temperatura y composición.

Solubilidad del sulfato de calcio (yeso) a 25°C (Linke, 1958):

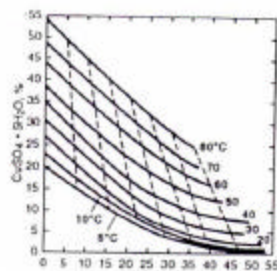


Tecnologías: cristalizador solar,
 cristalizador al vacío,
 secador spray, evaporador.

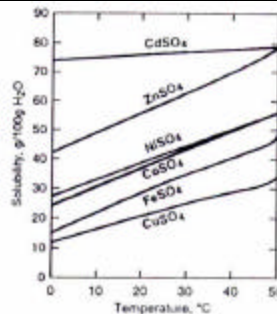
La cristalización consta de tres etapas:

- 1- Generación de Supersaturación.
- 2- Formación de un núcleo semilla.
- 3- Crecimiento de los cristales a partir del núcleo.

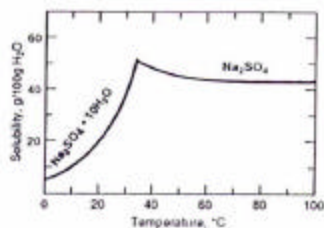
Control de Saturación: i)- Adición de Solutos.
 ii)- Eliminación de Agua.
 iii)- Calentamiento ó Enfriamiento.



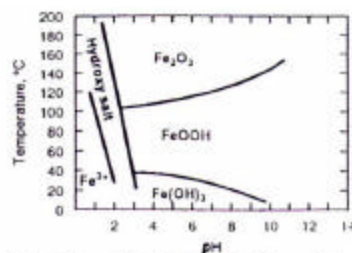
Solubility of copper sulfate in sulfuric acid solutions



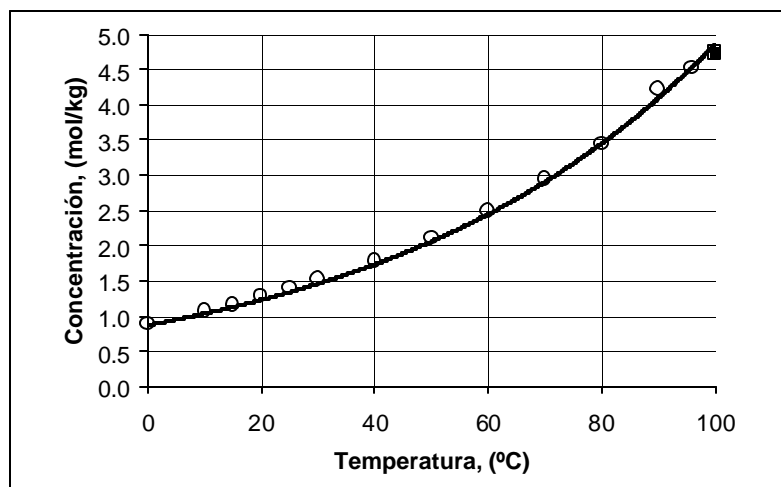
Increase in the solubility with increasing temperature



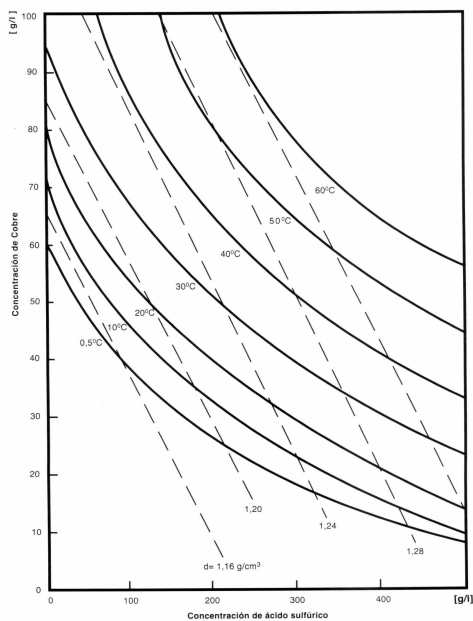
Solubility of sodium sulfate in water



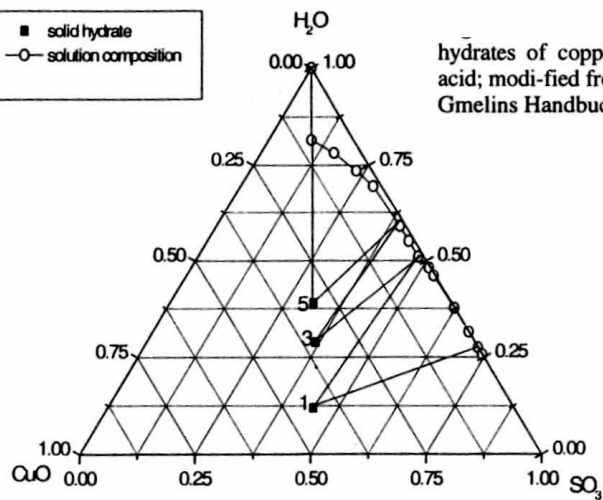
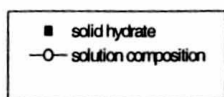
Conditions for the precipitation of iron oxide, oxide hydroxide, hydroxide, and hydroxy salts from 0.5M ferric sulfate solution (Babcan, 1971).



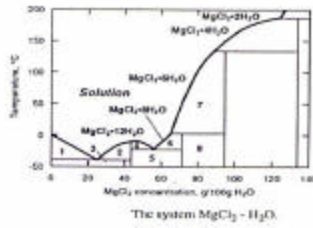
Solubilidad del sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) en agua vs. T° .
[Lide (1999) and Linke, 1958, (? : $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; ■ $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)].



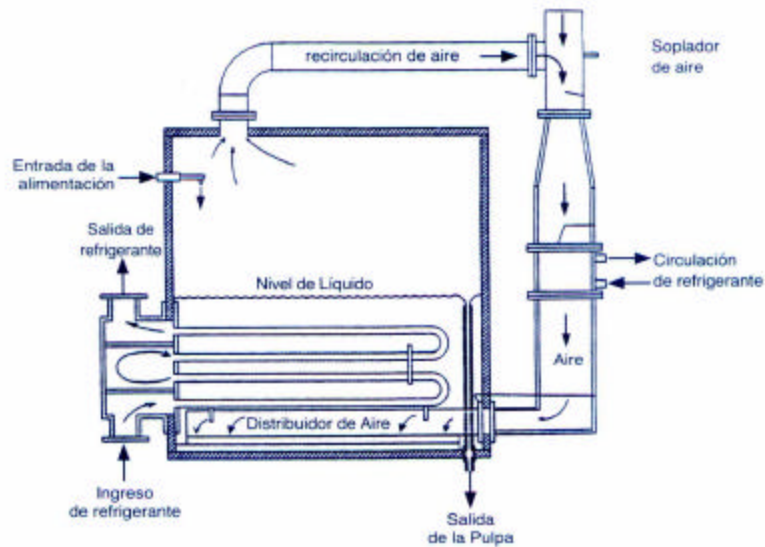
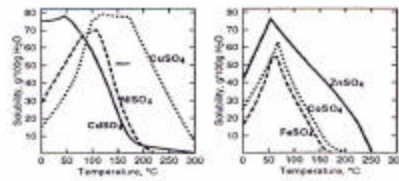
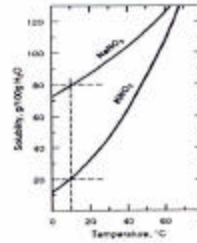
Solubilidad del Sulfato de Cobre en Soluciones de Ácido Sulfúrico a Distintas Temperaturas



Solubility of the hydrates of copper sulfate in sulfuric acid; modified from Mellor (1923) and Gmelins Handbuch (1958).



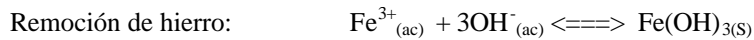
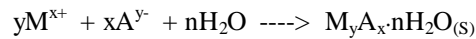
1. Solution + ice
2. Solution + $\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
3. Ice + $\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
4. $\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ + $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
5. Solution + $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
6. Solution + $\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
7. $\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ + $\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



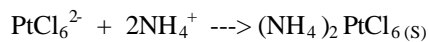
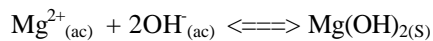
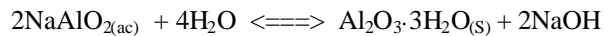
Corte esquemático mostrando el funcionamiento de un cristalizador de lecho fluidizado apropiado para la producción de sulfato de cobre tipo nieve.

Precipitación

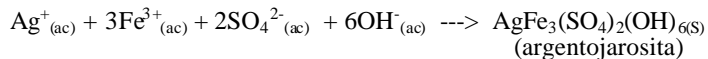
Proceso utilizado para remoción de impurezas y recuperación de agua



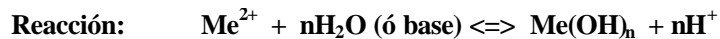
Producción de Al, Mg y Pt:



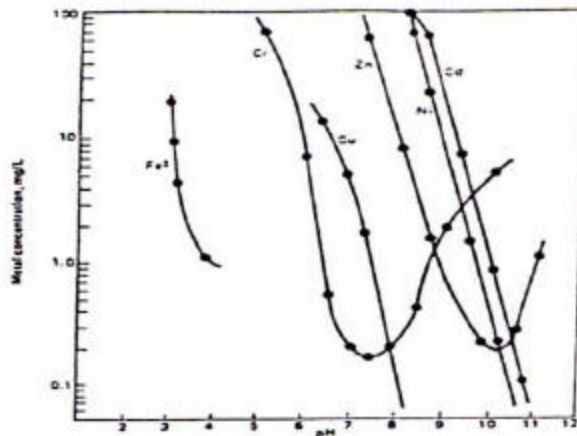
Pérdida de metales valiosos:

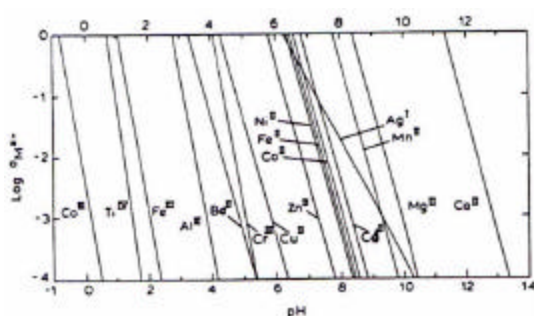


Precipitación de Hidróxidos Metálicos



Producción de: $Al(OH)_3$, $Be(OH)_3$, $Cu(OH)_2$, $Mg(OH)_2$,
 $Co(OH)_2$, TiO_2 , Cu_2O , $FeOOH$, Fe_2O_3





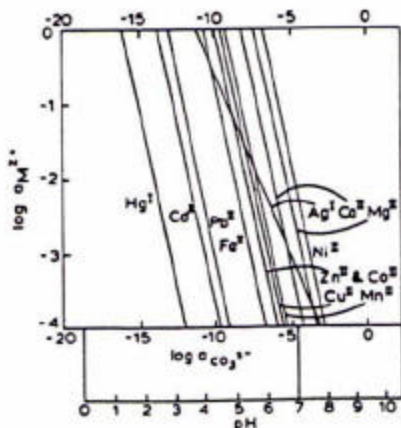
Solubilidad de los hidróxidos metálicos en función del pH de la solución a 25°C

Elemento	Concentración residual en agua a pH=10, (ppm)
Cd	0.1 - 0.5
Cu	0.5 - 1
Pb	0.3 - 1.5
Cr(III)	0.1 - 0.5
Ni	0.2 - 1.5
Zn	0.5 - 1.5

Precipitación de Carbonatos Metálicos

Reacción: $m\text{Me}^{2+} + n\text{CO}_3^{2-} (\text{ó } \text{CO}_{2(\text{g-ac})}) \rightleftharpoons \text{Me}_m(\text{CO}_3)_n(\text{s})$

Producción de: LiCO_3 , Na_2CO_3 , NaHCO_3 , CaCO_3



Metal carbonate precipitation diagram 25°C

Solubilidad a: pH = 9; 25°C y $[\text{CO}_3] = 0,1 \text{ M}$

Composés	pK_{CO_3}	Concentrations résiduelles (ppm)
Ag_2CO_3	11,07	4,5
BaCO_3	8,59	$7,01 \cdot 10^{-2}$
CaCO_3	8,30	$4,0 \cdot 10^{-2}$
CdCO_3	11,21	$1,37 \cdot 10^{-3}$
FeCO_3	10,51	$3,43 \cdot 10^{-4}$
Hg_2CO_3	6,44	$1,70 \cdot 10^{-2}$
MnCO_3	10,65	$2,45 \cdot 10^{-5}$
NiCO_3	6,85	1,64
PbCO_3	12,84	$5,96 \cdot 10^{-6}$
ZnCO_3	9,92	$1,55 \cdot 10^{-3}$

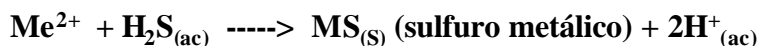
Reducción de Metales

Proceso redox donde se forma un producto insoluble.



Agentes Reductores: - Gases (H_2 , H_2S , CO , SO_2 , etc.).
 - Metales menos nobles.
 - Coque, Sulfitos, Iones Reductores.

Precipitación con H_2S

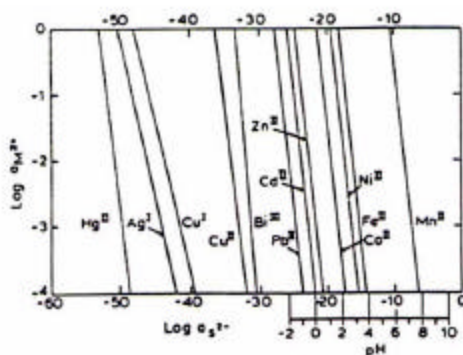
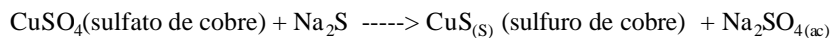


- Los sulfuros metálicos son muy insolubles.
- Baja solubilidad de los gases en condiciones ambientales.
- Requiere alta presión, se genera alta T^a y precipitan sales.

Precipitación de Sulfuros Metálicos



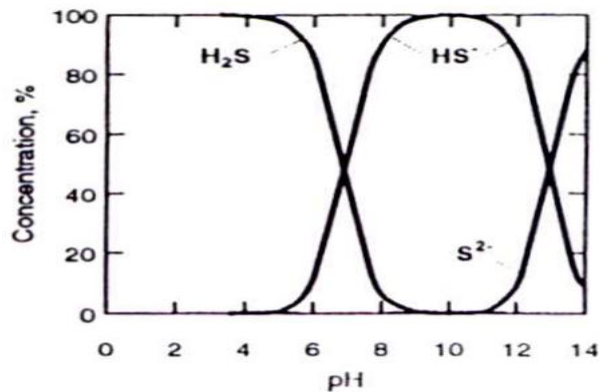
Reactivos: H_2S (ácido sulfhídrico), Na_2S (sulfuro de sodio)



Metal sulphide precipitation diagram (based on data for 25°C and 1 atmosphere pressure of hydrogen sulphide)

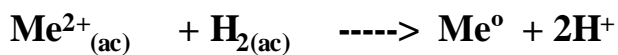
Elemento	Concentración residual en agua a pH = 7, (ppm)
Cd	0.01
Cu	0.01
Pb	0.05
Ni	0.05
Zn	0.01

Precipitación con H_2S : $\text{Me}^{2+} + \text{H}_2\text{S}_{(\text{ac})} \text{-----} \text{MeS}_{(\text{s})} + 2\text{H}^+$

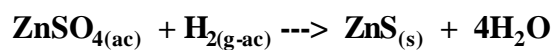
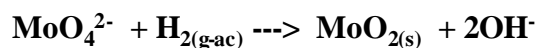
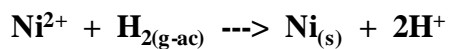
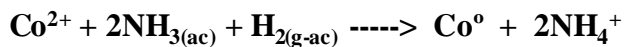
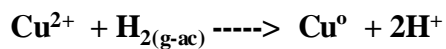


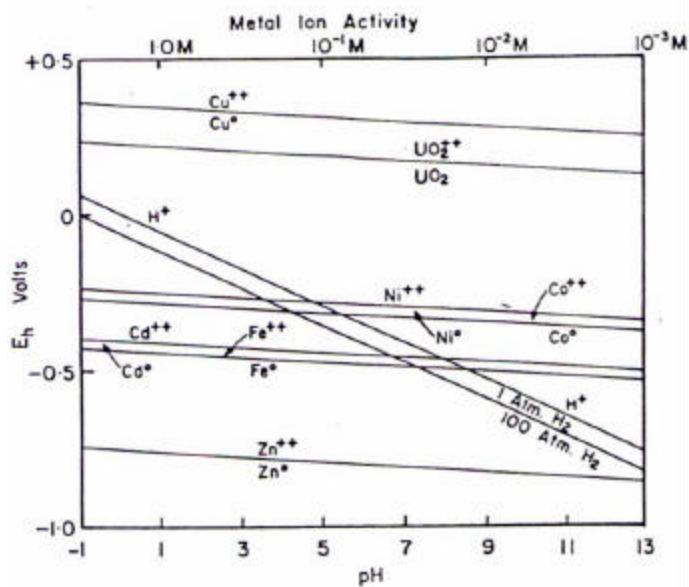
Eliminación de Arsénico: $\text{As}^{3+} + 3\text{H}_2\text{S} \text{---} \text{As}_2\text{S}_3 + 3\text{H}^+$

PRECIPITACIÓN CON HIDROGENO



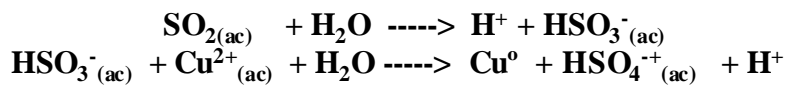
Aplicaciones: Separación de iones Cu, Co y Ni



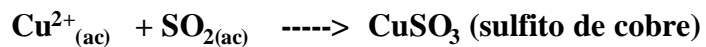


Reducción con SO_2

- Operación a 100°C y 3.5 atm (50 psi):

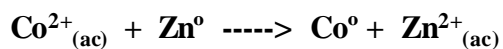


-Operación en condiciones ambientales:

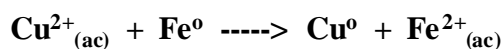


CEMENTACION

- Purificación de las Soluciones de Sulfato de Cinc



- Obtención de Cemento de Cobre con Chatarra de Hierro:

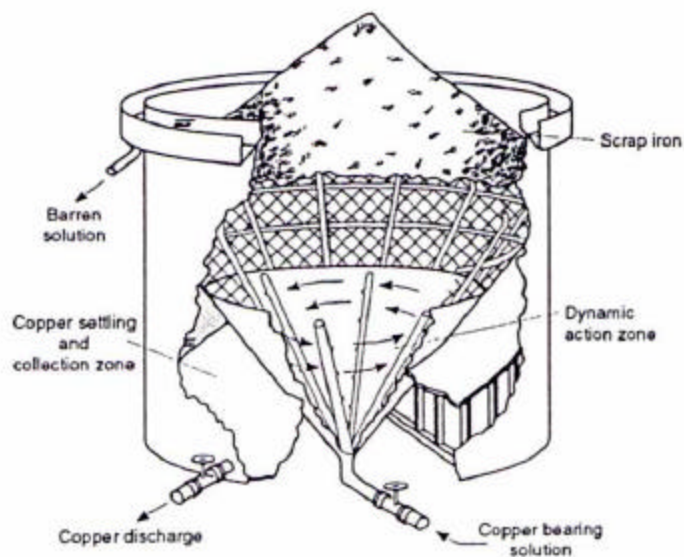


Control a pH=2 para evitar la precipitación del hierro

Cementación con Polvo de Cinc:



Cementación del Plomo: $\text{Pb}^{2+}_{(\text{ac})} + \text{Fe}^0 \text{ ---} > \text{Pb}^0 + \text{Fe}^{2+}_{(\text{ac})}$



Precipitador Kennecot de Cono Invertido

Electrólisis



Proceso utilizado para producir: Ag, Au, Cd, Cl, Cr, Co, Cu, Ga, Mn, Ni, Pd, Pt, Sb, Se, Te, etc.

Ejemplos: $\text{Cu}^{2+} + 2e \text{ ----> Cu}^0$, $\text{Ni}^{2+} + 2e \text{ ----> Ni}^0$

