

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesores Patrocinantes

Prof. Fernando Parada

Prof. Andrés Reghezza

**ESTUDIO DE LIXIVIACION DE OXIDOS SINTETICOS DE Cu-Fe-Mn COMO BASE
PARA EXPLICAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS OXIDOS NEGROS**

YERKO ALEJANDRO CONTRERAS CERÓN

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Enero 2019

RESUMEN

Los óxidos negros se definen como una serie de compuestos y mineraloides de tonalidades oscuras, de difícil reconocimiento, complejidad mineralógica y asociaciones polimetálicas refractarias a la acción ácida y de una lenta cinética disolutiva en los sistemas convencionales de lixiviación, lo cual representa un problema para el tratamiento hidrometalúrgico de menas de cobre que contienen este tipo de mineral. Estos óxidos se encuentran en yacimientos exóticos que están en sectores aledaños a los pórfidos cupríferos andinos y como elementos mayoritarios destacan el Cu, Mn y Fe.

En esta memoria se planteó el determinar las mejores condiciones disolutivas y el medio lixivante más adecuado para extraer el cobre desde compuestos de óxidos mixtos y triples de cobre, hierro y manganeso. Estos compuestos fueron sintetizados a escala laboratorio y son una buena aproximación de los óxidos negros antes mencionados. Posteriormente se estudió su lixiviación en diferentes medios: utilizando ácido sulfúrico se realizó una lixiviación estándar, una lixiviación acida salina, una lixiviación acida con sulfato ferroso y una lixiviación acida oxidante, además, también se realizó una lixiviación con KCN a pH básico, todas llevadas a cabo a dos temperaturas (20 y 60 °C) en un sistema agitado.

Los resultados obtenidos en la lixiviación indican, que es posible aumentar la extracción de cobre al aumentar la temperatura como también al cambiar el medio lixivante. En la lixiviación acida con sulfato ferroso se obtuvieron los mejores resultados para todos los compuestos evaluados. En la Tabla siguiente se presenta un resumen de los resultados.

Tabla 1: Resumen de extracciones de cobre en lixiviación acida ocupando diferentes medios lixiviantes a dos temperaturas y un tiempo de 120 min.

Especie mineral	Temperatura [°C]	H ₂ SO ₄ [60 g/L]	H ₂ SO ₄ [60 g/L] + Cl ⁻ [60 g/L]	H ₂ SO ₄ [60 g/L] + Fe ²⁺ [20 g/L]	H ₂ SO ₄ [60 g/L] + Fe ³⁺ [20 g/L]	KCN [5 g/L]
		%E Cu	%E Cu	%E Cu	%E Cu	%E Cu
CuFe ₂ O ₄	20	8,83	9,63	8,96	8,38	3,25
	60	20,89	16,81	28,04	15,36	15,15
CuMn ₂ O ₄	20	50,44	51,16	95,11	74,57	5,45
	60	76,40	90,59	98,22	81,11	34,88
CuMnFe ₂ O ₅	20	5,61	9,72	6,49	7,35	0,72
	60	19,98	34,51	43,07	32,44	2,65

ABSTRACT

The black oxides are defined as a series of compounds and mineraloids of dark shades, difficult to recognize, mineralogical complexity and polymetallic associations refractory to acid action and a slow dissolving kinetics in conventional leaching systems, which represents a problem for the Hydrometallurgical treatment of copper ores that contain this type of mineral. These oxides are found in exotic deposits that are in areas surrounding the Andean copper porphyry and Cu, Mn and Fe are the main elements.

Under the previous framework, it was proposed in this report to determine the best dissolving conditions and the most suitable leaching medium to extract copper from mixed and triple oxides of copper, iron and manganese. These compounds were synthesized at laboratory scale and are a good approximation of the aforementioned black oxides. Subsequently, its leaching was studied in different media: standard leaching, acid leaching, acid leaching with ferrous sulfate and an acid oxidizing leaching were carried out using sulfuric acid, as well as a leaching with KCN at basic pH, all of them carried out performed at two temperatures (20 and 60 ° C) in a stirred system.

The results obtained in leaching indicate that it is possible to increase copper extraction by increasing the temperature as well as by changing the leaching medium. In acid leaching with ferrous sulfate, the best results were obtained for all the compounds evaluated.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCION	1
1.1.	GENERALIDADES	1
1.2.	OBJETIVOS	2
2.	ANTECEDENTES	3
2.1.	ESTABILIDAD DE LOS OXIDOS DE COBRE, FIERRO Y MANGANESO	3
2.1.1.	Diagrama de predominancia	3
2.1.2.	Formación de los compuestos de cobre, hierro y manganeso por descomposición térmica y oxidación.	5
2.1.3.	Formación de compuestos mixtos y triples de cobre-hierro, cobre-manganeso y cobre-hierro-manganeso.....	6
2.2.	LIXIVIACION DE LOS OXIDOS DE Cu, Mn, Fe.....	8
2.2.1.	Termodinámica de las reacciones de lixiviación.	8
2.2.2.	Antecedentes sobre la lixiviación de los óxidos de Cu, Fe y Mn.	14
2.2.3.	Reacciones de lixiviación de los compuestos mixtos y triples.	15
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	17
3.1.	SINTETIZACION DE LOS OXIDOS	17
3.1.1.	Procedimiento y condiciones experimentales.....	17
3.1.2.	Equipo experimental.....	20
3.2.	PRUEBAS DE LIXIVIACION	21
3.2.1.	Procedimiento y condiciones experimentales.....	21
3.3.1.	Equipo experimental.....	25
4.	ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	26
4.1.	RESULTADOS DE LA SINTESIS DE CADA METAL	26
4.2.	RESULTADOS DE LA SINTESIS DE OXIDOS MIXTOS.....	26
4.2.1.	Síntesis de Ferrita Cúprica (CuFe_2O_4)	26
4.2.2.	Síntesis de la manganita de cobre (CuMn_2O_4)	27
4.2.3.	Síntesis de la ferrita de cobre y manganeso ($\text{CuMnFe}_2\text{O}_5$).....	28
4.3.	LIXIVIABILIDAD DE COMPUESTOS PUROS.....	29
4.3.1.	Lixiviación de óxido cúprico o tenorita (CuO).....	29
4.3.2.	Lixiviación de trióxido de hierro o hematita (Fe_2O_3).....	31
4.3.3.	Lixiviación de Oxido mangánico (Mn_2O_3)	33
4.3.4.	Lixiviación de óxido manganeso (MnO)	36
4.4.	RESULTADOS DE PRUEBAS DE LIXIVIACION DE COMPUESTOS MIXTOS.....	38
4.4.1.	Lixiviación de ferrita cúprica (CuFe_2O_4).....	38
4.4.2.	Lixiviación de manganita de cobre (CuMn_2O_4)	46
4.4.3.	Lixiviación de ferrita de cobre y manganeso ($\text{CuMnFe}_2\text{O}_5$)	54
5.	CONCLUSIONES	62
6.	BIBLIOGRAFIA.	69
	APENDICE.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1	DIAGRAMA DE TENSIÓN – PH PARA EL SISTEMA COBRE – AGUA A 25 °C (0.13M DE CU).....	9
FIG. 2	DIAGRAMA DE TENSIÓN – PH PARA EL SISTEMA FIERRO – AGUA A 25 °C (0.13M DE FE).....	11
FIG. 3	DIAGRAMA DE TENSIÓN – PH PARA EL SISTEMA MANGANESO – AGUA A 25 °C (0.14 M DE MN)	13
FIG. 4	LIXIVIACIÓN DE TENORITA EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (387% DE EXCESO DE H ₂ SO ₄ SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS	30
FIG. 5	LIXIVIACIÓN DE TENORITA EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (60 GPL DE CL ⁻ , 20 GPL DE FE ²⁺ Y 20 GPL DE FE ³⁺ RESPECTIVAMENTE; T= 60 °C).....	30
FIG. 6	LIXIVIACIÓN DE HEMATITA EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (226% DE EXCESO DE H ₂ SO ₄ SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS	32
FIG. 7	LIXIVIACIÓN DE HEMATITA EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (60 GPL DE CL ⁻ , 20 GPL DE FE ²⁺ Y 20 GPL DE FE ³⁺ RESPECTIVAMENTE; T= 60 °C).....	32
FIG. 8	LIXIVIACIÓN DE OXIDO MANGÁNICO EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (222% DE EXCESO DE H ₂ SO ₄ SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS	35
FIG. 9	LIXIVIACIÓN DE OXIDO MANGÁNICO EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (60 GPL DE CL ⁻ , 20 GPL DE FE ²⁺ Y 20 GPL DE FE ³⁺ RESPECTIVAMENTE; T= 60 °C).....	35
FIG. 10	LIXIVIACIÓN DE OXIDO MANGANOSO EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (334% DE EXCESO DE H ₂ SO ₄ SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS	37
FIG. 11	LIXIVIACIÓN DE OXIDO MANGANOSO EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (60 GPL DE CL ⁻ , 20 GPL DE FE ²⁺ Y 20 GPL DE FE ³⁺ RESPECTIVAMENTE; T= 60 °C).....	37
FIG. 12	LIXIVIACIÓN DE FERRITA CÚPRICA EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (266% DE EXCESO DE H ₂ SO ₄ SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS	39
FIG. 13	LIXIVIACIÓN DE FERRITA CÚPRICA EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (T= 20 °C)	41
FIG. 14	LIXIVIACIÓN DE FERRITA CÚPRICA EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (T= 60 °C)	42
FIG. 15	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y DE LOS MEDIOS LIXIVIANTES EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE DESDE LA FERRITA CÚPRICA. (T = 120 MIN.)	45
FIG. 16	LIXIVIACIÓN DE MANGANITA DE COBRE EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (263% DE EXCESO DE H ₂ SO ₄ SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS	47
FIG. 17	LIXIVIACIÓN DE MANGANITA DE COBRE EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (T= 20 °C).....	50
FIG. 18	LIXIVIACIÓN DE MANGANITA DE COBRE EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (T= 60 °C).....	51
FIG. 19	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y DE LOS MEDIOS LIXIVIANTES EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE DESDE LA MANGANITA DE COBRE. (T = 120 MIN.).....	53
FIG. 20	LIXIVIACIÓN DE LA FERRITA DE COBRE Y MANGANESO EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (280% DE EXCESO DE H ₂ SO ₄ SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	55
FIG. 21	LIXIVIACIÓN DE FERRITA DE COBRE Y MANGANESO EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (T= 20 °C).....	57
FIG. 22	LIXIVIACIÓN DE FERRITA DE COBRE Y MANGANESO EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (T= 60 °C).....	58
FIG. 23	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y DE LOS MEDIOS LIXIVIANTES EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE DESDE LA FERRITA DE COBRE Y MANGANESO. (T = 120 MIN.)	61
FIG. 24	DIFRACCIÓN DE RAYOS-X, PARA LA FERRITA CÚPRICA CON REACTIVOS EN PROPORCIÓN ESTEQUIOMÉTRICA..	82
FIG. 25	DIFRACCIÓN DE RAYOS-X, PARA LA FERRITA CÚPRICA CON REACTIVOS EN PROPORCIÓN 2/1 (CUO/FE ₂ O ₃).	83
FIG. 26	DIFRACCIÓN DE RAYOS-X, PARA LA FERRITA CÚPRICA CON REACTIVOS EN PROPORCIÓN 1/2 (CUO/FE ₂ O ₃).	84

FIG. 27	DIFRACCIÓN DE RAYOS-X, PARA LA MANGANITA DE COBRE (CuMn_2O_4) CON REACTIVOS EN PROPORCIÓN 1/1 ($\text{CuO}/\text{Mn}_2\text{O}_3$).	85
FIG. 28	DIFRACCIÓN DE RAYOS-X, PARA LA MANGANITA DE COBRE (CuMn_2O_4) CON REACTIVOS EN PROPORCIÓN 2/1 ($\text{CuO}/\text{Mn}_2\text{O}_3$).	86
FIG. 29	DIFRACCIÓN DE RAYOS-X, PARA LA MANGANITA DE COBRE (CuMn_2O_4) CON REACTIVOS EN PROPORCIÓN 1/2 ($\text{CuO}/\text{Mn}_2\text{O}_3$).	87
FIG. 30	DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE FASES PARA EL SISTEMA $\text{Cu} - \text{S} - \text{O}$ A 850°C	102
FIG. 31	DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE FASES PARA EL SISTEMA $\text{Cu} - \text{S} - \text{O}$ A DISTINTAS TEMPERATURAS Y $\text{PO}_{2(\text{g})} = 0.21 \text{ ATM}$	103
FIG. 32	DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE FASES PARA EL SISTEMA $\text{Fe} - \text{S} - \text{O}$ A 950°C	104
FIG. 33	DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE FASES PARA EL SISTEMA $\text{Fe} - \text{S} - \text{O}$ A DISTINTAS TEMPERATURAS Y $\text{PO}_{2(\text{g})} = 0.21 \text{ ATM}$	105
FIG. 34	DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE FASES PARA SISTEMA $\text{Mn} - \text{N} - \text{O}$ A 700°C	106
FIG. 35	DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE FASES PARA EL SISTEMA $\text{Mn} - \text{N} - \text{O}$ A DISTINTAS TEMPERATURAS Y $\text{PO}_{2(\text{g})} = 0.21 \text{ ATM}$	107
FIG. 36	DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE FASES PARA EL SISTEMA $\text{Cu} - \text{Fe} - \text{O}$ A 900°C .	108
FIG. 37	DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE FASES PARA EL SISTEMA $\text{Cu} - \text{Mn} - \text{O}$ A 750°C .	109
FIG. 38	DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE FASES PARA EL SISTEMA $\text{Cu} - \text{Mn} - \text{O}$ A 900°C .	110
FIG. 39	DIFRACCIÓN DE RAYOS-X, PARA LA TENORITA.	113
FIG. 40	DIFRACCIÓN DE RAYOS-X, PARA LA HEMATITA.	114
FIG. 41	PRENSA HIDRÁULICA.	116
FIG. 42	HORNO HORIZONTAL TUBULAR.	116
FIG. 43	HORNO HORIZONTAL TUBULAR.	117
FIG. 44	VASO DE REACCIÓN CON FILTRACIÓN AL VACÍO.	117
FIG. 45	PH - METRO.	118
FIG. 46	SISTEMA DE AGITACIÓN MECÁNICO.	118

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: RESUMEN DE EXTRACCIONES DE COBRE EN LIXIVIACIÓN ACIDA OCUPANDO DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES A DOS TEMPERATURAS Y UN TIEMPO DE 120 MIN.....	1
TABLA 2: RESUMEN DE ZONAS DE ESTABILIDAD EN TEMPERATURAS Y PRESIONES PARCIALES DE $O_{2(g)}$, $SO_{2(g)}$ Y $CUO_{(g)}$ PARA LAS ESPECIES DE INTERÉS (P_{TOTAL} 1 ATM) (P EN ATM).....	4
TABLA 3: DIFRACCIÓN DE RAYOS-X, PARA LA FERRITA CÚPRICA CON REACTIVOS EN DISTINTAS RAZONES MOLARES CUO/Fe_2O_3	26
TABLA 4: DIFRACCIÓN DE RAYOS-X, PARA $CUMn_2O_4$ CON REACTIVOS EN DISTINTAS RAZONES MOLARES CUO/Mn_2O_3	27
TABLA 5: ANÁLISIS QUÍMICO, PARA LA FERRITA DE COBRE Y MANGANESO ($CUMnFe_2O_5$) CON REACTIVOS EN RAZÓN MOLAR $CUO/MnO/Fe_2O_3$ ESTEQUIOMÉTRICA.....	28
TABLA 6: COMPORTAMIENTO DE LOS COMPUESTOS PUROS FRENTE A LOS AGENTES LIXIVIANTES.....	66
TABLA 7: COMPORTAMIENTO DE LOS COMPUESTOS MIXTOS Y TRIPLE FRENTE A LOS AGENTES LIXIVIANTES.....	67
TABLA 8: CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS LIXIVIADOS.....	68
TABLA 9: (FIG. 4) LIXIVIACIÓN DE TENORITA EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (387% DE EXCESO DE H_2SO_4 SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	73
TABLA 10: (FIG. 5) LIXIVIACIÓN DE TENORITA EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (60 GPL DE Cl^- , 20 GPL DE Fe^{2+} Y 20 GPL DE Fe^{3+} RESPECTIVAMENTE; $T= 60\text{ }^\circ C$).....	73
TABLA 11: (FIG. 6) LIXIVIACIÓN DE HEMATITA EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (226% DE EXCESO DE H_2SO_4 SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	74
TABLA 12: (FIG. 7) LIXIVIACIÓN DE HEMATITA EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (60 GPL DE Cl^- , 20 GPL DE Fe^{2+} Y 20 GPL DE Fe^{3+} RESPECTIVAMENTE; $T= 60\text{ }^\circ C$).....	74
TABLA 13: (FIG. 8) LIXIVIACIÓN DE OXIDO MANGÁNICO EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (222% DE EXCESO DE H_2SO_4 SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	75
TABLA 14: (FIG. 9) LIXIVIACIÓN DE OXIDO MANGÁNICO EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (60 GPL DE Cl^- , 20 GPL DE Fe^{2+} Y 20 GPL DE Fe^{3+} RESPECTIVAMENTE; $T= 60\text{ }^\circ C$).....	75
TABLA 15: (FIG. 10) LIXIVIACIÓN DE OXIDO MANGANOSO EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (334% DE EXCESO DE H_2SO_4 SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	76
TABLA 16: (FIG. 11) LIXIVIACIÓN DE OXIDO MANGANOSO EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (60 GPL DE Cl^- , 20 GPL DE Fe^{2+} Y 20 GPL DE Fe^{3+} RESPECTIVAMENTE; $T= 60\text{ }^\circ C$).....	76
TABLA 17: (FIG. 12) LIXIVIACIÓN DE FERRITA CÚPRICA EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (266% DE EXCESO DE H_2SO_4 SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	89
TABLA 18: (FIG. 13) LIXIVIACIÓN DE FERRITA CÚPRICA EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES ($T= 20\text{ }^\circ C$).....	90
TABLA 19: (FIG. 14) LIXIVIACIÓN DE FERRITA CÚPRICA EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES ($T= 60\text{ }^\circ C$).....	91
TABLA 20: (FIG. 15) INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y DE LOS MEDIOS LIXIVIANTES EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE DESDE LA FERRITA CÚPRICA. ($T = 120$ MIN.).....	92
TABLA 21: (FIG. 16) LIXIVIACIÓN DE MANGANITA DE COBRE EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (263% DE EXCESO DE H_2SO_4 SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	93
TABLA 22: (FIG. 17) LIXIVIACIÓN DE MANGANITA DE COBRE EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES ($T= 20\text{ }^\circ C$).....	94
TABLA 23: (FIG. 18) LIXIVIACIÓN DE MANGANITA DE COBRE EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES ($T= 60\text{ }^\circ C$).....	95

TABLA 24: (FIG. 19) INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y DE LOS MEDIOS LIXIVIANTES EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE DESDE LA MANGANITA DE COBRE. (T = 120 MIN.)	96
TABLA 25: (FIG. 20) LIXIVIACIÓN DE LA FERRITA DE COBRE Y MANGANESO EN MEDIO SULFÚRICO NORMAL (280% DE EXCESO DE H ₂ SO ₄ SOBRE EL ESTEQUIOMÉTRICO) A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	97
TABLA 26: (FIG. 21) LIXIVIACIÓN DE FERRITA DE COBRE Y MANGANESO EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (T= 20 °C)	98
TABLA 27: (FIG. 22) LIXIVIACIÓN DE FERRITA DE COBRE Y MANGANESO EN DIFERENTES MEDIOS LIXIVIANTES (T= 60 °C)	99
TABLA 28: (FIG. 23) INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y DE LOS MEDIOS LIXIVIANTES EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE DESDE LA FERRITA DE COBRE Y MANGANESO. (T = 120 MIN.)	100
TABLA 29: ANÁLISIS QUÍMICO DEL ÓXIDO MANGÁNICO.....	115



NOMENCLATURA

%E = porcentaje de extracción.

%Dis. = porcentaje de disolución.

(*) = Lo que viene a continuación es teoría.

gpl = gramos por litro.

T = temperatura (°C).

t = tiempo (min).

P_x = presión parcial del componente x (atm)



1. INTRODUCCION

1.1. GENERALIDADES

En general, los compuestos oxidados de cobre son solubles en medio sulfúrico, con una disolución teóricamente completa del elemento en tiempos prudentes de reacción, en condiciones normales de operación (temperatura ambiente y presión atmosférica) .

Sin embargo, existen otros compuestos que presentan un comportamiento disolutivo muy diferente, en cuanto a magnitud y cinética, que han sido agrupados geoquímicamente como “cobres negros” por su color, y que constituyen una presencia importante en los yacimientos oxidados de cobre del Norte del país, tales como, Tesoro, Gaby, Quetena, DMH, Mina Sur y otros.

Estos compuestos corresponden a óxidos polimetálicos, con manganeso y hierro como los elementos constituyentes básicos; oxígeno como único elemento electronegativo detectado y agua de cristalización en cantidades variables.

Estos compuestos son de difícil reconocimiento, complejidad mineralógica y asociaciones polimetálicas refractarias a la acción ácida y de una lenta cinética disolutiva en los sistemas convencionales de lixiviación, por todas estas propiedades presentan un problema para la industria y su procesamiento por vía hidrometalúrgica, y dificultan la caracterización de un yacimiento para efecto de su procesamiento posterior.

Un estudio más fundamental de lixiviación con estos minerales es complejo, por lo cual, la sintetización en laboratorio de los óxidos de Cu, Mn y Fe (CuFe_2O_4 , CuMn_2O_4 y $\text{CuMnFe}_2\text{O}_5$) es una buena aproximación que permite obtener resultados que pueden extrapolarse a los minerales en cuestión.

Sin embargo, en esta investigación no se consideró interacciones entre los diferentes compuestos sintetizados ni la influencia que puede ejercer el material estéril en la recuperación de las especies útiles que en los yacimientos podrían existir.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de esta memoria es estudiar la lixiviabilidad de óxidos mixtos de Cu, Mn y Fe en diferentes medios lixiviantes para extrapolar estos resultados al tratamiento de óxidos negros.

Los objetivos específicos son:

-Sintetización de compuestos mixtos y triples de óxidos Cu-Fe, Cu- Mn y Cu-Fe-Mn respectivamente, que son una aproximación los cobres negros presentes en la naturaleza.

-Estudiar la reactividad de la especie y su cinética de disolución frente a diferentes medios lixiviantes y temperaturas.

-Generar información, ya que no existe información de la disolución de estos compuestos en medio cianuro, de esta forma, se logra extender el conocimiento del análisis secuencial y la determinación del potencial lixiviable del recurso.



2. ANTECEDENTES

2.1. ESTABILIDAD DE LOS OXIDOS DE COBRE, FIERRO Y MANGANESO

2.1.1. Diagrama de predominancia

Los diagramas de predominancia o estabilidad son representaciones gráficas del comportamiento termodinámico de sistemas ideales puros entre un metal, dos gases y la temperatura.

Sin embargo, estos diagramas presentan una gran limitación cuando entran dos o más metales al proceso, y entre ellos son capaces de formar un compuesto mixto, triple, etc. Con la ayuda de un programa de computadora (HSC) nos muestra la zona de predominancia de tales compuestos.

El cobre, el hierro y el manganeso presentan la característica de formar compuestos dobles y triples, dentro de los cuales surgen como más importantes para el estudio la ferrita cúprica (CuFe_2O_4) y la manganita de cobre (CuMn_2O_4), así como compuesto triple, la Ferrita de cobre y manganeso ($\text{CuMnFe}_2\text{O}_5$).

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las zonas de predominancia de estos tipos de óxidos, obtenidas de 9 diagramas de predominancia para los sistemas para definir las condiciones de estabilidad de los óxidos de Cu, Mn y Fe, los cuales se presentan en el Anexo G. De estos diagramas se obtienen las zonas de predominancia de cada compuesto puro para diferentes temperaturas como también a diferentes presiones parciales de oxígeno y dióxido de azufre, válidos para los primeros cuatro diagramas, para el sistema Mn-N-O se visualizaran las zonas de estabilidad para diferentes temperaturas como también a diferentes presiones parciales de oxígeno y nitrógeno y finalmente para los diagramas de compuestos mixtos, se visualizaran las zonas de estabilidad para diferentes presiones parciales de oxígeno y $\text{CuO}_{(g)}$, dejando a continuación una tabla resumen de las zonas de estabilidad de interés para este estudio.

Para ver los diagramas de estabilidad completos ver el ANEXO G.

Tabla 2: Resumen de zonas de estabilidad en temperaturas y presiones parciales de $O_{2(g)}$, $SO_{2(g)}$ y $CuO_{(g)}$ para las especies de interés (P_{total} 1 atm) (P en atm).

Especie mineral	Temperatura [°C]	Log($PO_{2(g)}$)	Log($PSO_{2(g)}$)	Log($PCuO_{(g)}$)
CuO	850	> -2,5	< 0	--
Fe ₂ O ₃	950	> -5	< 0	--
Mn ₂ O ₃	700	0 > x > -2,5	--	--
MnO	700	< -11,5	--	--
CuFe ₂ O ₄	900	> -2,5	--	-2,5 > x > -11,5
CuMn ₂ O ₄	750	no afecta	--	> -8,5



2.1.2. Formación de los compuestos de cobre, hierro y manganeso por descomposición térmica y oxidación.

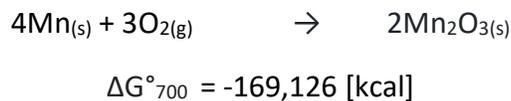
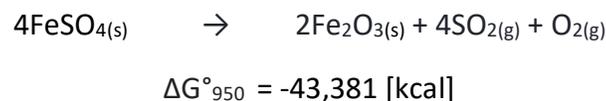
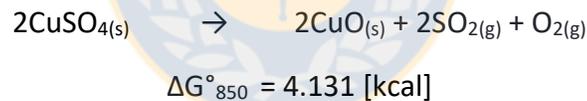
La descomposición térmica y oxidación, como una etapa previa a la lixiviación, tiene por objetivo transformar el mineral de una especie química a otra.

De acuerdo con un enfoque cinético de los reactantes, las reacciones pueden clasificarse en 2 grupos:

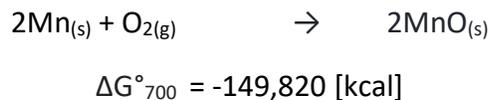
- Reacciones gas-sólido: se incluyen las reacciones de oxidación y descomposición.
- Reacción sólido-sólido: incluye la formación de ferritas como también la formación de manganitas.

Como se pudo observar en los diagramas de estabilidad la probabilidad de encontrar un compuesto determinado depende de las presiones parciales de los gases, pero fundamentalmente de la temperatura.

La obtención de CuO se hizo a partir de la descomposición del $\text{CuSO}_4^{(1)}$, la hematita a partir de la descomposición del $\text{FeSO}_4^{(2)}$ y el óxido de Mn a partir de la oxidación de manganeso elemental⁽³⁾. Las reacciones de interés pueden resumirse para el cobre, hierro y manganeso de la siguiente forma:



Otra reacción planteada sería la oxidación $\text{Mn}_{(s)}$ a 700 °C:



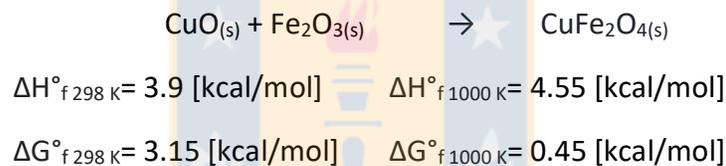
2.1.3. Formación de compuestos mixtos y triples de cobre-ferro, cobre-manganeso y cobre-ferro-manganeso.

Una investigación⁽⁹⁾ revela la formación de compuestos dobles de cobre y fierro a una temperatura mínima de 800 °C, identificados a través de difractogramas y metalografías.

En la investigación anterior se pudo identificar además de la fase tipo espinel un poco de hematita (α -Fe₂O₃) y tenorita (CuO) que se producirían en rangos de temperatura entre 800 – 1000 °C.

La ferrita cúprica (CuFe₂O₄) ha sido sintetizada bajo diferentes condiciones, una fue⁽¹³⁾ donde se logró la formación de ferrita cúprica más magnetita (CuFe₂O₄-Fe₃O₄), calentando ambos óxidos a una temperatura de 900 °C durante 56 horas con un flujo de aire. En otra investigación⁽¹⁰⁾ se logró calentando pellets prensados que contienen una mezcla equimolar de tenorita y hematita por períodos de seis semanas a 800 °C bajo una corriente de oxígeno puro la que finalizó con la formación de ferrita cúprica.

En estas investigaciones la reacción planteada fue:



Para esta reacción se encontró también una expresión de la energía libre de Gibbs, de la forma siguiente:

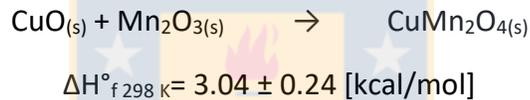
$$\Delta G^\circ_f = 4100 - 4.3T \text{ [cal]}$$

Finalmente se concluye que la ferrita cúprica tendría una estructura química del tipo Cu_xFe_{3-x}O₄ con lo cual se explicaría que para x = 0 la fase estaría formada por Fe₃O₄ y para x = 1 la fase estable sería CuFe₂O₄, también que un aumento de la temperatura y/o disminución de la presión parcial de O_{2(g)} resultarían en una disminución del valor x, valores intermedios dan lugar a la formación de diferentes compuestos.

Diferentes investigaciones⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾ han demostrado que para generar manganita de cobre (CuMn_2O_4) se puede trabajar en rangos de temperatura entre 700 y 1250 °C, identificados a través de difractogramas y análisis químicos los cuales además han concluido que presenta una estructura química del tipo $\text{Cu}_x\text{Mn}_{3-x}\text{O}_4$ y, por ende, a diferentes temperaturas y tiempos de reacción podrían resultar en diferentes compuestos mixtos con la estructura antes mencionada. En el presente estudio solo nos limitaremos al compuesto identificado como manganita de cobre (CuMn_2O_4).

Una forma de sintetizar la manganita de cobre (CuMn_2O_4) fue⁽¹³⁾ calentando pellets prensados que contienen una mezcla equimolar de tenorita y óxido mangánico por períodos de 48 horas a 1000 °C bajo una corriente de aire la que finalizó con la formación de manganita de cobre más óxido de manganeso (II, III) ($\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-Mn}_3\text{O}_4$).

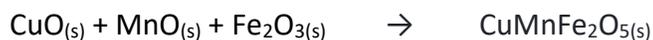
La reacción planteada fue:



También se pudo encontrar en la misma investigación que la entalpía de mezcla para $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{-CuMn}_2\text{O}_4$ es igual a cero lo que indica una mezcla ideal en términos de la entalpía, también se concluye que la entalpía endotérmica de formación a partir de óxidos para este sistema indica que la espinela de cobre es una fase "estabilizada por entropía", estable solo a alta temperatura.

Para la ferrita de cobre y manganeso ($\text{CuMnFe}_2\text{O}_5$) que es un compuesto triple formado a partir de tenorita, hematita y óxido manganeso, corresponde a especies del tipo $\text{Cu}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{O}_w(s)$ las cuales desgraciadamente no se tiene información termodinámica, pero a través de los diagramas de predominancia de sus reactivos antes mencionados se podría hacer una proyección de cuando se podría obtener un compuesto del tipo planteado.

La reacción planteada sería:



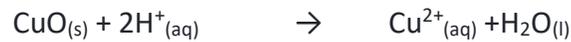
2.2. LIXIVIACION DE LOS OXIDOS DE Cu, Mn, Fe

2.2.1. Termodinámica de las reacciones de lixiviación.

El análisis termodinámico de las reacciones de lixiviación se concentrará a 25 °C ya que a esa temperatura y a una atmosfera de presión presentan mayor interés desde el punto de vista industrial.

La información termodinámica permite predecir si un cambio químico se producirá o no, sin embargo, no entrega un conocimiento acerca del tiempo que toman los fenómenos en ocurrir.

Los valores de la variación en las energías libres indican la ocurrencia del fenómeno cuando estas adoptan valores negativos y viceversa.



$$\Delta G^{\circ}_{298 \text{ K}} = -10.52 \text{ [kcal]}$$

El comportamiento del óxido de cobre se ilustra en el diagrama de equilibrio tensión-pH (Fig.1).



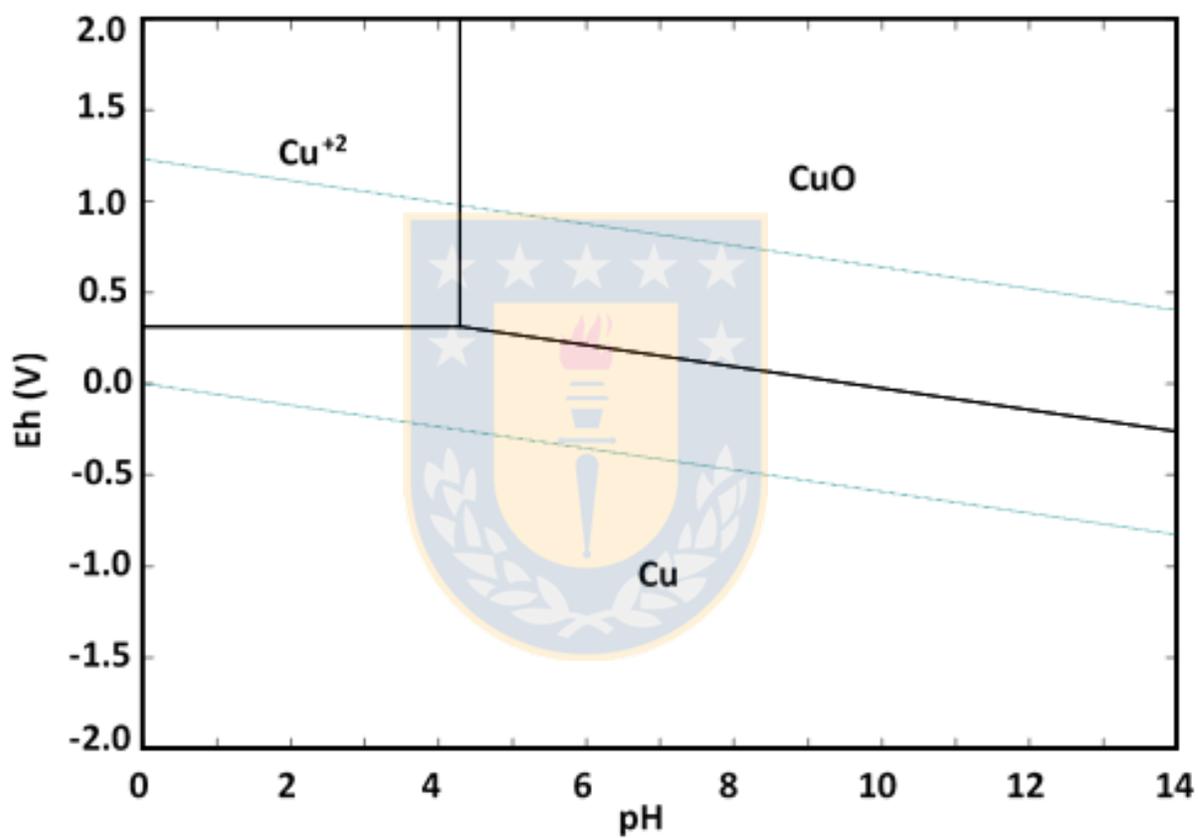
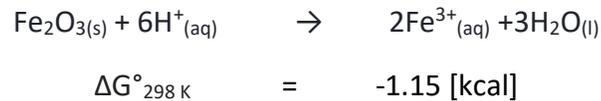


Fig. 1 Diagrama de tensión – pH para el sistema cobre – agua a 25 °C (0.13M de Cu)

En la figura 1 puede observarse, que en la disolución de la tenorita (CuO) el pH de equilibrio es aproximadamente 4.5. Sobre este pH empieza la precipitación de cobre y bajo el, el cobre permanece en la forma de catión en solución.

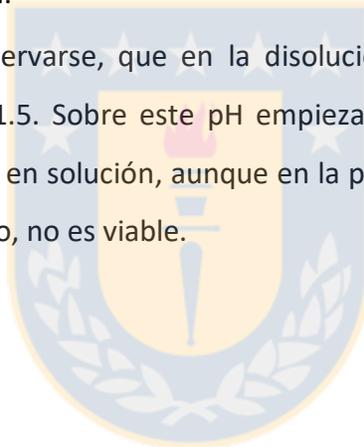
La hematita (Fe₂O₃) también será analizada iónicamente para observar en cuales condiciones los iones de fierro entran en solución.

La hematita es insoluble en agua y casi totalmente insoluble en ácido sulfúrico diluido⁽⁵⁾.



Esta energía libre negativa además de indicar que la reacción es espontanea, no dice nada más, por lo que solamente se sabe que termodinámicamente es posible, pero en la práctica su cinética es extremadamente lenta.

En la figura 2 puede observarse, que en la disolución de la hematita (Fe₂O₃) el pH de equilibrio es aproximadamente 1.5. Sobre este pH empieza la precipitación de fierro y bajo el, permanece en la forma de catión en solución, aunque en la práctica se llegara a ese pH su cinética es extremadamente lenta, por ello, no es viable.



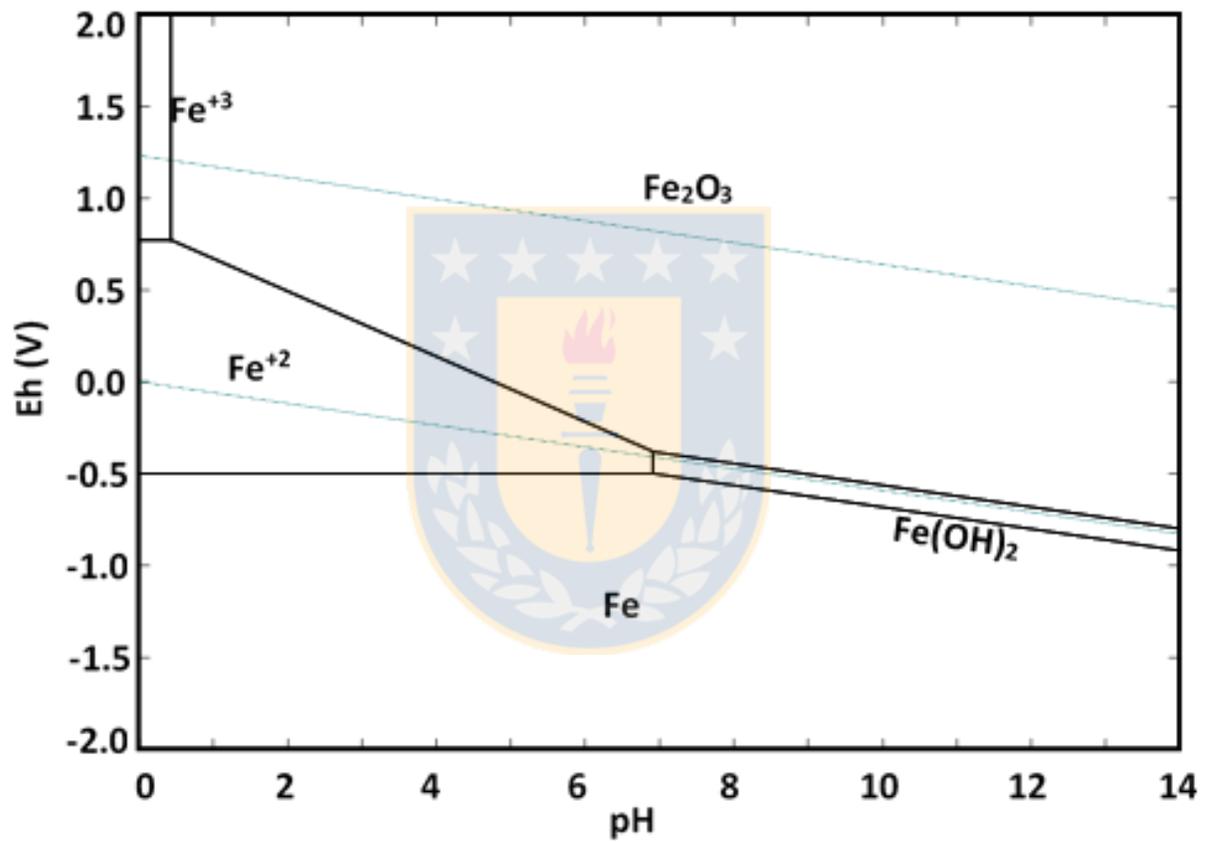


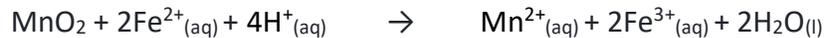
Fig. 2 Diagrama de tensión – pH para el sistema hierro – agua a 25 °C (0.13M de Fe)

El óxido mangánico (Mn_2O_3) y el óxido manganeso (MnO) también serán analizados iónicamente para observar en cuales condiciones los iones de manganeso entran en solución.

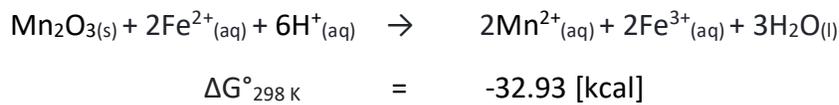
El óxido mangánico es insoluble en agua y necesita de un agente reductor para disolverse por completo en ácido sulfúrico diluido.



Empleando iones ferrosos como agente reductor



Resultando globalmente



El óxido manganeso es totalmente soluble en soluciones aciduladas



Como se observa en la figura 3 para el óxido mangánico se necesita de un agente reductor para pasar a solución ya que este óxido es una mezcla de MnO_2 y MnO y como se puede apreciar el óxido manganeso (MnO) pasa a solución solo en función del pH, donde el pH de equilibrio es aproximadamente 9.5 y sobre este pH empieza la precipitación de manganeso y bajo el, el manganeso permanece en la forma de catión en solución.

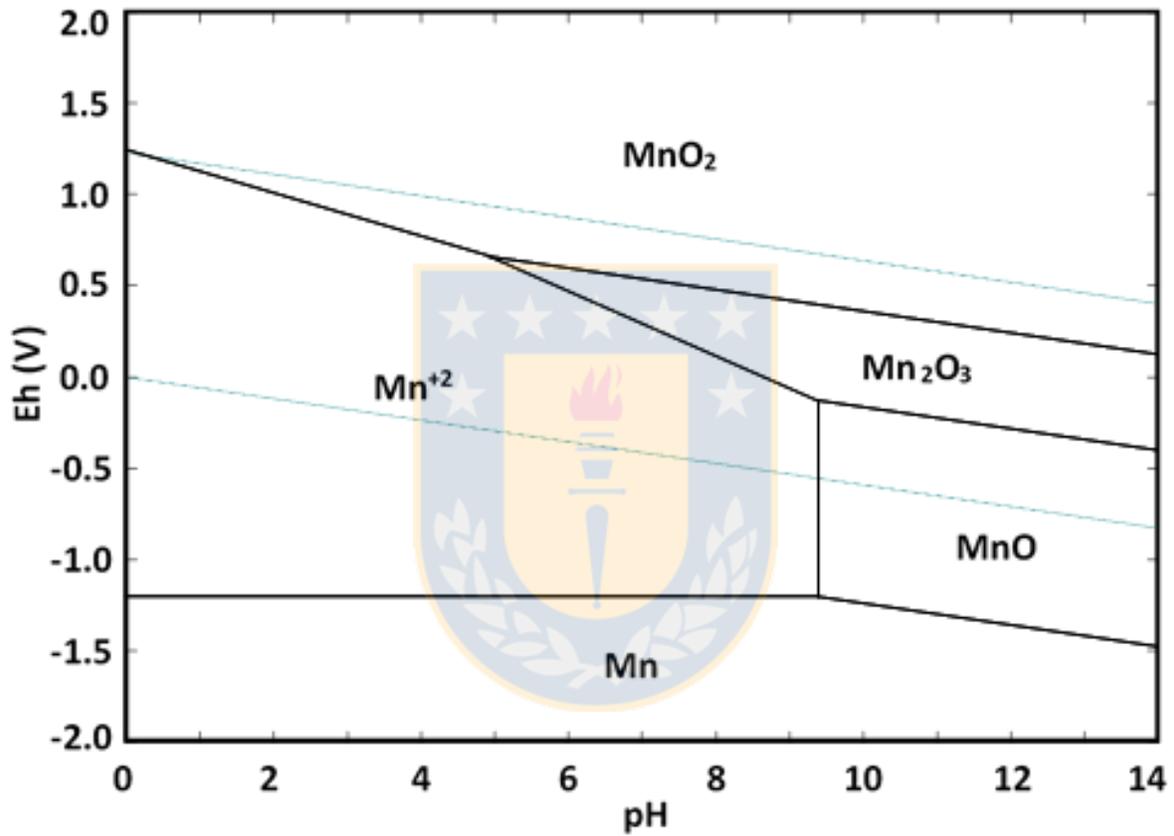


Fig. 3 Diagrama de tensión – pH para el sistema manganeso – agua a 25 °C (0.14 M de Mn)

2.2.2. Antecedentes sobre la lixiviación de los óxidos de Cu, Fe y Mn.

En la sección anterior se analizaron las reacciones que se producen en la descomposición térmica y oxidación de los reactivos principales. Los compuestos a estudiar su lixiviación son:

Tenorita	CuO
Hematita	Fe ₂ O ₃
Oxido mangánico	Mn ₂ O ₃
Oxido manganoso	MnO

Además de estos compuestos se estudiarán también los compuestos dobles y triple de cobre, fierro y manganeso.

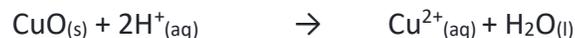
En la lixiviación de estos compuestos se verá su comportamiento en medio acuoso con exceso de ácido además de su respuesta a diferentes agentes lixiviantes en el mismo medio. El agente lixivante más comúnmente empleado es el ácido sulfúrico y las reacciones proceden definidas generalmente solo por el pH.

Las reacciones de disolución de los compuestos analizados pueden plantearse del siguiente modo:

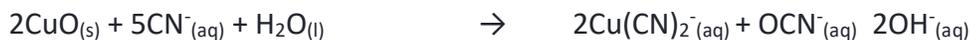
La tenorita (CuO), oxido cúprico, presenta insolubilidad en agua a 25°C, pero presenta lixivabilidad frente a soluciones aciduladas según la siguiente reacción ⁽²²⁾:



Esta reacción se ve favorecida con el aumento de la temperatura. En una investigación⁽⁴⁾ se ha encontrado que la disolución puede llegar a 99% al cabo de 14 minutos con una temperatura en el sistema de 25°C con una concentración de ácido sulfúrico mayor a 1 molar. El mismo autor plantea, que tal disolución se alcanzaría más rápido usando ácido clorhídrico o aumentando la temperatura. La reacción planteada a la forma iónica sería:



También la tenorita presenta solubilidad en soluciones cianuradas, en una investigación⁽²⁴⁾ al respecto se encontró la siguiente reacción en su forma iónica:



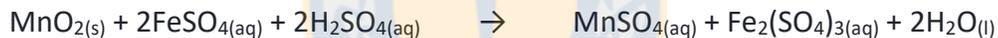
En esa misma investigación se encontró que la cinética de reacción es lenta comparada a la que se tiene en lixiviación acida estándar, llegando a una extracción de cobre del 75% aprox. a los 120 min. de prueba.

La hematita (Fe_2O_3) presenta insolubilidad frente al agua y es virtualmente insoluble en soluciones aciduladas y cianuradas⁽²⁵⁾. Para atacar la hematita es necesario un ácido más energético como el ácido clorhídrico (HCl)⁽⁵⁾.

El óxido mangánico (Mn_2O_3) es virtualmente insoluble en agua a temperatura ambiente, a una temperatura elevada tiene una cinética disolutiva decreciente al aumentar la concentración de ácido sulfúrico (de 0.1 a 2.7 M) observando un máximo de 50 % de disolución⁽⁶⁾. Según el mismo autor para una concentración menor a 2.7 M de ácido sulfúrico y a una temperatura elevada (80 °C) la disolución incompleta observada puede representarse de la siguiente manera:



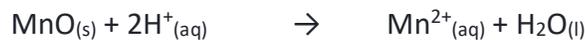
Según otra investigación⁽⁸⁾ este proceso se puede mejorar agregando un agente reductor al sistema, tal como el Fe^{2+} y su reacción con el MnO_2 generado se representaría de la siguiente manera:



Y la ecuación global que reinaría esta disolución en su forma iónica sería la siguiente:

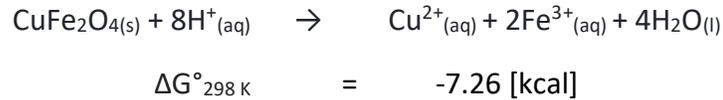


El Óxido manganeso (MnO) es prácticamente insoluble en agua. Se disuelve fácilmente en la mayoría de los ácidos⁽⁷⁾ y su disolución iónica se representa según la siguiente ecuación:



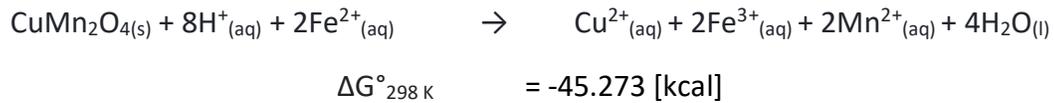
2.2.3. Reacciones de lixiviación de los compuestos mixtos y triples.

El compuesto doble de cobre y hierro llamada ferrita cúprica (CuFe_2O_4) según una investigación⁽¹⁶⁾ presenta insolubilidad al momento de contactarla con soluciones acidas a temperatura ambiente, es decir a condiciones normales de lixiviación tiene un comportamiento refractario. Sin embargo, en la misma investigación se muestra que al aumentar la temperatura y la concentración de ácido como también cambiar el ácido empleado como al HCl es posible aumentar la disolución de la ferrita cúprica dejando en solución sus respectivos iones. La reacción iónica para su disolución completa sería:



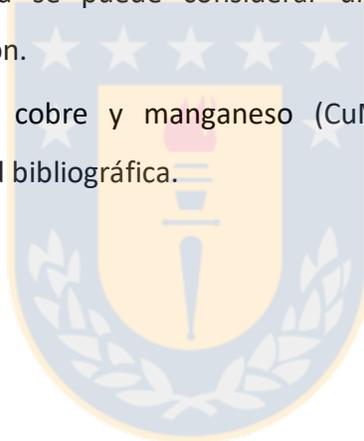
En el caso de la manganita de cobre (CuMn_2O_4), la reacción de lixiviación para esta especie requiere de un medio ácido, pero además se necesita de un agente reductor para dejar sus componentes disueltos.

En este caso la especie reductora será el ferroso y la reacción de lixiviación puede ser escrita como:



La especie reductora es fundamental en la lixiviación de la manganita de cobre ya que, en la ausencia de esta, la manganita se puede considerar una especie altamente insoluble en condiciones normales de lixiviación.

Finalmente, para la ferrita de cobre y manganeso ($\text{CuMnFe}_2\text{O}_5$) no se tiene información termodinámica de su lixivabilidad bibliográfica.



3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. SINTETIZACION DE LOS OXIDOS

3.1.1. Procedimiento y condiciones experimentales

3.1.1.1. Obtención de óxidos de cada metal

La formación de los óxidos se realizó trabajando en condiciones predeterminadas en una mufla exceptuando el óxido manganeso (MnO) que fue comprado (Pro-análisis MERCK). Las condiciones de síntesis para cada uno de los compuestos fueron las siguientes:

a) Tenorita (CuO)

Reactivo cargado	: CuSO ₄ en forma de polvo.
Temperatura	: 850 °C
Tiempo	: 2 horas
Atmosfera	: Estándar
CuSO ₄	: grado técnico.

b) Hematita (Fe₂O₃)

Reactivo cargado	: FeSO ₄ en forma de polvo.
Temperatura	: 950 °C
Tiempo	: 2 horas
Atmosfera	: Estándar
FeSO ₄	: grado técnico.

c) Oxido mangánico (Mn₂O₃)

Reactivo cargado	: Mn _(s) en forma de polvo.
Temperatura	: 700 °C
Tiempo	: 24 horas
Atmosfera	: Estándar
Mn _(s)	: grado técnico.

Se prepararon las mezclas, primero masando cada reactivo. Mientras lo anterior estaba ocurriendo se dejaría precalentando la mufla a la temperatura deseada, para realizar la descomposición térmica u oxidación deseada, al estabilizar la temperatura de la mufla, se procedió

a introducir el contenedor que llevaba los reactivos y cerrar lo más rápido posible la mufla para que no varié demasiado la temperatura y así dejarlo el tiempo de reacción propuesto para la experiencia. Finalmente terminado el tiempo de reacción se procedía a sacar la muestra del horno dejándola enfriar para poder masar nuevamente el producto obtenido y así poder saber por diferencia de masa aproximadamente que fue lo que se formó, luego pasa por una molienda (bajo las 100 mallas) para llevarla a difracción de rayos-X y seguir con las pruebas de lixiviación.

3.1.1.2. Síntesis de óxidos mixtos

Aproximaciones de los compuestos que se producen en la naturaleza, fueron sintetizados, para el estudio de su lixiviación. La formación de los compuestos se realizó trabajando en condiciones predeterminadas a partir del análisis termodinámico. Las condiciones de síntesis para cada uno de los compuestos fueron las siguientes:

a) Ferrita cúprica (CuFe_2O_4)

Reactivo cargado	: CuO y Fe_2O_3 en forma de briquetas en razones molares de CuO/ Fe_2O_3 de 1/1, 2/1, 1/2.
Temperatura	: 900 °C
Tiempo	: 48 horas
Atmosfera	: 300 cc/min aire

CuO: sintetizado por descomposición térmica de CuSO_4 .

Fe_2O_3 : sintetizado por descomposición térmica de FeSO_4 .

b) Manganita de cobre (CuMn_2O_4)

Reactivo cargado	: CuO y Mn_2O_3 en forma de briquetas en razones molares de CuO/ Mn_2O_3 de 1/1, 2/1, 1/2.
Temperatura	: 750 °C
Tiempo	: 48 horas
Atmosfera	: 300 cc/min aire

CuO: sintetizado por descomposición térmica de CuSO_4 .

Mn_2O_3 : sintetizado por oxidación de Mn metálico.

c) Ferrita de cobre y manganeso (CuMnFe₂O₅)

Reactivo cargado : CuO, MnO y Fe₂O₃ en forma de briquetas en razones molares de CuO/Fe₂O₃/MnO de 1/1/1.

Temperatura : 900 °C

Tiempo : 48 horas

Atmosfera : 506.8 cc/min N_{2(g)}

CuO: sintetizado por descomposición térmica de CuSO₄.

MnO: Pro-análisis MERCK.

Fe₂O₃: sintetizado por descomposición térmica de FeSO₄.

Se prepararon las mezclas, primero masando cada reactivo en sus respectivas razones molares, para luego ponerlas en un recipiente donde se agitarían hasta que se obtuviera una mezcla homogénea y así poder poner dicha mezcla en un molde metálico, hecho a medida, en el cual se le aplicaría presión en una prensa para obtener briquetas que se cargarían al horno mediante una navcilla cerámica.

Mientras lo anterior estaba ocurriendo se dejaría precalentando el horno a la temperatura deseada, para realizar la sintetización del compuesto mixto, al estabilizar la temperatura del horno como también la atmosfera deseada introduciéndose los gases necesarios, se procedió a introducir la navcilla que llevaba los compuestos y sellar lo más herméticamente posible el horno para así dejarlos el tiempo de reacción propuesto para la experiencia (48 horas). Finalmente terminado el tiempo de reacción se procedía a sacar la muestra del horno dejándola enfriar para su molienda (bajo las 100 mallas) y luego llevarla a difracción de rayos-X.

3.1.2. Equipo experimental

3.1.2.1. Prensa Hidráulica

Esta prensa se utilizó para la briquetización de la mezcla de óxidos (ver imágenes en anexo I).

3.1.2.2. Horno Horizontal tubular

Este horno horizontal eléctrico, se empleó para síntesis de compuestos (ver imágenes en anexo I).

3.1.2.3. Mufla

En este tipo de horno se empleó para descomposición térmica y oxidación de reactivos (ver imágenes en anexo I).



3.2. PRUEBAS DE LIXIVIACION

3.2.1. Procedimiento y condiciones experimentales

3.2.1.1. Lixiviación óxidos de cada metal

Los óxidos (CuO , Fe_2O_3 , Mn_2O_3 y MnO) se sometieron a diferentes pruebas lixiviantes, empleando diferentes medios: medio sulfúrico normal, medio lixiviación salina, medio ácido – reductor, medio ácido - oxidante.

Las pruebas de lixiviación se realizaron en las siguientes condiciones:

% solido = 1%

Peso solido = 2 gr.

Volumen liquido = 200 ml.

Agitación = 400 – 500 RPM

Tiempo = 120 min.

a) En medio sulfúrico normal. Las soluciones se prepararon con una acidez inicial de la solución de 60 gpl a dos diferentes temperaturas de lixiviación las cuales fueron ambiente (20 °C) y 60°C.

b) En medio lixiviación salina, medio ácido – reductor y medio ácido – oxidante a 60 °C.

La lixiviación en medio salino se realizó preparando la solución con una concentración de ácido de 60 gpl y una concentración de 60 gpl de Cl^- .

La lixiviación en medio ácido - reductor se realizó preparando la solución con una concentración de ácido de 60 gpl y una concentración de 20 gpl de Fe^{2+} .

Finalmente, la lixiviación en medio ácido - oxidante se realizó preparando la solución con una concentración de ácido de 60 gpl y una concentración de 20 gpl de Fe^{3+} .

Tanto como el cloruro de sodio, sulfato ferroso y sulfato férrico utilizados fueron de la marca MERCK de alto grado de pureza.

Las condiciones de estas pruebas fueron:

% solido	= 1%
Peso solido	= 2 gr.
Volumen solución	= 200 ml.
Agitación	= 400 – 500 RPM
Tiempo	= 120 min.
Temperatura	= 60 °C
Acidez y medio lixivante	= 60 gpl de H ₂ SO ₄
	19.8 gr. NaCl
	= 60 gpl de H ₂ SO ₄

19.9 gr. FeSO₄*7H₂O

= 60 gpl de H₂SO₄

14.3 gr. Fe₂(SO₄)₃

La lixiviación se llevó a cabo en un vaso precipitado con un agitador mecánico. Luego de terminada la lixiviación se filtró la pulpa en un matraz Kitasato con embudo Buchner y el residuo fue secado en una estufa. De la solución resultante aproximadamente 20 ml y la totalidad del residuo es enviado a análisis químico.

3.2.1.2. Lixiviación de los óxidos mixtos

Estos compuestos se sometieron a diferentes pruebas de lixiviación, empleando 5 diferentes medios: medio sulfúrico normal, medio lixiviación salina, medio ácido – reductor, medio ácido – oxidante y medio cianurante. Las pruebas de lixiviación se realizaron a dos temperaturas (20 y 60 °C).

Las condiciones de lixiviación son las mismas para cada uno de estos compuestos, ya que el objetivo de estas lixivaciones fue el de encontrar la temperatura y el medio lixivante que mayor cantidad de compuesto era capaz de lixiviar.

Las pruebas de lixiviación se llevaron a efecto generalmente con 1 % en solido por las pequeñas cantidades que puedan sintetizarse en una experiencia en el horno horizontal.

a) En medio sulfúrico normal. La lixiviación en solución solo con ácido a 20 °C y 60 °C. Las condiciones fueron:

% solido = 1 %

Masa de solido = 2 g

Volumen de solución = 200 ml.

Temperatura = 20 °C, 60 °C

Agitación = 500-800 RPM

Acidez = 60 gpl

Tiempo = 120 min.

b) En medio lixiviación salina, medio ácido – reductor, medio ácido – oxidante y medio cianurante.

La lixiviación en medio salino se realizó preparando la solución con una concentración de ácido de 60 gpl y una concentración de 60 gpl de Cl⁻.

La lixiviación en medio ácido - reductor se realizó preparando la solución con una concentración de ácido de 60 gpl y una concentración de 20 gpl de Fe²⁺.

La lixiviación en medio ácido - oxidante se realizó preparando la solución con una concentración de ácido de 60 gpl y una concentración de 20 gpl de Fe³⁺.

Finalmente, la lixiviación en medio cianurante se realizó preparando la solución con una concentración de 5 gpl de [KCN] y a un pH de 11.

Tanto como el cloruro de sodio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cianuro de potasio utilizados fueron de la marca MERCK de alto grado de pureza.

Las condiciones de estas pruebas fueron:

% solido = 1%
 Peso solido = 2 gr.
 Volumen solución = 200 ml.
 Agitación = 700 – 800 RPM
 Tiempo = 120 min.
 Temperatura = 20 °C, 60 °C
 Acidez y agente lixivante = 60 gpl de H₂SO₄
 19.8 gr. NaCl
 = 60 gpl de H₂SO₄

19.9 gr. FeSO₄*7H₂O
 = 60 gpl de H₂SO₄
 14.3 gr. Fe₂(SO₄)₃
 = pH 11
 1 gr. KCN

La lixiviación se llevó a cabo en un vaso precipitado con un agitador mecánico además de un pH-metro para la prueba con cianuro potásico. Mediante la lixiviación continuaba a los 10, 30, 60, 90 y 120 min se iban tomando muestras de 10 ml las cuales se tomaban parando la prueba y esperando la decantación de la solución (5 min de pausa aprox.) Luego de terminada la lixiviación se filtró la pulpa en un matraz Kitasato con embudo Buchner y el residuo fue secado en una estufa. De la solución resultante aproximadamente 20 ml y la totalidad del residuo es enviado a análisis químico.

3.3.1. Equipo experimental

3.3.1.1. Vaso de reacción con filtración al vacío

Equipo utilizado como reactor en donde ocurre la lixiviación y su posterior filtración con el equipo de filtrado al vacío (ver imágenes en anexo I).

3.3.1.2. pH – Metro

Equipo para medir continuamente el pH en la lixiviación (ver imágenes en anexo I).

3.3.1.3. Sistema de agitación mecánico

Equipo para mantener la solución en agitación controlada (ver imágenes en anexo I).



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. RESULTADOS DE LA SINTESIS DE CADA METAL

Los óxidos de cada metal utilizados posteriormente para la sintetización de los óxidos mixtos se obtuvieron a partir de la descomposición térmica de sulfatos en el caso del Cu y Fe y a partir de la oxidación del metal ($Mn_{(s)}$) para el Mn_2O_3 como se indicó en el punto 3.1.1.1. Se comprobó mediante análisis químico y o DRX la formación de estos óxidos (Para ver detalles ir a anexo H).

4.2. RESULTADOS DE LA SINTESIS DE OXIDOS MIXTOS

4.2.1. Síntesis de Ferrita Cúprica ($CuFe_2O_4$)

Los compuestos empleados son óxido cúprico o tenorita (CuO) y óxido férrico o hematita (Fe_2O_3) en dos proporciones además del estequiométrico. La mezcla íntima y la briquetización de estos compuestos permiten en las condiciones descritas a continuación, la ocurrencia de las siguientes reacciones:



El producto obtenido fueron briquetas de color gris claro de considerable dureza. El polvo, producto de una molienda bajo las 100 mallas, fue enviada a difracción de rayos X.

La DR-X confirmó la formación de la ferrita cúprica, detectando otros compuestos adicionales ya sean de descomposición y o formación. Como se ven en la Tabla 3.

En anexos D-3 se encuentran los difractogramas respectivos.

Tabla 3: Difracción de rayos-X, para la ferrita cúprica con reactivos en distintas razones molares CuO/Fe_2O_3 .

Mineralogía cualitativa						
Muestra	Razon CuO/Fe_2O_3	Amorfo	CuO	Fe_2O_3	Fe_3O_4	$CuFe_2O_4$
Y1	1/1	si	*	*	-	***
Y5	2/1	si	*	-	*	***
Y6	1/2	si	-	*	*	***

Donde * = Fase poco abundante, ** = Fase abundante, *** = Fase muy abundante.

Eligiendo la razón 1/1 para seguir con las pruebas de lixiviación, por tener la fase de ferrita cúprica más abundante.

4.2.2. Síntesis de la manganita de cobre (CuMn₂O₄)

Los compuestos empleados son óxido cúprico o tenorita (CuO) y óxido de manganeso (III) (Mn₂O₃) en dos proporciones además del estequiométrico. La mezcla íntima y la briquetización de estos compuestos permiten en las condiciones descritas a continuación, la ocurrencia de las siguientes reacciones:



El producto obtenido fueron briquetas de color café oscuro de baja dureza. El polvo, producto de una molienda bajo las 100 mallas, fue enviada a difracción de rayos X.

La DR-X confirmó la formación de CuMn₂O₄, detectando otros compuestos adicionales de formación. Como se ven en la Tabla 4.

En anexos D-3 se encuentran los difractogramas respectivos.

Tabla 4: Difracción de rayos-X, para CuMn₂O₄ con reactivos en distintas razones molares CuO/Mn₂O₃.

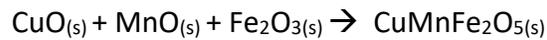
Mineralogía cualitativa					
Muestra	Razon CuO/Mn2O3	Amorfo	CuO	Mn2O3	CuMn2O4
Y3	1/1	si	*	***	**
Y7	2/1	si	**	**	***
Y8	1/2	si	-	***	*

Donde * = Fase poco abundante, ** = Fase abundante, *** = Fase muy abundante.

Eligiendo la razón 2/1 para seguir con las pruebas de lixiviación, por tener la fase de manganita de cobre más abundante.

4.2.3. Síntesis de la ferrita de cobre y manganeso (CuMnFe₂O₅)

Los compuestos empleados son óxido cúprico o tenorita (CuO), óxido de manganeso (II) (MnO) y óxido férrico (Fe₂O₃) en proporciones estequiométricas. La mezcla íntima y la briquetización de estos compuestos permiten en las condiciones descritas a continuación, la ocurrencia de las siguientes reacciones:



El producto obtenido fueron unas briquetas de color gris de mediana dureza. El polvo, producto de una molienda bajo las 100 mallas, fue enviada a análisis químico.

El análisis químico confirmó la formación de ferrita de cobre y manganeso a través de la diferencia de masa y los porcentajes de los elementos constituyentes. Como se ven en la Tabla 5.

Tabla 5: Análisis químico, para la ferrita de cobre y manganeso (CuMnFe₂O₅) con reactivos en razón molar CuO/MnO/Fe₂O₃ estequiométrica.

Teórico			Análisis químico		
Cobre (%)	Hierro (%)	Manganeso (%)	Cobre (%)	Hierro (%)	Manganeso (%)
20,49	36,01	17,71	18,74	34,27	15,86

4.3. LIXIVIABILIDAD DE COMPUESTOS PUROS

En esta sección se analizarán las respuestas de cuatro compuestos puros de cobre, fierro y manganeso a diferentes medios lixiviantes.

4.3.1. Lixiviación de óxido cúprico o tenorita (CuO)

Todas las soluciones se prepararon con una acidez inicial de 60 gpl lo que representa un exceso de 387% sobre el estequiométrico.

a) En medio sulfúrico normal a dos diferentes temperaturas de lixiviación las cuales fueron ambiente (20 °C) y 60°C.

La Fig. 4 representa la extracción de cobre a partir de tenorita (CuO) a dos temperaturas para una misma acidez inicial, se puede observar que la disolución del óxido cúprico a los 120 minutos a temperatura ambiente alcanzó una extracción de cobre de 91.5% y para la temperatura de 60 °C se pudo observar una extracción un poco superior de 96.2% debido a condiciones más favorables desde el punto de vista cinético. Con los datos anteriormente observados se evidencia que el sólido tratado puede considerarse como fácilmente soluble en contacto con ácido al igual que en la literatura⁽⁴⁾, alcanzando valores de extracción superior al 90% en 120 min. de lixiviación.

b) En medio lixiviación salina, medio ácido – reductor y medio ácido – oxidante a 60 °C. Se utilizaron estos medios para verificar el comportamiento de los óxidos de cada metal con las soluciones de lixiviación que posteriormente se iban a utilizar en la lixiviación de los óxidos mixtos.

En la Fig. 5 están representadas las extracciones de cobre a partir de tenorita (CuO) en presencia de diferentes agentes lixiviantes. Se observa para el caso de la lixiviación en medio salino la extracción de cobre es de aproximadamente 98.2% la cual ha tenido un leve aumento a la extracción vista en la lixiviación solo con ácido a la misma temperatura (96.2%). En el medio ácido - reductor también se observa un pequeño aumento en la extracción quedando está en 98.6% muy cercano a lo observado en la prueba anterior y finalmente se puede apreciar que estando en medio ácido - oxidante se obtiene un resultado muy parecido alcanzando una extracción del 97.3%, por ende, se llega a la conclusión que la tenorita no se ve influenciada por los diferentes medios lixiviantes, siendo la disolución de esta virtualmente similar en todos ellos, donde predomina la temperatura como variable fundamental (observada experimentalmente).

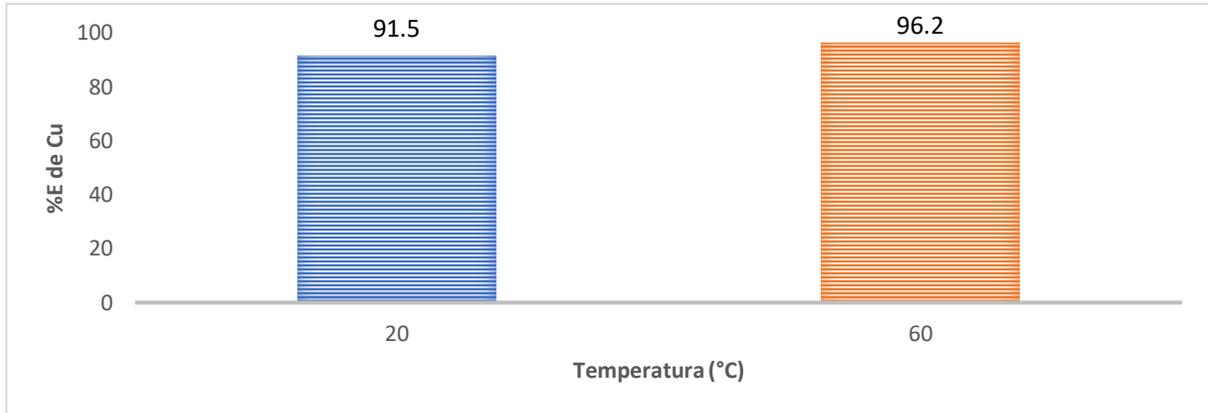


Fig. 4 Lixiviación de tenorita en medio sulfúrico normal (387% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

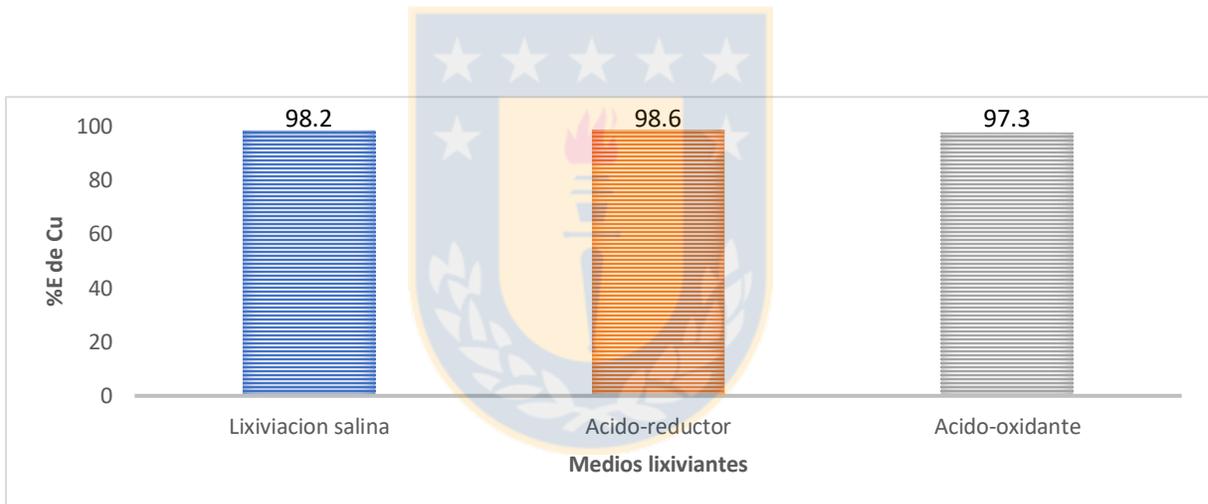


Fig. 5 Lixiviación de tenorita en diferentes medios lixiviantes (60 gpl de Cl^- , 20 gpl de Fe^{2+} y 20 gpl de Fe^{3+} respectivamente; $T= 60\text{ }^\circ\text{C}$)

4.3.2. Lixiviación de trióxido de hierro o hematita (Fe_2O_3)

Todas las soluciones se prepararon con una acidez inicial de 60 gpl lo que representa un exceso de 226% sobre el estequiométrico.

a) En medio sulfúrico normal a dos diferentes temperaturas de lixiviación las cuales fueron ambiente (20 °C) y 60°C.

La figura 6 representa la disolución de hierro a partir de hematita (Fe_2O_3) a dos temperaturas para una misma acidez inicial, se puede observar que la disolución del trióxido de hierro a los 120 minutos a temperatura ambiente alcanzó un valor despreciable de 0.5% y para la temperatura de 60 °C se pudo observar un valor similar de 3%. Con los datos anteriormente observados se concluye que aun aumentando la temperatura la disolución resultante de hierro es muy baja por ende reafirma que la reacción permanece desplazada hacia los reactivos, y que a esta temperatura y concentración de ácido aún no hay gran aporte de hierro a la solución, lo que está de acuerdo con la información encontrada en la literatura⁽⁵⁾.

b) En medio lixiviación salina, medio ácido – reductor y medio ácido – oxidante a 60 °C. Se utilizaron estos medios para verificar el comportamiento de los óxidos de cada metal con las soluciones de lixiviación que posteriormente se iban a utilizar en la lixiviación de los óxidos mixtos.

En la figura 7 están representadas las disoluciones de hierro a partir de hematita (Fe_2O_3) en diferentes medios lixiviantes. Se observa para el caso de la lixiviación en medio salino que la disolución de 5.5% ha sido levemente mayor a la disolución vista en la lixiviación sulfúrica normal a la misma temperatura (3%) esto puede ser por la capacidad complejante que tiene el ion cloruro sobre el hierro. En medio ácido - reductor se observa una disminución en la disolución quedando está en 0% al igual que con el medio ácido - oxidante, pero finalmente se llega a la conclusión de que en ninguno de los medios evaluados la hematita presenta una disolución significativa.

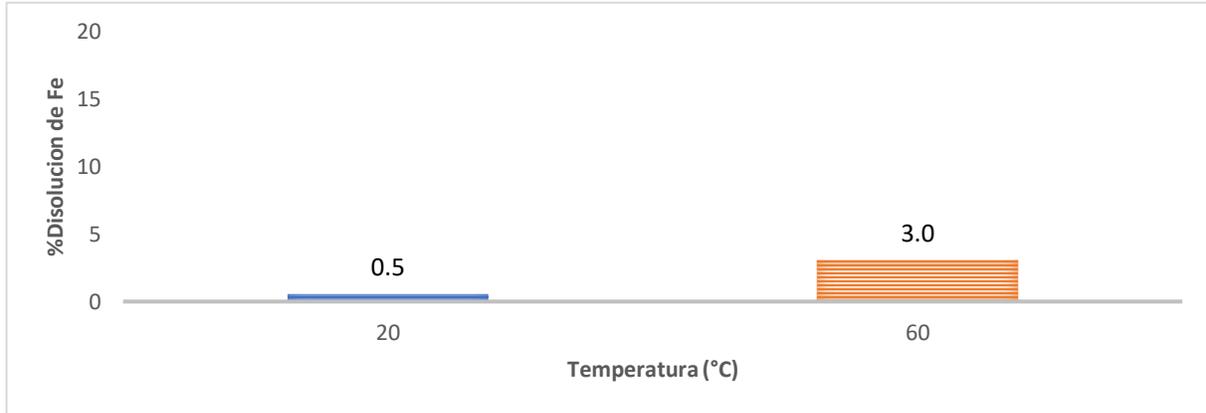


Fig. 6 Lixiviación de hematita en medio sulfúrico normal (226% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

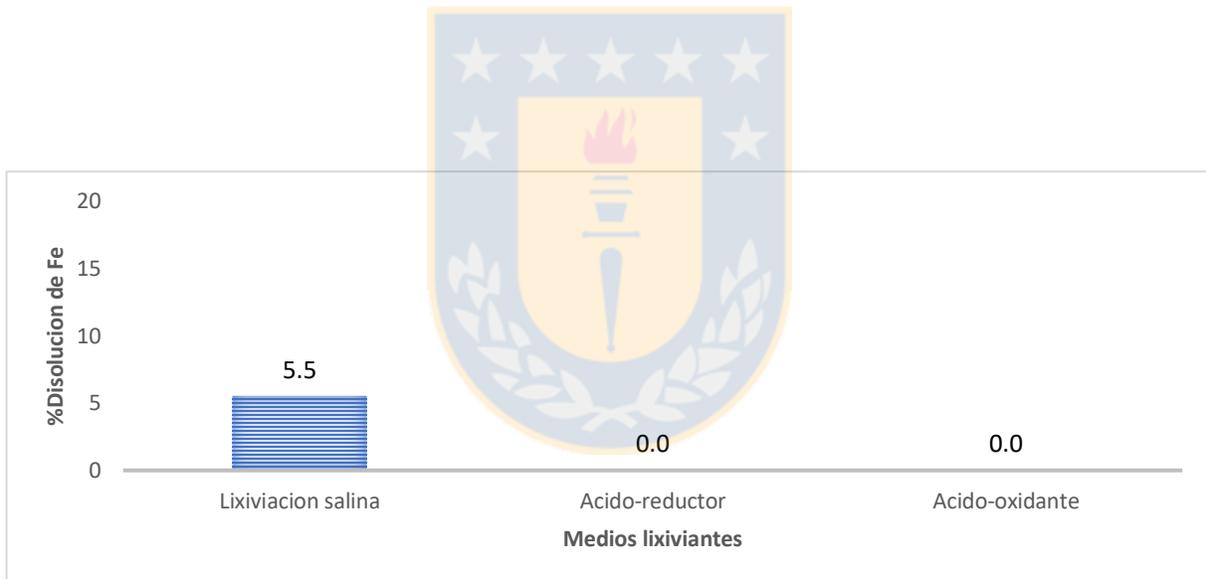


Fig. 7 Lixiviación de hematita en diferentes medios lixiviantes (60 gpl de Cl^- , 20 gpl de Fe^{2+} y 20 gpl de Fe^{3+} respectivamente; $T= 60\text{ }^\circ\text{C}$)

4.3.3. Lixiviación de Oxido mangánico (Mn₂O₃)

Todas las soluciones se prepararon con una acidez inicial de 60 gpl lo que representa un exceso de 222% sobre el estequiométrico.

a) En medio sulfúrico normal a dos diferentes temperaturas de lixiviación las cuales fueron ambiente (20 °C) y 60°C.

La figura 8 representa la disolución de manganeso a partir de óxido mangánico (Mn₂O₃) a dos temperaturas para una misma acidez inicial. Se puede observar que a los 120 minutos a temperatura ambiente se alcanzó una disolución despreciable de manganeso del 1.24% y para la temperatura de 60 °C se pudo observar una disolución de 18.6%. Con los datos anteriormente observados se concluye que aún aumentando la temperatura la disolución resultante de manganeso es muy baja, lo que está de acuerdo con la información encontrada en la literatura⁽⁷⁾ y, por ende, reafirma lo que se teorificaba en la secc. 2.2.1 que la reacción de lixiviación dominante de óxido mangánico con ácido sulfúrico es como sigue:



Dado esto se necesita de un agente extra para poder completar la disolución del óxido mangánico y es lo que se verá a continuación.

b) En medio lixiviación salina, medio acido – reductor y medio acido – oxidante a 60 °C. Se utilizaron estos medios para verificar el comportamiento de los óxidos de cada metal con las soluciones de lixiviación que posteriormente se iban a utilizar en la lixiviación de los óxidos mixtos.

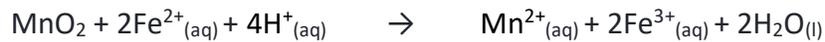
En la figura 9 están representadas las disoluciones de manganeso a partir de óxido mangánico (Mn₂O₃) en diferentes medios lixiviantes. Se observa para el caso de la lixiviación en medio salino que su disolución de manganeso es 41.3%, la cual es más del doble que la extracción vista en la lixiviación solo con ácido a la misma temperatura (18.6%) esto debido a la capacidad acomplejante que tiene el ion cloruro sobre él manganeso aumentando la cinética de la disolución del óxido, pero aun así se generaría el dióxido de manganeso el cual para disolverlo se necesitaría un agente reductor, esto se puede ver en la siguiente ecuación:



En medio ácido - reductor se observa un gran aumento en la disolución de manganeso, llevándola desde un 18.6% hasta un 86.9% a la misma temperatura, debido a la acción reductora del ferroso, logrando solubilizar el dióxido de manganeso generado con lo cual se demuestra que la reacción es altamente favorable desde el punto de vista termodinámico y cinético, mostrando la siguiente reacción ya vista en la sección 2.1.1.:



Empleando iones ferrosos como agente reductor



Resultando globalmente



En medio ácido - oxidante, se puede apreciar que la disolución de manganeso disminuye llegando a 2.6%, esto comparándolo con la disolución de manganeso (18.6%) tratado solo con ácido a la misma temperatura, siendo solo superior a la disolución de 1.5% obtenida en la lixiviación de óxido mangánico solo con ácido a temperatura ambiente. En conclusión, al tener un medio ácido - oxidante no favorece la disolución del compuesto, esto pasa por lo visto en su diagrama tensión - pH el cual indica que al aumentar el potencial se incrementa la estabilidad del compuesto sólido impidiendo que este pase a solución como el ion Mn^{2+} .

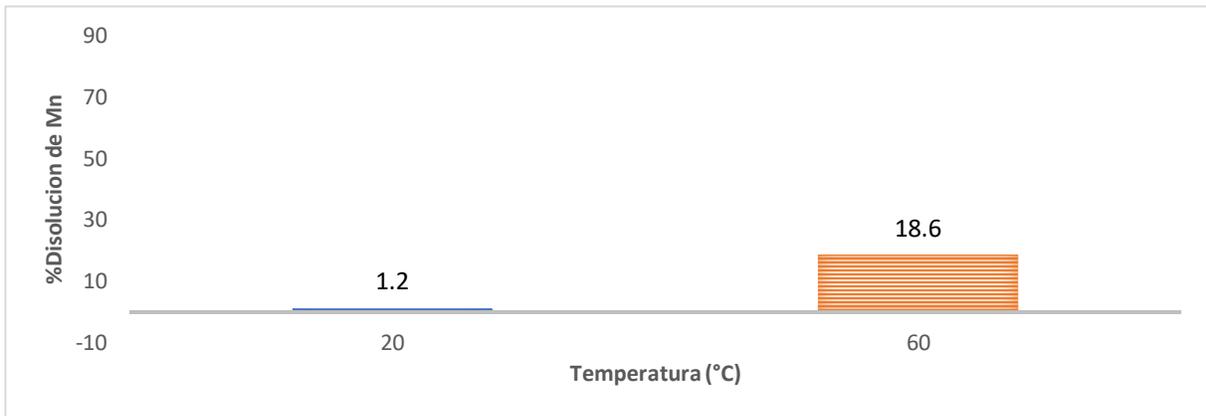


Fig. 8 Lixiviación de óxido mangánico en medio sulfúrico normal (222% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

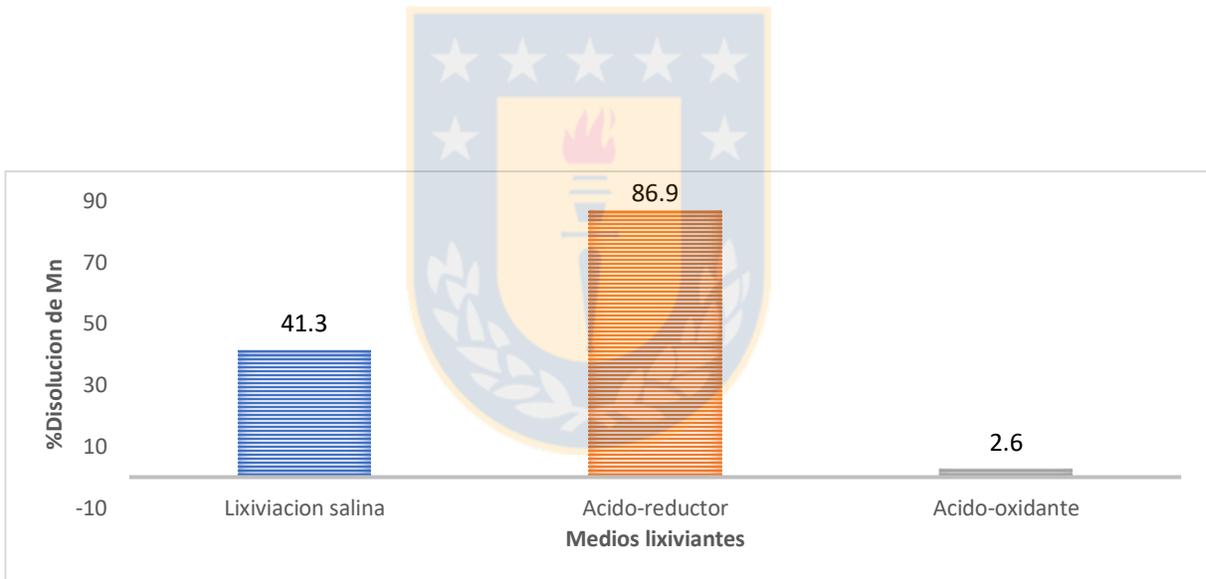


Fig. 9 Lixiviación de óxido mangánico en diferentes medios lixiviantes (60 gpl de Cl^- , 20 gpl de Fe^{2+} y 20 gpl de Fe^{3+} respectivamente; $T= 60\text{ }^\circ\text{C}$)

4.3.4. Lixiviación de óxido manganeso (MnO)

Todas las soluciones se prepararon con una acidez inicial de 60 gpl lo que representa un exceso de 334% sobre el estequiométrico.

a) En medio sulfúrico normal a dos diferentes temperaturas de lixiviación las cuales fueron ambiente (20 °C) y 60°C.

La figura 10 representa la disolución de manganeso a partir de óxido manganeso (MnO) a dos temperaturas para una misma acidez inicial. Se puede observar que la disolución de manganeso a los 120 minutos a temperatura ambiente alcanzó un 94.9% lo que refleja su alta solubilidad con valores similares a los 60 °C en soluciones aciduladas, lo que está de acuerdo con la información encontrada en la literatura⁽⁶⁾.

b) En medio lixiviación salina, medio ácido – reductor y medio ácido – oxidante a 60 °C. Se utilizaron estos medios para verificar el comportamiento de los óxidos de cada metal con las soluciones de lixiviación que posteriormente se iban a utilizar en la lixiviación de los óxidos mixtos.

En la figura 11 se representa el comportamiento del óxido manganeso (MnO) en diferentes medios lixiviantes. Se observa para el caso de la lixiviación en medio salino que la disolución de manganeso es de 84.2%, la cual se ve disminuida comparándola con la disolución obtenida (94.2%) al tratarse solo con ácido, a la misma temperatura.

En medio ácido – reductor, se observa una disminución de disolución un poco mayor que la vista anteriormente llevándola desde un 84.2% (extracción con iones cloruro) hasta un 80.3%.

En medio ácido - oxidante, se puede apreciar que la disolución de manganeso sufre un pequeño aumento llegando a 87.5%, esto comparándolo con la disolución de manganeso (84.2%) desde el óxido manganeso en medio salino, pero aún, más baja que la extracción de manganeso obtenido en medio sulfúrico normal. Resumiendo, no se ve efecto positivo en disolución de manganeso en lixiviación salina, ni tampoco en medio ácido – reductor/oxidante.

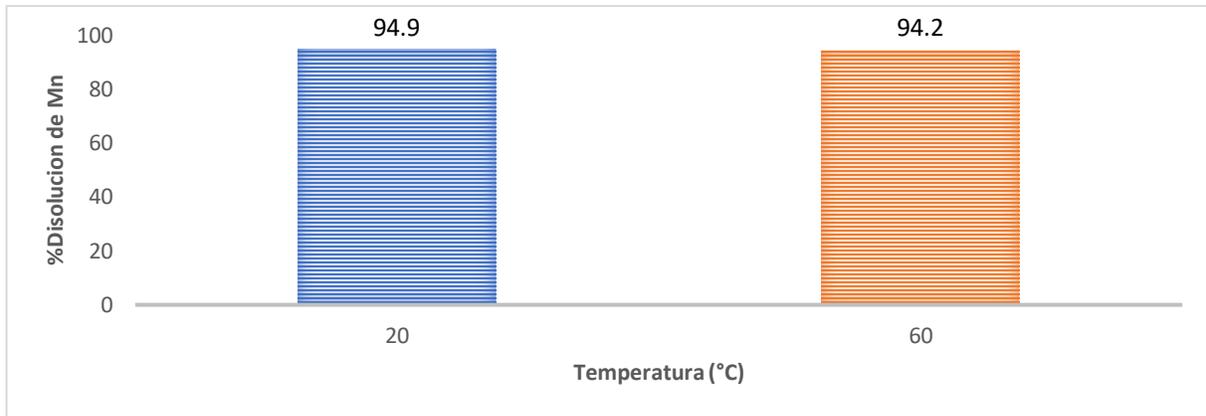


Fig. 10 Lixiviación de óxido manganeso en medio sulfúrico normal (334% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

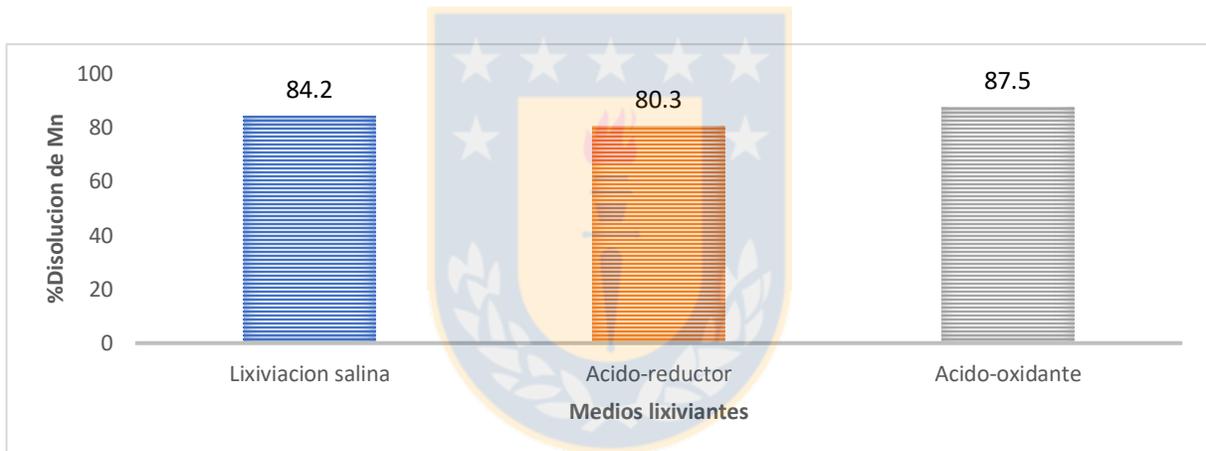


Fig. 11 Lixiviación de óxido manganeso en diferentes medios lixiviantes (60 gpl de Cl^- , 20 gpl de Fe^{2+} y 20 gpl de Fe^{3+} respectivamente; $T = 60\text{ }^\circ\text{C}$)

4.4. RESULTADOS DE PRUEBAS DE LIXIVIACION DE COMPUESTOS MIXTOS

Las condiciones de lixiviación son las misma para cada uno de estos compuestos, ya que el objetivo de estas lixiviaciones fue el de encontrar la temperatura y el medio lixivante que mayor cantidad de compuesto era capaz de lixiviar. Además, siempre se trató de obtener esos resultados en las condiciones normales, que frecuentemente pueden presentarse durante la lixiviación industrial.

Las pruebas de lixiviación se llevaron a efecto a dos temperaturas (20 y 60 °C) y con 1 % en sólido, por las pequeñas cantidades que puedan sintetizarse en una experiencia en el horno horizontal.

Los medios lixiviantes fueron 5 : medio sulfúrico normal, medio lixiviación salina, medio acido – reductor, medio acido – oxidante y medio cianurante.

4.4.1. Lixiviación de ferrita cúprica (CuFe_2O_4)

a) En medio sulfúrico normal (con un exceso de ácido del 266% sobre el estequiométrico).

Como se observa en la Fig. 12, la disolución de hierro para la ferrita cúprica a 20°C es casi indetectable y extracción de cobre es muy baja, por otra parte, se puede ver que la solubilidad de la ferrita incrementa al verse expuesta a los 60 °C, también observándose una disolución preferencial del cobre con respecto al hierro.

Se puede resumir que para los 20 °C la ferrita cúprica es altamente insoluble, sufriendo una leve disolución a los 60 °C, alcanzándose una extracción de cobre del 20.9% y una disolución de hierro del 9%. Estos resultados fueron muy parecidos a los encontrados en una investigación⁽¹⁶⁾ del mismo tema, dando seguridad del método empleado.

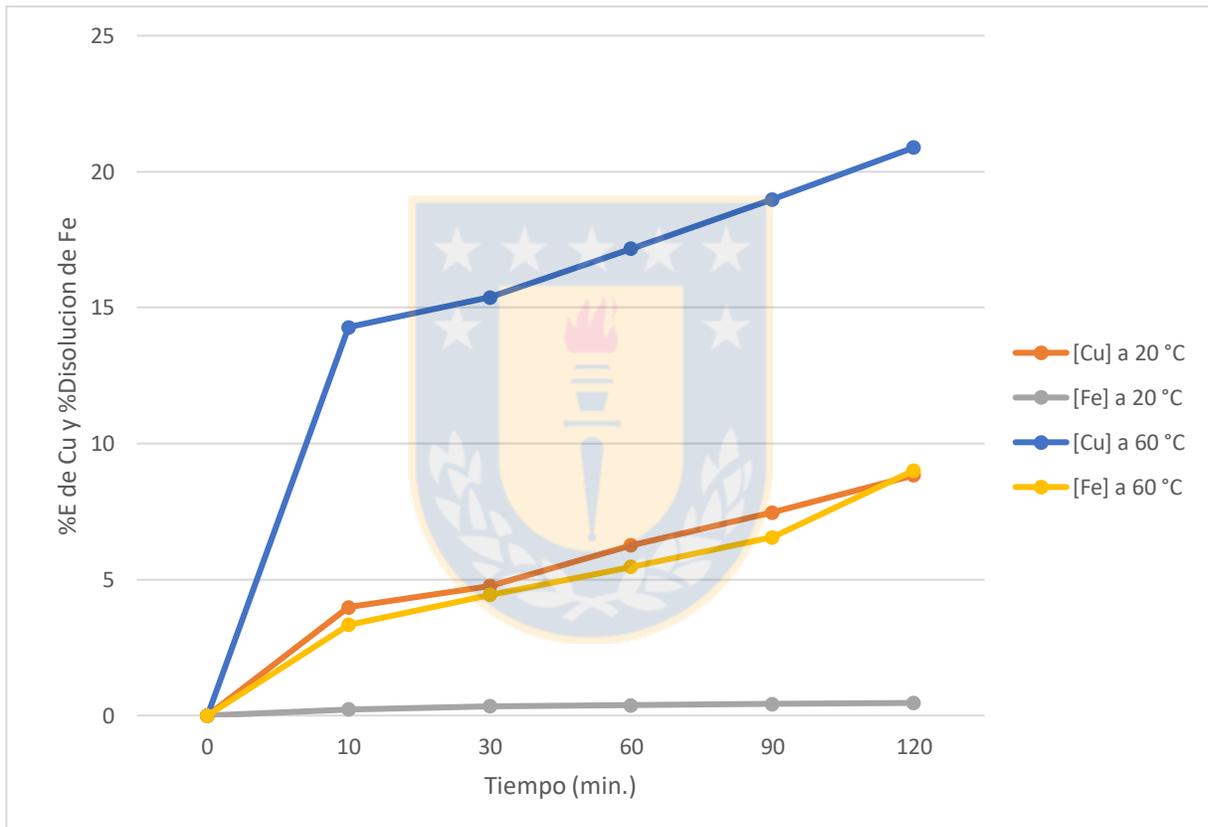


Fig. 12 Lixiviación de ferrita cúprica en medio sulfúrico normal (266% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

b) En medio lixiviación salina, medio ácido – reductor, medio ácido – oxidante y medio cianurante. En medio salino, ácido - reductor y ácido - oxidante se ocupó una acidez inicial de 60 gpl lo que es un exceso de ácido del 266% sobre el estequiométrico.

En la figura 13 están representadas las extracciones de cobre y disoluciones de fierro a partir de ferrita cúprica (CuFe_2O_4) a 20 °C en diferentes medios lixiviantes. En medio salino se observa que la extracción de cobre a los 120 min es de 9.6% aprox. y la disolución de fierro al mismo tiempo es muy baja para ser considerada a análisis, por ende, estas son aproximadamente iguales a las obtenidas en medio sulfúrico normal (aprox. 8.8% para el cobre y el fierro no siendo significativo). En medio ácido - reductor se observa un comportamiento aproximadamente igual en la extracción de cobre que las vista con anterioridad a esta temperatura (9% de extracción aprox.). En medio ácido – oxidante se observa el mismo comportamiento en la curva de extracción de cobre alcanzando aproximadamente un 8.4% siendo prácticamente igual que la extracción en medio ácido - reductor (9% de extracción) al mismo tiempo y temperatura. Finalmente, en medio cianurante se observa una extracción aproximada de cobre del 3% a los 120 min. y una disolución virtualmente nula para el fierro al mismo tiempo, siendo la de peor resultados de los cuatro medios vistos a temperatura ambiente (20 °C).

Repitiendo las condiciones anteriormente descritas la figura 14 ilustra un segundo set de experiencias realizadas nuevamente en los 4 medios lixiviantes considerados anteriormente, pero para una nueva temperatura de 60 °C.



Fig. 13 Lixiviación de ferrita cúprica en diferentes medios lixiviantes (T= 20 °C)

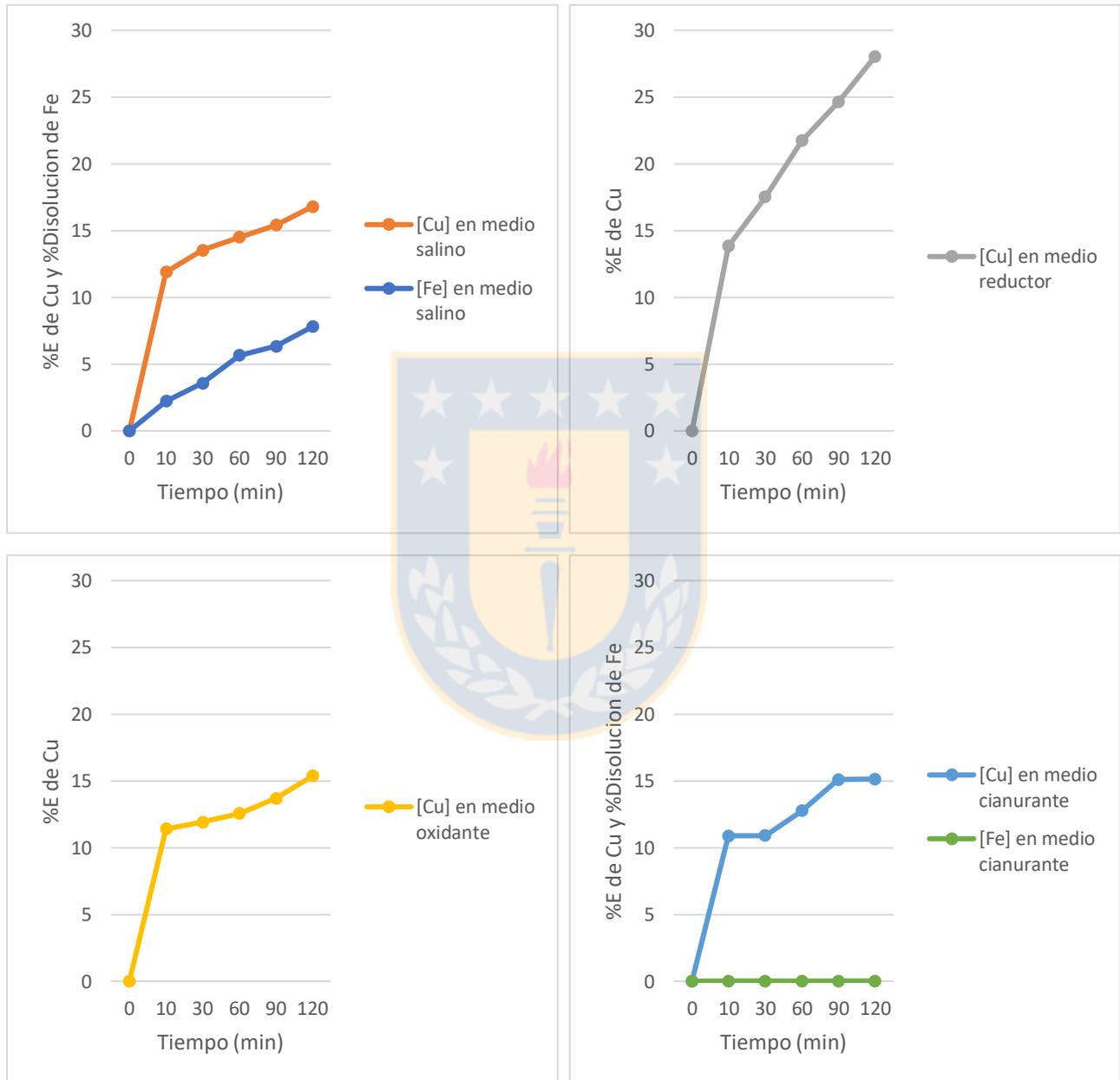


Fig. 14 Lixiviación de ferrita cúprica en diferentes medios lixiviantes (T= 60 °C)

En la figura 14 están representadas las extracciones de cobre y disoluciones de hierro a partir de ferrita cúprica (CuFe_2O_4) a 60°C en diferentes medios lixiviantes. En medio salino se observó una extracción aproximada de cobre del 16.8% al cabo de 120 min. la cual es cuatro puntos más baja a la alcanzada en la lixiviación sulfúrica normal a la misma temperatura (20.9% aprox.) y una disolución de hierro aprox. a 7.8%, también un poco más baja que la obtenida en medio sulfúrico normal (9% aprox.) a la misma temperatura y tiempo. En medio ácido - reductor se observa una extracción de cobre igual a 28% la cual es un poco más alta que la observada en el medio sulfúrico normal (20.9% aprox.) a la misma temperatura y tiempo. En medio ácido - oxidante se observa que para el cobre hay una disminución en las extracciones de este (15.4% de extracción a los 120 min.) comparándolas con las extracciones vistas en el medio sulfúrico normal a la misma temperatura y tiempo. Finalmente, en medio cianurante se observa una extracción aproximada de cobre del 15% al cabo de 120 min. la cual es 6 puntos más baja a la alcanzada en la lixiviación sulfúrica normal a la misma temperatura y tiempo (20.9% aprox.) y una disolución virtualmente nula para el hierro al mismo tiempo.

Resumiendo, para el caso de la ferrita cúprica se observa una dependencia de la temperatura en el medio sulfúrico normal, el cobre presenta una preferencia sobre el hierro para pasar a solución reafirmando la teoría en una investigación⁽²²⁾ que propone un mecanismo de disolución como el que sigue:

En primera instancia el ácido atacaría solamente al cobre de la siguiente manera



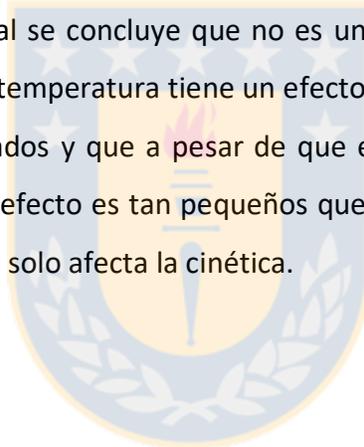
Para luego que reaccione con el cobre y el hierro del sólido resultante



La ecuación anterior muestra como al pasar el tiempo de lixiviación se genera un compuesto con menos cobre y más hierro que el original aumentando su refractariedad a la lixiviación ácida siendo la disolución de esta muy baja.

Para el caso de las experiencias en los otros 4 medios lixiviantes se observó que el de mejores resultados fue el medio ácido - reductor subiendo ligeramente la extracción de cobre desde un 20.9% en el medio sulfúrico normal hasta un 28% aproximadamente, se sabe que un aumento tan pequeño en la extracción no es de consideración y por ende se puede llegar a la conclusión que la disolución de la ferrita cúprica en las condiciones de trabajo estudiadas, es más sensible a la temperatura que a los medios lixiviantes antes vistos.

La figura 15 muestra es una forma resumida la influencia de la temperatura y los 5 distintos medios lixiviantes en la extracción de cobre de la ferrita cúprica, donde se puede observar que teniendo como referencia al medio sulfúrico normal, el único medio de los cuatro restantes que tuvo un efecto positivo en la extracción de cobre fue el medio ácido – reductor, por otra parte se ve que el peor resultado lo obtuvo el medio cianurante el que concuerda con datos experimentales de una investigación⁽²³⁾, en la cual se concluye que no es un buen medio para disolver la ferrita, también se puede señalar que la temperatura tiene un efecto mayor en la extracción de cobre que cualquiera de los medios planteados y que a pesar de que el medio ácido – reductor fue el que mayor efecto tuvo de los 5, este efecto es tan pequeños que no se puede ocupar para un análisis más extenso y se puede decir que solo afecta la cinética.



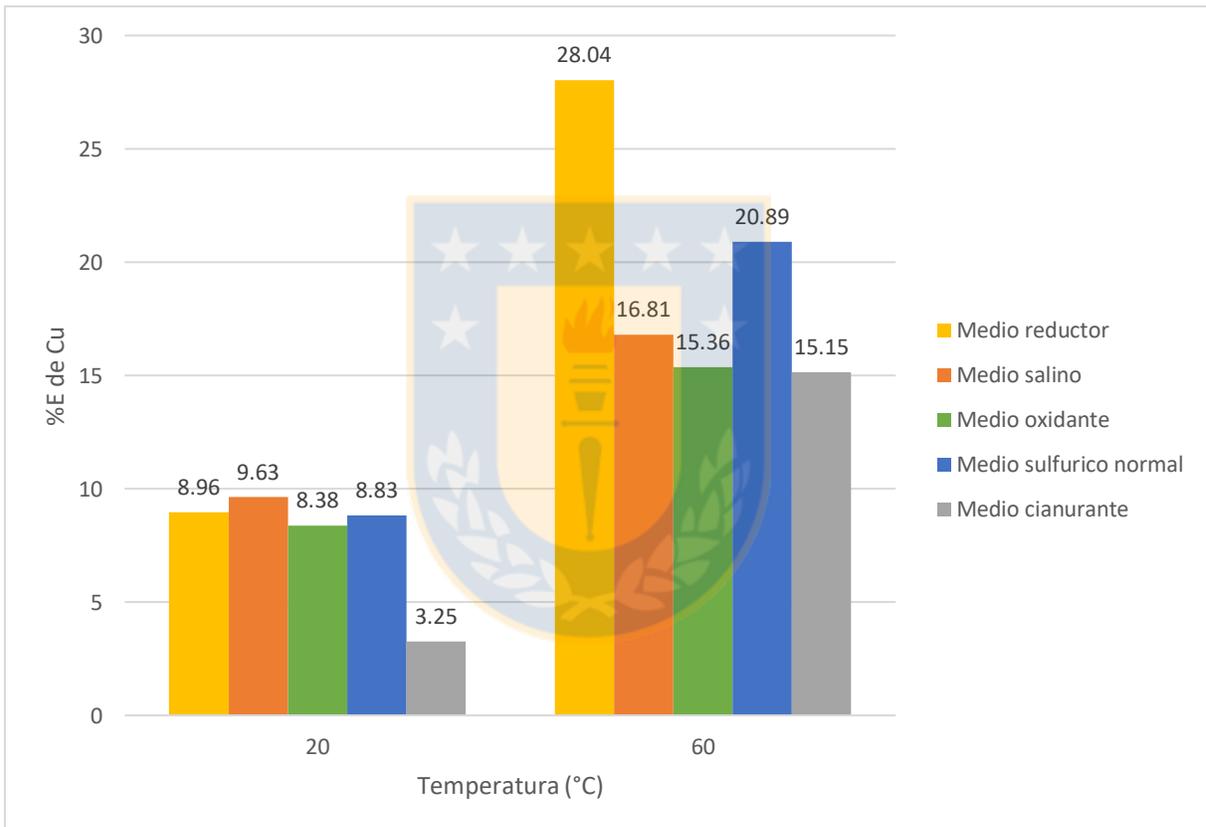


Fig. 15 Influencia de la temperatura y de los medios lixiviantes en la extracción de cobre desde la ferrita cúprica. (t = 120 min.)

4.4.2. Lixiviación de manganita de cobre (CuMn₂O₄)

a) En medio sulfúrico normal (con un exceso de ácido del 263% sobre el estequiométrico).

Como se observa en la FIG. 16, el porcentaje de disolución de manganeso para la manganita de cobre a 20°C es baja alcanzando un 7% aproximadamente y la extracción de cobre es considerable alcanzando esta un 50% aprox., por otra parte, se puede ver que la solubilidad de la manganita incrementa al verse expuesta a los 60 °C, alcanzando una extracción aproximada de cobre del 76% y una disolución aproximada de manganeso del 40%, estas extracciones y disoluciones medianamente altas de cobre y manganeso respectivamente podrían ser explicadas debido a que la manganita sintetizada no es 100% pura, habiendo aun reactivos (tenorita y óxido mangánico) al momento de terminada su sintetización, también como se observó con la ferrita cúprica la manganita de cobre presenta una disolución preferencial del cobre con respecto al manganeso en estas condiciones (sin considerar que necesita un medio reductor para su disolución completa).

b) En medio lixiviación salina, medio ácido – reductor, medio ácido – oxidante y medio cianurante. En medio salino, ácido - reductor y ácido - oxidante se ocupó una acidez inicial de 60 gpl lo que es un exceso de ácido del 263% sobre el estequiométrico.

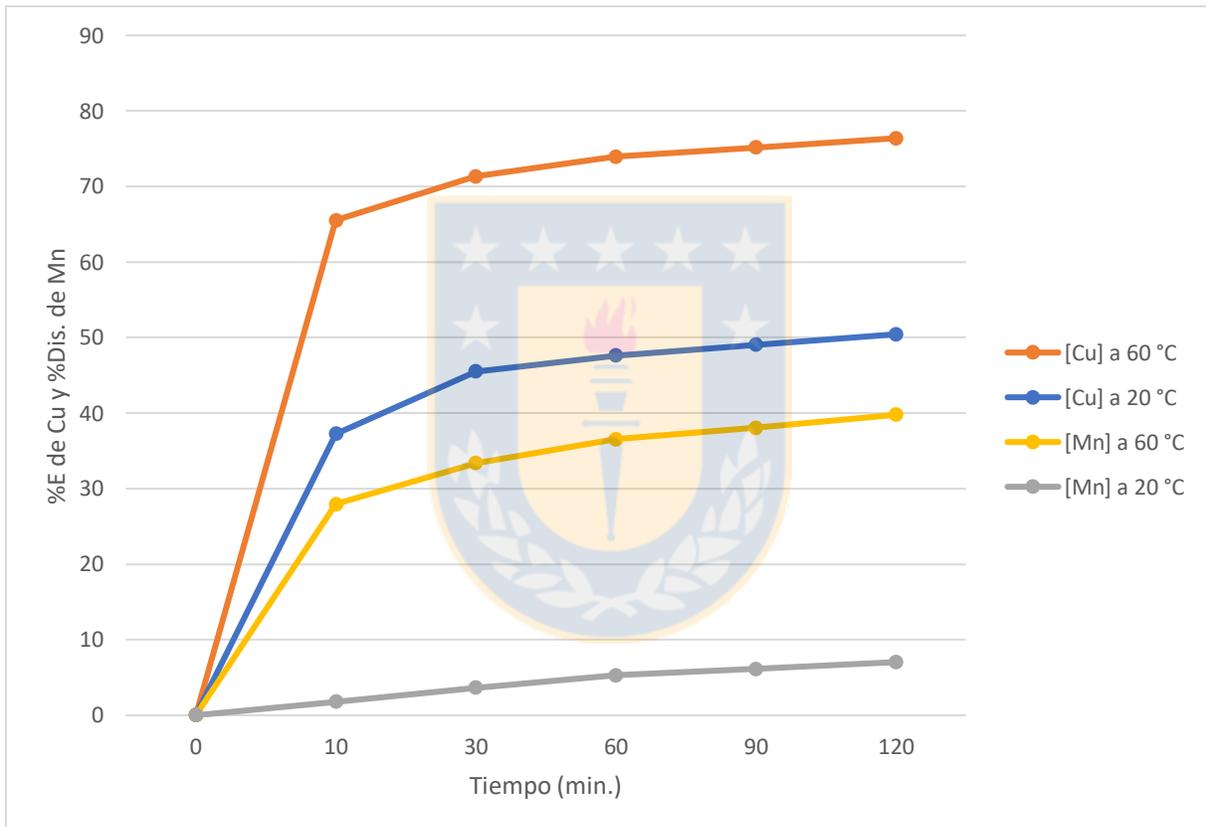


Fig. 16 Lixiviación de manganita de cobre en medio sulfúrico normal (263% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

En la figura 17 están representadas las extracciones de cobre y disoluciones de manganeso a partir de manganita de cobre (CuMn_2O_4) a $20\text{ }^\circ\text{C}$ en diferentes medios lixiviantes. Se observa para el caso de la lixiviación en medio salino que la extracción de cobre y la disolución de manganeso a los 120 min. se logran resultados similares (51% y 7% respectivamente) a las obtenidas en la lixiviación en medio sulfúrico normal (50% y 7% respectivamente). En medio ácido - reductor se observa que hay un gran aumento en la extracción de cobre como en la disolución de manganeso (95% y 98% aprox. respectivamente) en comparación a las obtenidas en la lixiviación en medio sulfúrico normal a la misma temperatura mostrada anteriormente. En el caso de la lixiviación en medio ácido - oxidante se observa un comportamiento similar a lo visto anteriormente en el medio ácido - reductor, pero las extracciones de cobre y las disoluciones de manganeso no son tan elevadas como las con este último dejándolas a los 120 min. de lixiviación en un 75% y 17% aprox. respectivamente. Finalmente, en medio cianurante se observa una extracción de cobre del 5% y una disolución insignificante de manganeso al cabo de 120 min.

Repetiendo las condiciones anteriormente descritas la figura 18 ilustra un segundo set de experiencias realizadas nuevamente en los 4 medios lixiviantes considerados anteriormente, pero para una nueva temperatura de $60\text{ }^\circ\text{C}$.

En la figura 18 están representadas las extracciones de cobre y disoluciones de manganeso a partir de manganita de cobre (CuMn_2O_4) a $60\text{ }^\circ\text{C}$ en diferentes medios lixiviantes. Observándose que para el caso de la lixiviación en medio salino se alcanza una extracción de cobre del 90% aprox. al cabo de 120 min., mayor en aprox. 14% a la alcanzada en la lixiviación en medio sulfúrico normal a la misma temperatura (76% aprox.) y una disolución de manganeso igual a 71% aprox., un 31% aprox. mayor que la obtenida en el medio sulfúrico normal (40% aprox.) a la misma temperatura y tiempo.

En medio ácido - reductor se observa una extracción de cobre aproximadamente del 98% la cual es más alta que la observada en la lixiviación en medio sulfúrico normal (76% aprox.) a la misma temperatura y tiempo, también se observa una disolución de manganeso la cual también aumenta llegando aproximadamente al 98% aprox. en comparación a la observada en la lixiviación en medio sulfúrico normal antes mencionada. En medio ácido - oxidante se observa que tanto para el cobre como para el manganeso no hay grandes variaciones en sus porcentajes de extracción y disolución respectivamente, comparándolas con las extracciones vistas en la lixiviación en medio ácido sulfúrico normal a la misma temperatura y tiempo, observándose para el cobre una extracción levemente mayor y para el manganeso una extracción levemente inferior (81% y 33% respectivamente a los 120 min.).

Resumiendo, para el caso de la manganita de cobre se observa una gran dependencia de la temperatura en los medios : salino, ácido – oxidante y cianurante, pero no tan grande como la dependencia observada por el medio ácido - reductor, también se observó que se necesita un medio reductor para su dilución completa, reafirmando la teoría que propone un mecanismo de disolución como el que sigue:



La ecuación anterior muestra como la manganita de cobre en su lixiviación ácida necesita de un medio reductor ya que a una temperatura ambiente (20 °C) alcanza una disolución virtualmente completa.

Para el caso de las experiencias en los otros tres medios lixiviantes se observó que el de mejores resultados fue el medio salino subiendo la extracción de cobre desde un 76% a 60 °C en medio sulfúrico normal, hasta un 90% aprox. a la misma temperatura, igualmente aumentando la disolución de manganeso desde un 40% (experiencia en medio sulfúrico normal a 60 °C y 120 min.) hasta un 71% a la misma temperatura y tiempo, en esta se puede apreciar un poco el efecto acomplejante del cloruro catalizado por la temperatura, por otra parte el medio de peor resultados fue el cianurante no teniendo efecto positivo ni en la extracción de cobre como en la disolución de manganeso. En conclusión, la disolución de la manganita de cobre en las condiciones de trabajo estudiadas es más sensible al medio ácido - reductor que a la temperatura y las demás variables.

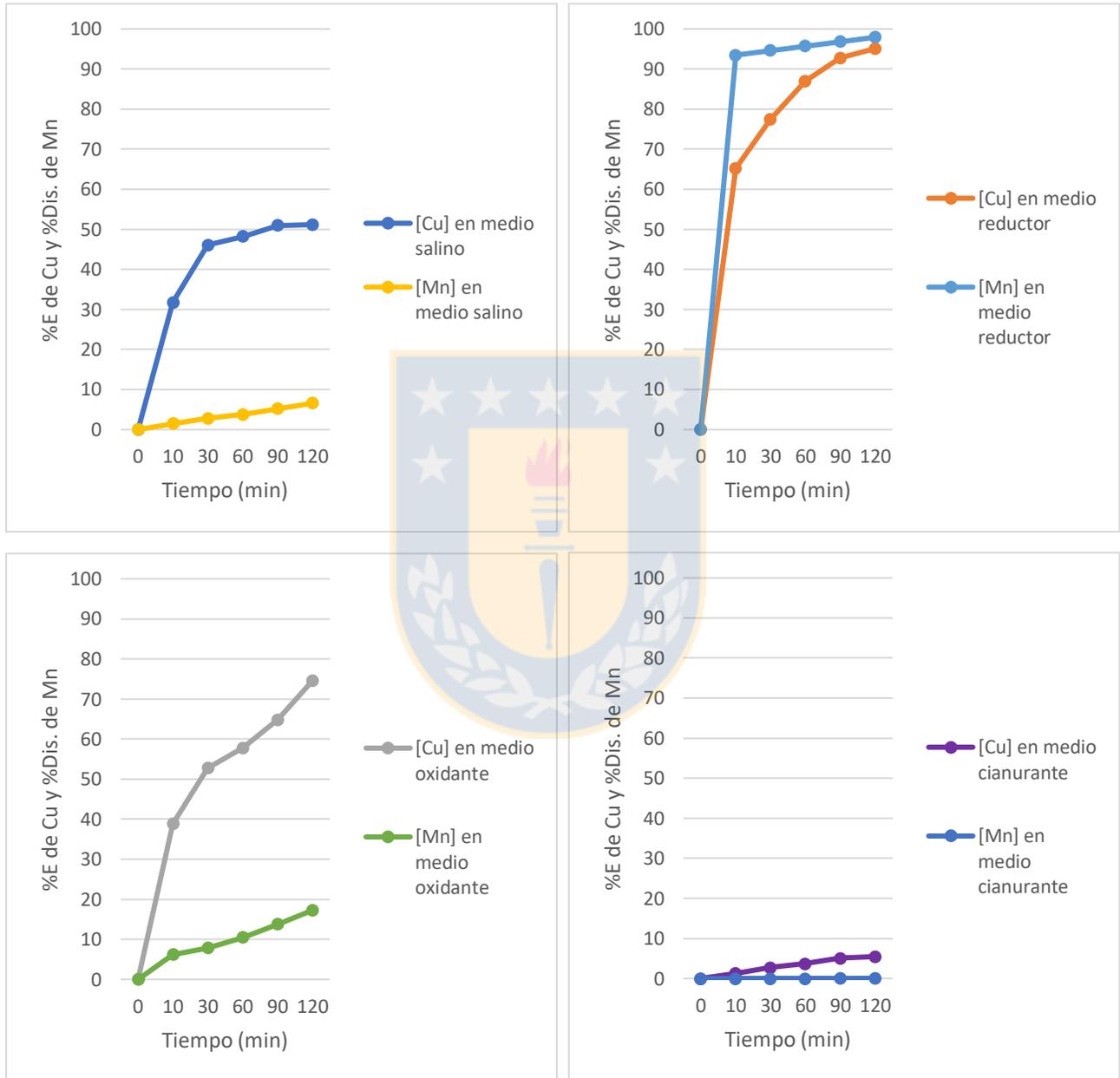


Fig. 17 Lixiviación de manganita de cobre en diferentes medios lixiviantes (T= 20 °C)

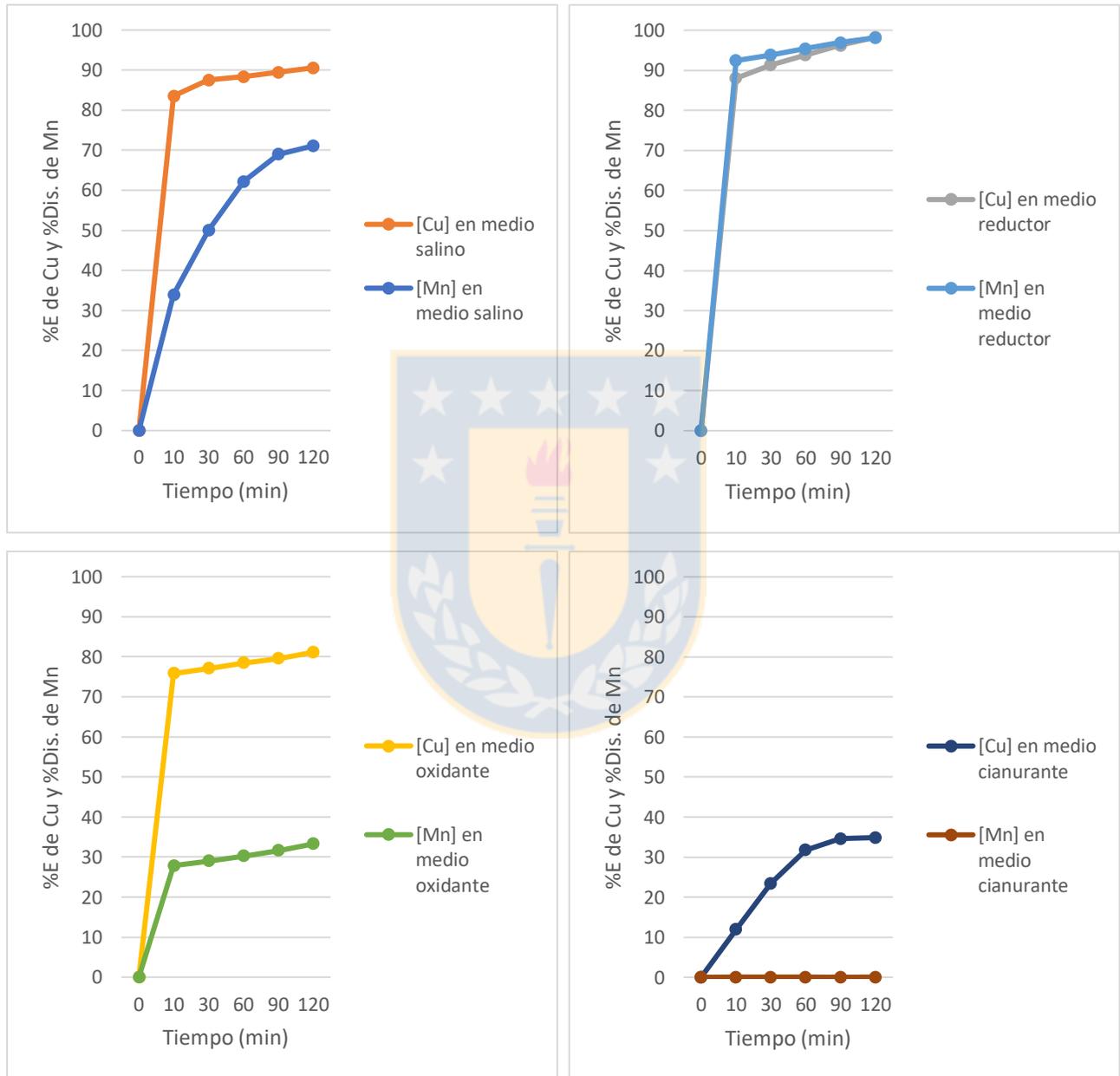


Fig. 18 Lixiviación de manganita de cobre en diferentes medios lixiviantes (T= 60 °C)

La figura 19 muestra en una forma resumida la influencia de la temperatura y distintos medios lixiviantes en la extracción de cobre desde la manganita de cobre, donde tomando como referencia la lixiviación en medio sulfúrico normal se pueden observar a baja temperatura efectos positivos en la extracción de cobre, en dos medios de los cuatro restantes, donde el mayor efecto positivo se observa en el medio ácido - reductor dejando aproximadamente el 95 % del cobre en solución, luego el efecto que lo sigue de forma positiva es el que da el medio ácido - oxidante, donde se nota un aumento de aprox. un 25% en la extracción de cobre, por otra parte se puede ver que en medio salino a baja temperatura tiene un efecto positivo despreciable en la extracción de cobre y en medio cianurante a esta misma temperatura no hay efecto positivo para la extracción. Para los efectos a 60 °C se observa como el medio que más se benefició a esta temperatura fue el salino donde alcanzo una extracción de cobre de 90% aprox. comparándola con la extracción que tuvo a los 20 °C de 51% aprox., por otra parte, el efecto de la temperatura para el medio ácido - reductor fue casi insignificante, elevando la extracción solo un 3% desde la extracción en el mismo medio a 20 °C (95% aprox.), dejándola en un 98% aprox. a los 60 °C, para el medio ácido - oxidante se observó un efecto de la temperatura prácticamente igual a la que tuvo el medio ácido - reductor, elevando la extracción solo un 6%, desde la vista a 20 °C (75% aprox.), dejándola en un 81% aprox. a los 60 °C, finalmente en medio cianurante se observó un efecto de la temperatura considerable, elevando la extracción un 30%, desde la vista a 20 °C (5% aprox.), dejándola en un 35% aprox. a los 60 °C.

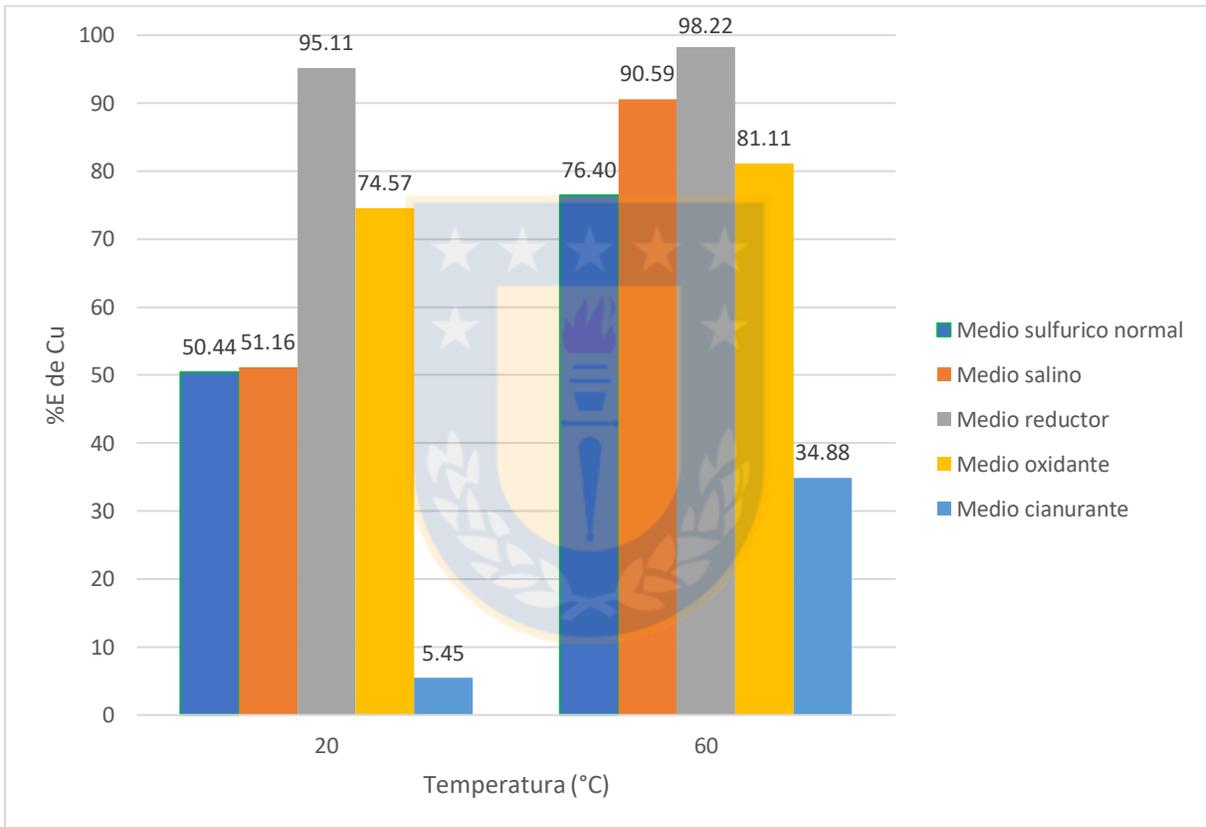


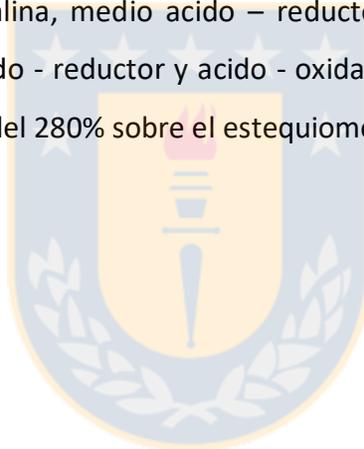
Fig. 19 Influencia de la temperatura y de los medios lixiviantes en la extracción de cobre desde la manganita de cobre. (t = 120 min.)

4.4.3. Lixiviación de ferrita de cobre y manganeso (CuMnFe₂O₅)

a) En medio sulfúrico normal (con un exceso de ácido del 280% sobre el estequiométrico).

Como se observa en la FIG. 20 para la ferrita de cobre y manganeso a 20°C, el porcentaje de extracción de cobre es de un 5.6% y disoluciones de fierro y manganeso un 1.7% y 1.5% aprox. respectivamente, las cuales son muy bajas, por otra parte, se puede ver que la solubilidad de esta incrementa al verse expuesta a los 60 °C, alcanzando extracciones aproximadas de cobre como disoluciones de fierro y manganeso de 20%, 9.5% y 9.3% aprox. respectivamente, también como se observó con la ferrita cúprica, la ferrita de cobre y manganeso tiene una disolución preferencial del cobre con respecto al manganeso y fierro, también se puede observar que la disolución de manganeso y fierro no se diferencian mucho en estas condiciones.

b) En medio lixiviación salina, medio ácido – reductor, medio ácido – oxidante y medio cianurante. En medio salino, ácido - reductor y ácido - oxidante se ocupó una acidez inicial de 60 gpl lo que es un exceso de ácido del 280% sobre el estequiométrico.



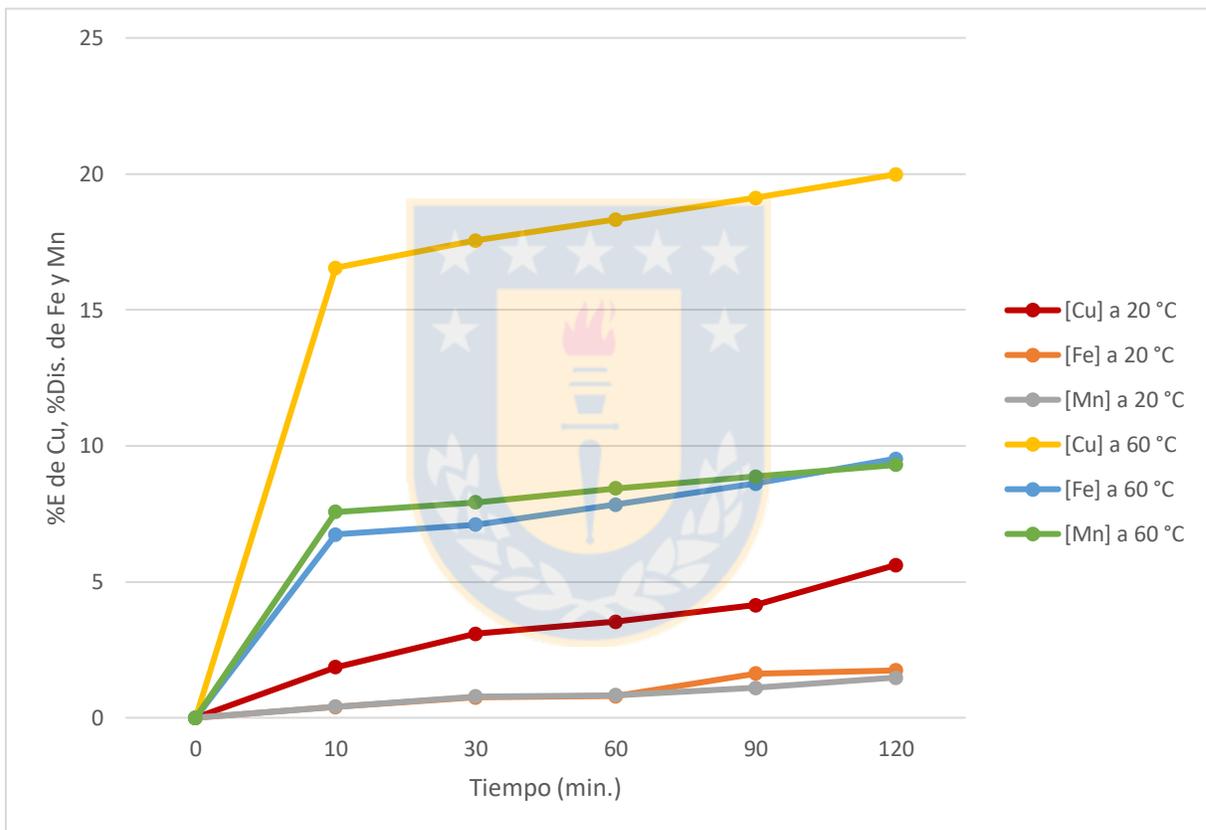


Fig. 20 Lixiviación de la ferrita de cobre y manganeso en medio sulfúrico normal (280% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

En la figura 21 están representadas las extracciones de cobre y disoluciones de fierro y manganeso a partir de ferrita de cobre y manganeso ($\text{CuMnFe}_2\text{O}_5$) a 20 °C en diferentes medios lixiviantes. Se observa para el caso de la lixiviación en medio salino que la extracción de cobre como las disoluciones de fierro y manganeso a los 120 min. se ven elevadas levemente alcanzando 9.7%, 2.7% y 2.4% aprox. respectivamente en comparación a las obtenidas en la lixiviación en medio sulfúrico normal a la misma temperatura (5.6%, 1.7% y 1.5% respectivamente). En medio ácido - reductor se observa que también hay un leve aumento en la extracción de cobre como en la disolución de manganeso (6.5% y 5.1% aprox. respectivamente) en comparación a las obtenidas en la lixiviación en medio sulfúrico normal a la misma temperatura mostrada anteriormente. En el caso en medio ácido - oxidante se observa un comportamiento similar a lo visto anteriormente en el medio ácido - reductor, subiendo levemente su extracción de cobre y disolución de manganeso (7.3% y 3.2% aprox. respectivamente) a los 120 min. de lixiviación. Finalmente, en medio cianurante la extracción de cobre como las disoluciones de fierro y manganeso a los 120 min. no se ven afectadas positivamente en este medio alcanzando 1%, 0% y 0% aprox. respectivamente en comparación a las obtenidas en la lixiviación en medio sulfúrico normal a la misma temperatura y tiempo (5.6% y 1.5% respectivamente).

Repitiendo las condiciones anteriormente descritas la figura 22 ilustra un segundo set de experiencias realizadas nuevamente en los 4 medios lixiviantes considerados anteriormente, pero para una nueva temperatura de 60 °C.

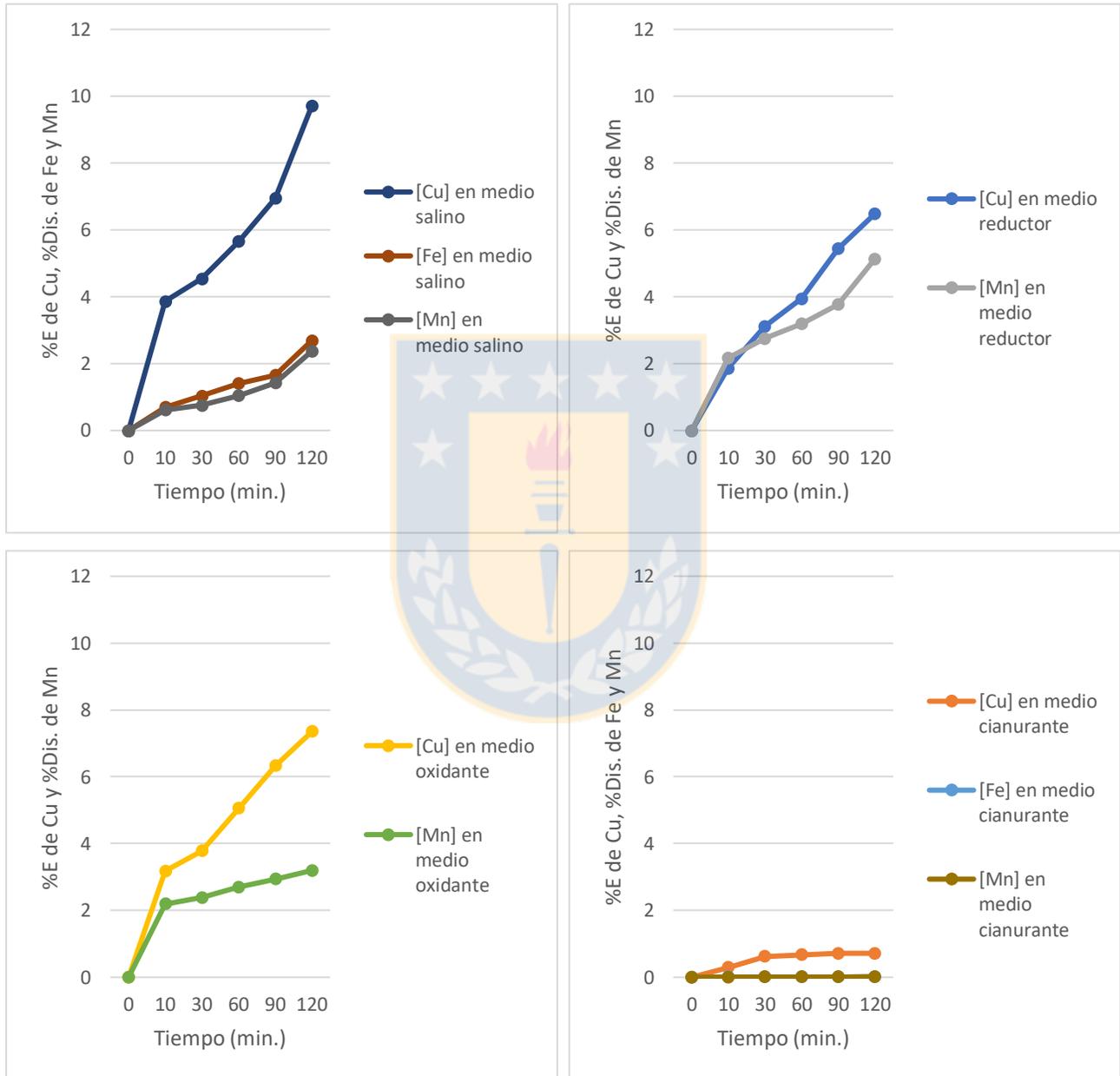


Fig. 21 Lixiviación de ferrita de cobre y manganeso en diferentes medios lixiviantes (T= 20 °C)

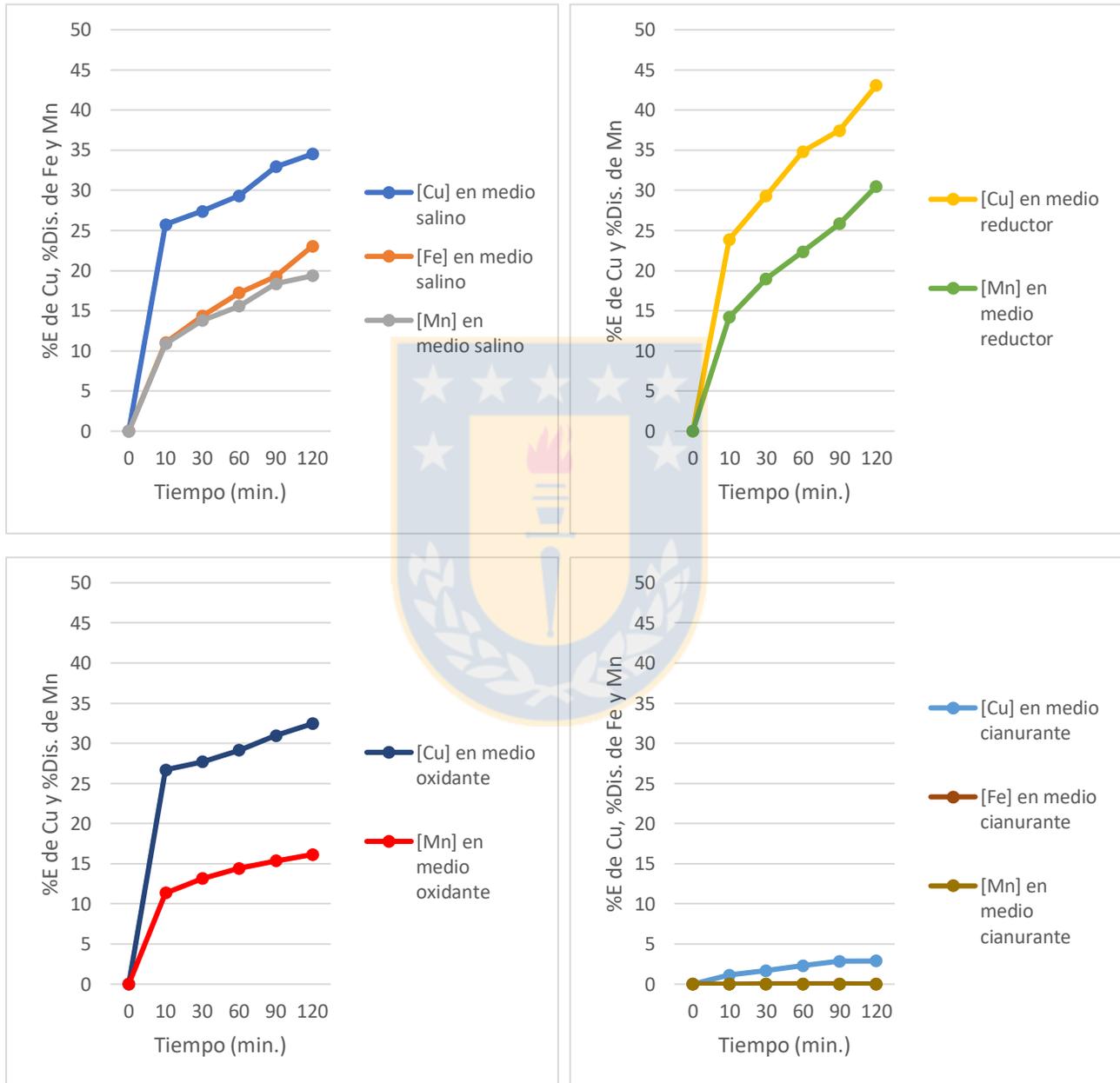


Fig. 22 Lixiviación de ferrita de cobre y manganeso en diferentes medios lixiviantes (T= 60 °C)

En la figura 22 están representadas las extracciones de cobre y disoluciones de manganeso a partir de manganita de cobre (CuMn_2O_4) a $60\text{ }^\circ\text{C}$ en diferentes medios lixiviantes. Se observa que para el caso de la lixiviación en medio salino se alcanza una extracción de cobre del 35% aprox. al cabo de 120 min., aproximadamente un 15% mayor a la alcanzada en la lixiviación en medio sulfúrico normal a la misma temperatura (20% aprox.), una disolución de fierro del 23% aprox., 13% más que la extracción alcanzada en la lixiviación en medio sulfúrico normal (9.5% aprox.) a la misma temperatura y tiempo, y finalmente una disolución de manganeso de 19% aprox., 10% mayor que la obtenida en la lixiviación en medio sulfúrico normal (9.3% aprox.) a la misma temperatura y tiempo.

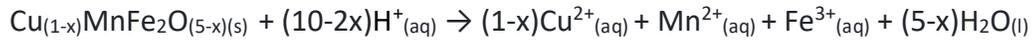
En medio ácido – reductor se observa una extracción de cobre aproximadamente del 43% la cual es más alta que la observada en la lixiviación en medio sulfúrico normal (20% aprox.) a la misma temperatura y tiempo, también se observa un aumento en la disolución de manganeso llegando aproximadamente al 30% en comparación a la observada en la lixiviación en medio sulfúrico normal (9.3% aprox.) antes mencionada. En medio ácido – oxidante al igual que con los anteriores agentes se mantuvo la tendencia al aumento en la extracción de cobre como en la disolución de manganeso, observándose para el cobre una extracción del 32% aprox. y para el manganeso una extracción del 16% aprox. siempre comparándolas con las extracciones observadas en la lixiviación en medio sulfúrico a la misma temperatura y tiempo ($60\text{ }^\circ\text{C}$ y 120 min.). Finalmente, en medio cianurante se observa una extracción de cobre aproximadamente del 3% la cual es mucho más baja que la observada en la lixiviación en medio sulfúrico normal (20% aprox.), como también unas disoluciones de fierro y manganeso despreciables para este estudio en estas condiciones de lixiviación.

Resumiendo, para el caso de la ferrita de cobre y manganeso se observa una dependencia de la temperatura en la lixiviación en los diferentes medios lixiviantes, como también la dependencia observada por tres (ácido – reductor, salino y ácido – oxidante) de los cuatro medios lixiviantes restantes estudiados anteriormente, destacando entre ellos el medio ácido – reductor en particular, ya que fue el que mayor impacto tuvo en la disolución del compuesto, por otra parte, se observó que el cobre presenta una preferencia sobre el manganeso y el fierro para pasar a solución, finalmente se propone una teoría de un mecanismo de disolución como el que sigue:

En primera instancia solo con el ácido ocurriría lo siguiente



Luego se generaría un compuesto no estequiométrico el cual contiene más fierro y manganeso que el original, procediendo la lixiviación:



Siendo la cinética de esta última muy lenta, luego con los tres medios lixiviantes antes nombrados se ve un aumento de la cinética de lixiviación de la cual la más rápida fue en medio ácido – reductor.

La figura 23 muestra en una forma resumida la influencia de la temperatura y los 5 distintos medios lixiviantes en la extracción de cobre desde la ferrita de cobre y manganeso, donde tomando como referencia la lixiviación en medio sulfúrico normal se pueden observar a baja temperatura que efectos positivos existen en los tres de los cuatro medios restantes, aunque a esta temperatura estos efectos son casi insignificantes, donde el mayor de ellos a esta temperatura se observa en el medio salino dejando aproximadamente el 4% más de cobre en solución que el visto en medio sulfúrico normal (6% aprox.) dejándola en un 10%. Para los efectos a 60 °C se observa como el medio que más se benefició a esta temperatura fue el ácido - reductor donde alcanzo una extracción de cobre de 43% aprox. comparándola con la extracción que obtuvo a los 20 °C (6.5% aprox.), lo sigue, el medio ácido - oxidante donde se observó el efecto de la temperatura elevando la extracción de cobre un 25%, desde la vista a 20 °C (7% aprox.), dejándola en un 32% aprox., para el medio salino se observó un efecto de la temperatura prácticamente igual a la que tuvo el medio ácido – oxidante, elevando la extracción un 25%, desde la vista a 20 °C (10% aprox.), dejándola en un 35% aprox. a los 60 °C, finalmente en medio cianurante se observó un efecto de la temperatura casi insignificante, elevando la extracción un 2%, desde la vista a 20 °C (1% aprox.), dejándola en un 3% aprox. a los 60 °C. Por otra parte, mezclando el efecto de la temperatura como la del medio lixivante se concluye que el mejor medio fue el ácido – reductor a 60 °C seguido por el medio salino y el medio ácido oxidante a esta misma temperatura y finalizando también se observó que el medio cianurante no aporta en la disolución de la ferrita de cobre y manganeso.

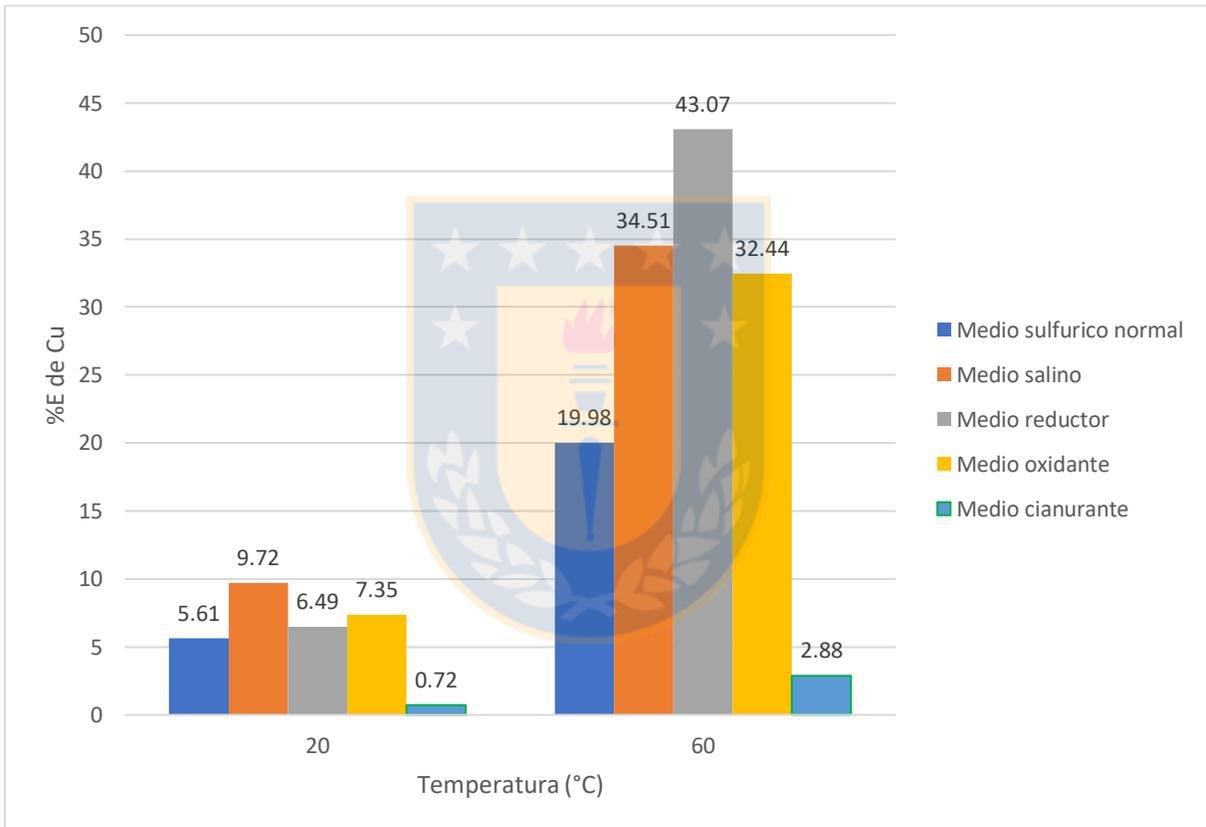


Fig. 23 Influencia de la temperatura y de los medios lixiviantes en la extracción de cobre desde la ferrita de cobre y manganeso. (t = 120 min.)

5. CONCLUSIONES

El análisis de los resultados obtenidos en este estudio, permiten concluir:

- 5.1. El compuesto doble de cobre y manganeso identificado como manganita de cobre tiene un comportamiento disolutivo mejor al compuesto doble de cobre y hierro identificado como ferrita de cobre y del complejo triple de cobre, hierro y manganeso identificado como ferrita de cobre y manganeso.
- 5.1.1. La ferrita cúprica en su lixiviación en medio sulfúrico normal presenta una alta refractariedad y una gran dependencia a la temperatura para su disolución dejando extracciones casi despreciables a baja temperatura (8.8% aprox. de cobre) y esta solo aumenta un poco en su lixiviación a 60 °C (21% aprox. de cobre). En los otros 4 medios lixiviantes (medio salino, medio ácido – reductor, medio ácido – oxidante y medio cianurante) al igual que en el medio sulfúrico normal se sigue con la dependencia a la temperatura por lo tanto a temperatura ambiente no se muestra efecto significativo alguno, ya sea positivo o negativo, las variaciones en la extracción son nimias, luego a los 60 °C se observó que el único medio que tuvo un efecto positivo en la extracción de cobre fue el medio ácido – reductor, pero este fue muy pequeño, dejando la extracción de cobre en un 28% aproximadamente, concluyéndose así que el efecto del medio ácido - reductor en la disolución de la ferrita es solo cinético, que la temperatura domina la disolución de la ferrita de cobre y que la cianuración no es efectiva en este compuesto (todo esto en base a los parámetros de las variables fijadas).

Por otra parte, se pudo observar el mecanismo complejo de disolución que tiene la ferrita cúprica propuesta en un estudio de la misma⁽²²⁾ y llegando a conclusiones similares, viéndose el ataque preferencial del cobre frente al hierro por parte del ácido sulfúrico, observándose dos etapas sucesivas de disolución:



Se observa en la reacción anterior un ataque prioritario por el cobre, permaneciendo el hierro en alguna estructura compleja. Posteriormente ocurre:



Aunque en la investigación se pudo apreciar solo la primera parte completa, ya que para lograr completar la disolución que ocurre en la segunda ecuación se necesitan cambiar los factores lixiviantes ya sea probando con otro ácido y o aumentando la temperatura.

- 5.1.2. La manganita de cobre tiene un comportamiento disolutivo distinto, ya que necesita de un agente reductor para lograr la extracción del metal de interés.

El mejor medio y temperatura visto para la disolución de la manganita de cobre teniendo como referencia el medio sulfúrico normal (50% y 76% de extracción de cobre a 20 y 60 °C respectivamente) para ver si tienen un efecto positivo o no, fue el medio ácido – reductor (95% y 98% de extracción de cobre a 20 y 60 °C respectivamente) , ya que ni siquiera necesita de la temperatura para lograr una disolución virtualmente completa de la manganita de cobre, seguido por el medio salino a 60 °C (91% extracción de cobre) y el medio ácido oxidante (81% extracción de cobre) a la misma temperatura en ese orden para efecto positivo. Por otra parte, se observó que el medio cianurante (35% de extracción de cobre a 60 °C) no alcanzó a obtener un efecto positivo en este sentido.

Concluyéndose así que la manganita de cobre necesita de un medio reductor para obtener una disolución completa y al estar en este, la temperatura no influye significativamente en la disolución del mineral, por otra parte, donde si es significativa la temperatura es en las lixiviaciones en medio salino, cianurante, sulfúrico normal y ácido – oxidante, en ese orden para efecto de la temperatura en la extracción y finalmente al igual que con la ferrita de cobre se concluye que la cianuración no es efectiva en este compuesto.

- 5.1.3. La ferrita de cobre y manganeso también presenta una alta dependencia a la temperatura en medio sulfúrico normal lo que con lleva a una extracción baja para el cobre (5.6% aprox.) a temperatura ambiente y esta solo aumenta en su lixiviación a 60 °C (20%, de extracción aprox. de cobre). En los otros cuatro medios lixiviantes estudiados (medio salino, medio ácido – reductor, medio ácido oxidante y medio cianurante) al igual que la lixiviación en medio sulfúrico normal se ve una dependencia de la temperatura obteniéndose mejores extracciones de cobre a los 60 °C que a temperatura ambiente, dejando los medios lixiviantes en un orden de mayor a menor efecto de la temperatura como sigue: medio

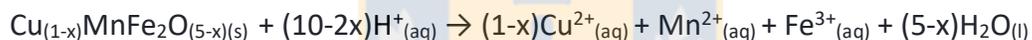
ácido reductor, medio ácido – oxidante, medio salino, medio sulfúrico normal y medio cianurante.

El mejor medio y temperatura visto para la disolución de la ferrita de cobre y manganeso teniendo como referencia el medio sulfúrico normal (6% y 20% de extracción de cobre a 20 y 60 °C respectivamente) para ver si tienen un efecto positivo o no, fue el medio ácido – reductor (43% de extracción de cobre 60 °C), seguido por el medio salino a 60 °C (35% extracción de cobre) y el medio ácido oxidante (32% extracción de cobre) a la misma temperatura en ese orden para efecto positivo. Por otra parte, se observó que el medio cianurante (3% de extracción de cobre a 60 °C) no alcanzó a obtener un efecto positivo en este sentido. Finalmente se teoriza en el siguiente mecanismo disolutivo:

En primera instancia solo con el ácido ocurriría lo siguiente



Luego se generaría un compuesto no estequiométrico el cual contiene mayor cantidad de fierro y manganeso que el original, procediendo la lixiviación:



Luego al ver los efectos de los diferentes medios lixiviantes se llega a la conclusión que estos solo ayudan en la cinética de lixiviación aumentando esta última, el medio salino generando complejos, el medio ácido – reductor y el medio ácido – oxidante por otra parte modificando el potencial de la lixiviación, finalmente al igual que con la ferrita de cobre y la manganita de cobre se puede apreciar que la cianuración no es efectiva en este compuesto.

- 5.2. La tenorita u óxido de cobre presenta en medio sulfúrico normal a temperatura ambiente una disolución alta llegando al 92% aprox. en la extracción de cobre y en la lixiviación de la misma a 60 °C junto en los otros medios lixiviantes ocupados en este estudio (medio salino, medio ácido – reductor y medio ácido – oxidante) obtuvieron una extracción virtualmente completa tanto en la lixiviación en medio sulfúrico normal a 60 °C como en los otros 3 medios lixiviantes a la misma temperatura alcanzando una extracción de cobre promedio del 97.6% aproximadamente.

- 5.3. La hematita presenta una solubilidad casi nula en las condiciones estudiadas tanto al cambio de temperatura como en los otros tres medios lixiviantes en la lixiviación acida a 120 minutos.
- 5.4. El óxido mangánico o trióxido de di-manganeso a temperatura ambiente puede considerarse insoluble (1.2% de disolución de manganeso) en lixiviación solo con ácido durante 120 minutos. La temperatura aumenta levemente la disolución de manganeso (18.6% aprox.), en cambio en medio ácido – reductor a los 60 °C alcanza el 87% aprox. de disolución de manganeso, mientras que a la misma temperatura y tiempo de lixiviación en medio salino se muestra una mejora en la disolución de manganeso (41.3%) aunque no tan efectiva como la vista en el medio ácido – reductor aumentando solo la cinética de disolución, finalmente al en medio ácido – oxidante en las mismas condiciones antes descritas se concluye que este no tiene un efecto positivo significativo en la disolución del óxido mangánico dejando la disolución de manganeso en 2.65% casi tan baja como la vista en la disolución a temperatura ambiente en medio sulfúrico normal.
- 5.5. El óxido de manganeso (II) u óxido manganesoso puede considerarse altamente soluble en soluciones aciduladas alcanzándose disoluciones virtualmente completas del óxido (94% de disolución de manganeso) tanto a temperatura ambiente como a 60 °C, el efecto producido en los otros tres medios lixiviantes no es positivo disminuyendo la disolución de manganeso al estar en estos últimos.

Tabla 6: Comportamiento de los compuestos puros frente a los agentes lixiviantes.

Compuesto	Formula	Pureza (%)	Lixiviantes en gpl.	Temp. (°C)	t (min)	%E _{Cu}	%E _{Fe}	%E _{Mn}
Tenorita	CuO	99,9	(*)Sol. Básica a pH 11 + 0,13 gpl cianuro potásico	25	120	75,00	--	--
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	20	120	91,50	--	--
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	60	120	96,20	--	--
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 60 gpl. ión cloruro	60	120	98,19	--	--
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión ferroso	60	120	98,56	--	--
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión férrico	60	120	97,35	--	--
Hematita	Fe ₂ O ₃	99,9	Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	20	120	--	0,53	--
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	60	120	--	3,04	--
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 60 gpl. ión cloruro	60	120	--	5,47	--
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión ferroso	60	120	--	0,41	--
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión férrico	60	120	--	0,23	--
Oxido mangánico	Mn ₂ O ₃	99,9	Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	20	120	--	--	1,25
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	60	120	--	--	18,58
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 60 gpl. ión cloruro	60	120	--	--	41,32
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión ferroso	60	120	--	--	86,87
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión férrico	60	120	--	--	2,65
Oxido manganoso	MnO	99,9	Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	20	120	--	--	94,86
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	60	120	--	--	94,23
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 60 gpl. ión cloruro	60	120	--	--	84,21
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión ferroso	60	120	--	--	80,34
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión férrico	60	120	--	--	87,55

Tabla 7: Comportamiento de los compuestos mixtos y triple frente a los agentes lixiviantes.

Compuesto	Formula	Pureza (%)	Lixiviantes en gpl.	Temp. (°C)	t (min)	%E _{Cu}	%E _{Fe}	%E _{Mn}			
Ferrita cúprica	CuFe ₂ O ₄	--	Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	20	120	8,83	0,46	--			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 60 gpl. ión cloruro	20	120	9,63	0,47	--			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión ferroso	20	120	8,96	0,45	--			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión férrico	20	120	8,38	0,37	--			
			Sol. básica a pH 11 + 5 gpl. cianuro potásico	20	120	3,25	0,02	--			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	60	120	20,89	9,01	--			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 60 gpl. ión cloruro	60	120	16,81	7,81	--			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión ferroso	60	120	28,04	--	--			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión férrico	60	120	15,36	--	--			
			Sol. básica a pH 11 + 5 gpl. cianuro potásico	60	120	15,1	0,01	--			
			Manganita de cobre	CuMn ₂ O ₄	--	Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	20	120	50,44	--	7,04
						Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 60 gpl. ión cloruro	20	120	51,16	--	6,58
						Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión ferroso	20	120	95,11	--	97,93
						Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión férrico	20	120	74,57	--	17,26
Sol. básica a pH 11 + 5 gpl. cianuro potásico	20	120				5,45	--	0,02			
Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	60	120				76,40	--	39,77			
Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 60 gpl. ión cloruro	60	120				90,59	--	71,11			
Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión ferroso	60	120				98,22	--	98,14			
Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión férrico	60	120				81,11	--	33,26			
Sol. básica a pH 11 + 5 gpl. cianuro potásico	60	120				34,9	--	0,00			
Ferrita de cobre y manganeso	CuMnFe ₂ O ₅	--				Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	20	120	5,61	1,74	1,48
						Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 60 gpl. ión cloruro	20	120	9,72	2,69	2,38
						Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión ferroso	20	120	6,49	1,79	5,14
						Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión férrico	20	120	7,35	1,90	3,20
			Sol. básica a pH 11 + 5 gpl. cianuro potásico	20	120	0,72	0,02	0,02			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl.	60	120	19,98	9,53	9,30			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 60 gpl. ión cloruro	60	120	34,51	23,05	19,35			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión ferroso	60	120	43,07	19,40	30,49			
			Sol. ác. sulfúrico 60 gpl. + 20 gpl. ión férrico	60	120	32,44	--	16,15			
			Sol. básica a pH 11 + 5 gpl. cianuro potásico	60	120	2,88	0,02	0,00			

Tabla 8: Caracterización de los compuestos lixiviados.

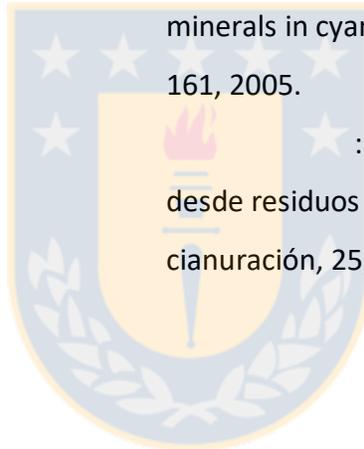
Compuesto	Nombre	Formula	P.M.	Color	Magnetismo	Cont. %		
						Cu	Fe	Mn
Oxido cúprico	Tenorita	CuO	79,55	Negro	Nulo	79,81		
Oxido férrico	Hematita	Fe ₂ O ₃	159,69	Rojo. Granate	Tras calentamiento		69,87	
Oxido mangánico		Mn ₂ O ₃	157,88	Negro	Nulo			69,53
Oxido manganoso		MnO	70,94	Verde	Nulo			77,37
Ferrita cúprica		CuFe ₂ O ₄	239,24	Gris	Alto	24,1	45,79	
Manganita de cobre		CuMn ₂ O ₄	237,42	Café negruzco	Nulo	41,38		33,91
Ferrita de cobre y manganeso		CuMnFe ₂ O ₅	310,17	Gris obscuro	Alto	18,74	34,27	15,86

6. BIBLIOGRAFIA.

1. ARLO D. y LEE H. :Decomposition of Copper (II) Sulfate Pentahydrate; 1-2, 1979.
2. KAMEL A. y ABDALLAH A. :The Thermal Decomposition of Ferrous Sulphate Heptahydrate; 1-4, 1972.
3. STOBBE E.R., DE BOER B.A., GEUS J.W. : The Reduction and Oxidation Behaviour of Manganese Oxides; 1-3, 1999.
4. HABBACHE N., ALANE N., DJERAD S., TIFOUTI L. : Leaching of Copper Oxide with Different Acid Solutions; 1-6, 2009.
5. MAJIMA H., AWAKURA Y., y MISHIMA T. : The Leaching of Hematite in Acid Solutions; 4-7, 1985.
6. GODUNOV E., ARTAMONOVA I., GORICHEV I., y LAINER Y. : Interaction of Manganese(IV) Oxide with Aqueous Solutions of Citric and Sulfuric Acids; 2-3, 5, 2011.
7. GODUNOV E., ARTAMONOVA I., GORICHEV I., y LAINER Y. : Influence of Oxalic Acid on the Dissolution Kinetics of Manganese Oxide; 2, 2012.
8. DAS S.C., SAHOO P.K. y RAO P.K. : Extraction of Manganese from Low-Grade Manganese Ores by FeSO₄ Leaching; 36, 1981.
9. KENFACK F. y LANGBEIN H. : Influence of the temperature and the oxygen partial pressure on the phase formation in the system Cu-Fe-O; 1, 6, 10, 2004.

10. JACOB K. T., FITZNER K., y ALCOCK C. B. : Activities in the Spinel Solid Solution, Phase Equilibria and Thermodynamic Properties of Ternary Phases in the System Cu-Fe-O; 1, 3-10, 1977.
11. KATKOV A. and LYKASOV A. : Spinel Phase Relations in the Fe₃O₄-CuFe₂O₄ System; 1, 2002.
12. BOYANOV B., PELTEKOV A. y IVANOV K. : Ferrites of the MeFe₂O₄ System (Me – Zn, Cu, Cd) and Their Two Faces; 2-4, 6, 2015.
13. SAHU S. K. y NAVROTSKY A. : Thermodynamics of copper-manganese and copper-iron spinel solid solutions; 1-9, 2017.
14. PARIDA S.K., JYOSHNARANI M., MISHRA D.K. : Structural and magnetic behavior of spinel CuMn₂O₄ synthesized by co-melting technique; 1-3, 2016.
15. METZ R., CAFFIN J. P., LEGROS R., ROUSSET A. : The preparation, characterization and electrical properties of copper manganite spinels, Cu_xMn_{3-x}O₄, 0 ≤ x ≤ 1; 1-2, 1989.
16. BOYANOV B., PELTEKOV A. : Solubility of ZnFe₂O₄, CdFe₂O₄ and CuFe₂O₄ in Solutions of H₂SO₄, HCl and HNO₃; 4-5, 2014.
17. REGHEZZA A. : Química Disolutiva de Cobres Negros; 2, 5-10, 2012.
18. REGHEZZA A. : Solubilidad y Lixiviabilidad de Minerales de Cobre; 14, 2014.
19. HELLE S., PINCHEIRA M., JEREZ O. y KELM U. : Sequential Extraction to Predict the Leaching Potential of Refractory Black Copper Ores; 1, 2013.

20. HERNANDEZ C., BENAVENTE O., MELO E. y NUÑEZ D. : Copper Leach from Black Copper Minerals; 16-19, 2011.
21. PERRY R. H. y GREEN D. : Perry's Chemical Engineers' Handbook 7. Ed., 1997.
22. ILLGE B. : Lixiviación de productos de tostación de concentrados sulfurados de cobre; 23, 136-145, 1982.
23. ROJAS N. : Disolución de cobre en cianuración convencional proveniente de ferrita cúprica; 4-7, 2007.
24. P.L BREUER, X. DAI, M.I. JEFFREY : Leaching of gold and copper minerals in cyanide deficient copper solutions, 161, 2005.
25. ROJAS N. : Recuperación de oro y plata desde residuos ferríticos mediante cianuración, 25, 2003.





ANEXO A**TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES****COMPUESTO DE COBRE**

Tabla 9: (Fig. 4) Lixiviación de tenorita en medio sulfúrico normal (387% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

t (min)	20 °C		60 °C	
	Cu^{2+} (gpl)	% E_{Cu}	Cu^{2+} (gpl)	% E_{Cu}
120	7,31	91,50	7,69	96,20

Concentración máxima de cobre = 7,99 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

Tabla 10: (Fig. 5) Lixiviación de tenorita en diferentes medios lixiviantes (60 gpl de Cl^- , 20 gpl de Fe^{2+} y 20 gpl de Fe^{3+} respectivamente; $T=60\text{ °C}$)

t (min)	Medio salino (Cl^-)		Medio reductor (Fe^{2+})		Medio oxidante (Fe^{3+})	
	Cu^{2+} (gpl)	% E_{Cu}	Cu^{2+} (gpl)	% E_{Cu}	Cu^{2+} (gpl)	% E_{Cu}
120	7,85	98,19	7,88	98,56	7,78	97,35

Concentración máxima de cobre = 7,99 gpl para 60 gpl Cl^- , 20 gpl Fe^{2+} y 20 gpl Fe^{3+} .

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

ANEXO B**COMPUESTO DE FIERRO**

Tabla 11: (Fig. 6) Lixiviación de hematita en medio sulfúrico normal (226% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

t (min)	20 °C		60 °C	
	Fe_T (gpl)	% E_{Fe}	Fe_T (gpl)	% E_{Fe}
120	0,04	0,53	0,21	3,04

Concentración máxima de fierro = 7 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

Tabla 12: (Fig. 7) Lixiviación de hematita en diferentes medios lixiviantes (60 gpl de Cl^- , 20 gpl de Fe^{2+} y 20 gpl de Fe^{3+} respectivamente; $T = 60$ °C)

t (min)	Medio salino (Cl^-)		Medio reductor (Fe^{2+})		Medio oxidante (Fe^{3+})	
	Fe_T (gpl)	% E_{Fe}	Fe_T (gpl)	% E_{Fe}	Fe_T (gpl)	% E_{Fe}
120	0,38	5,47	16,30	--	13,20	--

Concentración máxima de fierro = 7 gpl para 60 gpl Cl^- , 27 gpl para 20 gpl Fe^{2+} y 27 gpl para 20 gpl Fe^{3+}

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

ANEXO C**COMPUESTOS DE MANGANESO**

Tabla 13: (Fig. 8) Lixiviación de óxido mangánico en medio sulfúrico normal (222% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

t (min)	20 °C		60 °C	
	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}
120	0,09	1,25	1,29	18,58

Concentración máxima de manganeso = 6,96 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

Tabla 14: (Fig. 9) Lixiviación de óxido mangánico en diferentes medios lixiviantes (60 gpl de Cl^- , 20 gpl de Fe^{2+} y 20 gpl de Fe^{3+} respectivamente; $T = 60\text{ °C}$)

t (min)	Medio salino (Cl^-)		Medio reductor (Fe^{2+})		Medio oxidante (Fe^{3+})	
	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}
120	2,88	41,32	6,05	86,87	0,18	2,65

Concentración máxima de manganeso = 6,96 gpl, para 60 gpl Cl^- , 20 gpl Fe^{2+} y 20 gpl Fe^{3+} .

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

Tabla 15: (Fig. 10) Lixiviación de óxido manganeso en medio sulfúrico normal (334% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

t (min)	20 °C		60 °C	
	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}
120	7,35	94,86	7,30	94,23

Concentración máxima de manganeso = 7,75 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

Tabla 16: (Fig. 11) Lixiviación de óxido manganeso en diferentes medios lixiviantes (60 gpl de Cl^- , 20 gpl de Fe^{2+} y 20 gpl de Fe^{3+} respectivamente; $T=60\text{ °C}$)

t (min)	Medio salino (Cl^-)		Medio reductor (Fe^{2+})		Medio oxidante (Fe^{3+})	
	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}
120	6,53	84,21	6,23	80,34	6,78	87,55

Concentración máxima de manganeso = 7,75 gpl, para 60 gpl Cl^- , 20 gpl Fe^{2+} y 20 gpl Fe^{3+} .

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

ANEXO D

FORMACION DE COMPUESTOS DOBLES

CONDICIONES EXPERIMENTALES

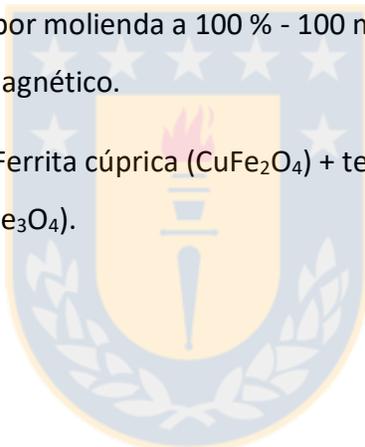
D-1 FORMACION DE FERRITA CUPRICA (CuFe_2O_4)

D-1.1 FORMACION DE FERRITA CUPRICA (CuFe_2O_4) RAZON 1/1 ($\text{CuO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Reactivo cargado	: 33.25 % CuO (sintetizado) 66.75 % Fe_2O_3 (sintetizado) Briquetas
Horno	: Horizontal tubular 6 cm diámetro
Probeta	: navecilla de cerámico 5.15x1.55 cm
Temperatura	: 900 °C
Tiempo	: 48 horas
Atmosfera	: 300 cc/min aire
Producto obtenido	: por molienda a 100 % - 100 mallas; polvo gris claro, magnético.
Análisis DR-X	: Ferrita cúprica CuFe_2O_4 + tenorita CuO + hematita Fe_2O_3

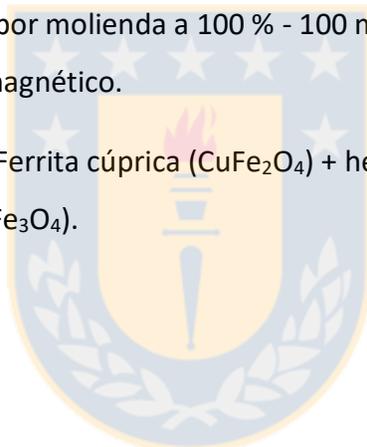
D-1.2 FORMACION DE FERRITA CUPRICA (CuFe₂O₄) RAZON 2/1 (CuO/Fe₂O₃)

Reactivo cargado	: 49.91 % CuO (sintetizado) 50.09 % Fe ₂ O ₃ (sintetizado) Briquetas
Horno	: Horizontal tubular 6 cm diámetro
Probeta	: navcilla de cerámico 5.15x1.55 cm
Temperatura	: 900 °C
Tiempo	: 48 horas
Atmosfera	: 300 cc/min aire
Producto obtenido	: por molienda a 100 % - 100 mallas; polvo gris claro, magnético.
Análisis DR-X	: Ferrita cúprica (CuFe ₂ O ₄) + tenorita (CuO) + magnetita (Fe ₃ O ₄).



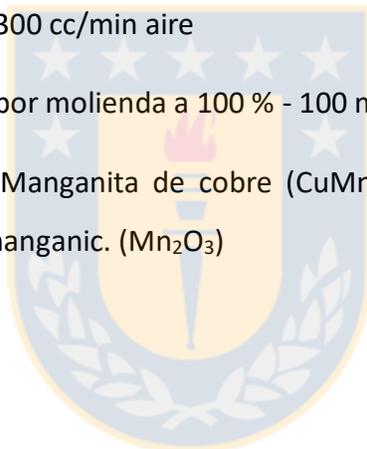
D-1.3 FORMACION DE FERRITA CUPRICA (CuFe₂O₄) RAZON 1/2 (CuO/Fe₂O₃)

Reactivo cargado	: 19.94 % CuO (sintetizado) 80.06 % Fe ₂ O ₃ (sintetizado) Briquetas
Horno	: Horizontal tubular 6 cm diámetro
Probeta	: navcilla de cerámico 5.15x1.55 cm
Temperatura	: 900 °C
Tiempo	: 48 horas
Atmosfera	: 300 cc/min aire
Producto obtenido	: por molienda a 100 % - 100 mallas; polvo gris claro, magnético.
Análisis DR-X	: Ferrita cúprica (CuFe ₂ O ₄) + hematita (Fe ₂ O ₃) + magnetita (Fe ₃ O ₄).



D-2 FORMACION DE MANGANITA DE COBRE (CuMn₂O₄)D-2.1 FORMACION DE MANGANITA DE COBRE (CuMn₂O₄) RAZON 1/1 (CuO/Mn₂O₃)

Reactivo cargado	: 33.50 % CuO (sintetizado) 66.50 % Mn ₂ O ₃ (sintetizado) Briquetas
Horno	: Horizontal tubular 6 cm diámetro
Probeta	: navcilla de cerámico 5.15x1.55 cm
Temperatura	: 750 °C
Tiempo	: 48 horas
Atmosfera	: 300 cc/min aire
Producto obtenido	: por molienda a 100 % - 100 mallas; polvo café oscuro.
Análisis DR-X	: Manganita de cobre (CuMn ₂ O ₄) + tenorita (CuO) + oxido manganic. (Mn ₂ O ₃)



D-2.2 FORMACION DE MANGANITA DE COBRE (CuMn₂O₄) RAZON 2/1 (CuO/Mn₂O₃)

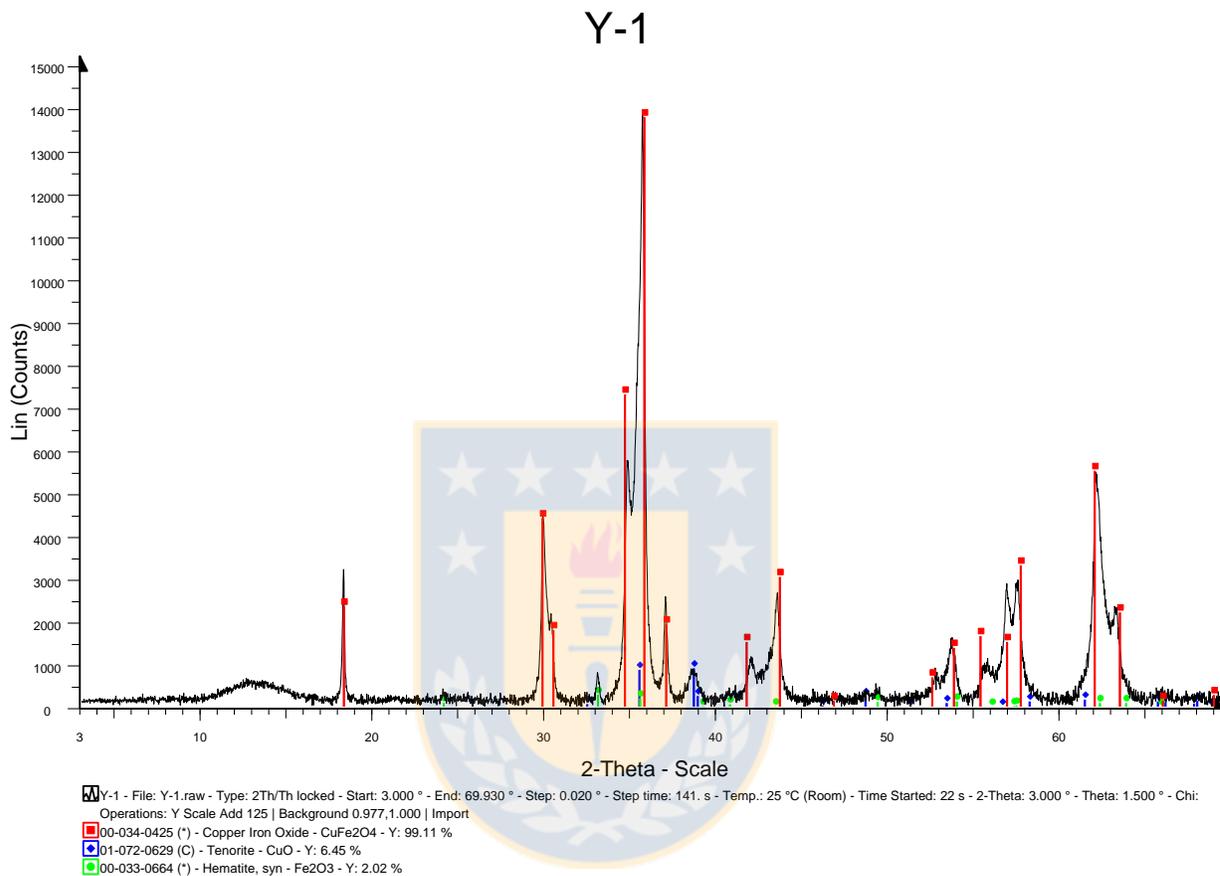
Reactivo cargado	: 50.19 % CuO (sintetizado) 49.81 % Mn ₂ O ₃ (sintetizado) Briquetas
Horno	: Horizontal tubular 6 cm diámetro
Probeta	: navcilla de cerámico 5.15x1.55 cm
Temperatura	: 750 °C
Tiempo	: 48 horas
Atmosfera	: 300 cc/min aire
Producto obtenido	: por molienda a 100 % - 100 mallas; polvo café oscuro.
Análisis DR-X	: Manganita de cobre (CuMn ₂ O ₄) + tenorita (CuO) + oxido manganic. (Mn ₂ O ₃)

D-2.3 FORMACION DE MANGANITA DE COBRE (CuMn₂O₄) RAZON 1/2 (CuO/Mn₂O₃)

Reactivo cargado	: 20.12 % CuO (sintetizado) 79.88 % Mn ₂ O ₃ (sintetizado) Briquetas
Horno	: Horizontal tubular 6 cm diámetro
Probeta	: navcilla de cerámico 5.15x1.55 cm
Temperatura	: 750 °C
Tiempo	: 48 horas
Atmosfera	: 300 cc/min aire
Producto obtenido	: por molienda a 100 % - 100 mallas; polvo café oscuro.
Análisis DR-X	: Manganita de cobre (CuMn ₂ O ₄) + tenorita (CuO) + oxido manganic. (Mn ₂ O ₃)

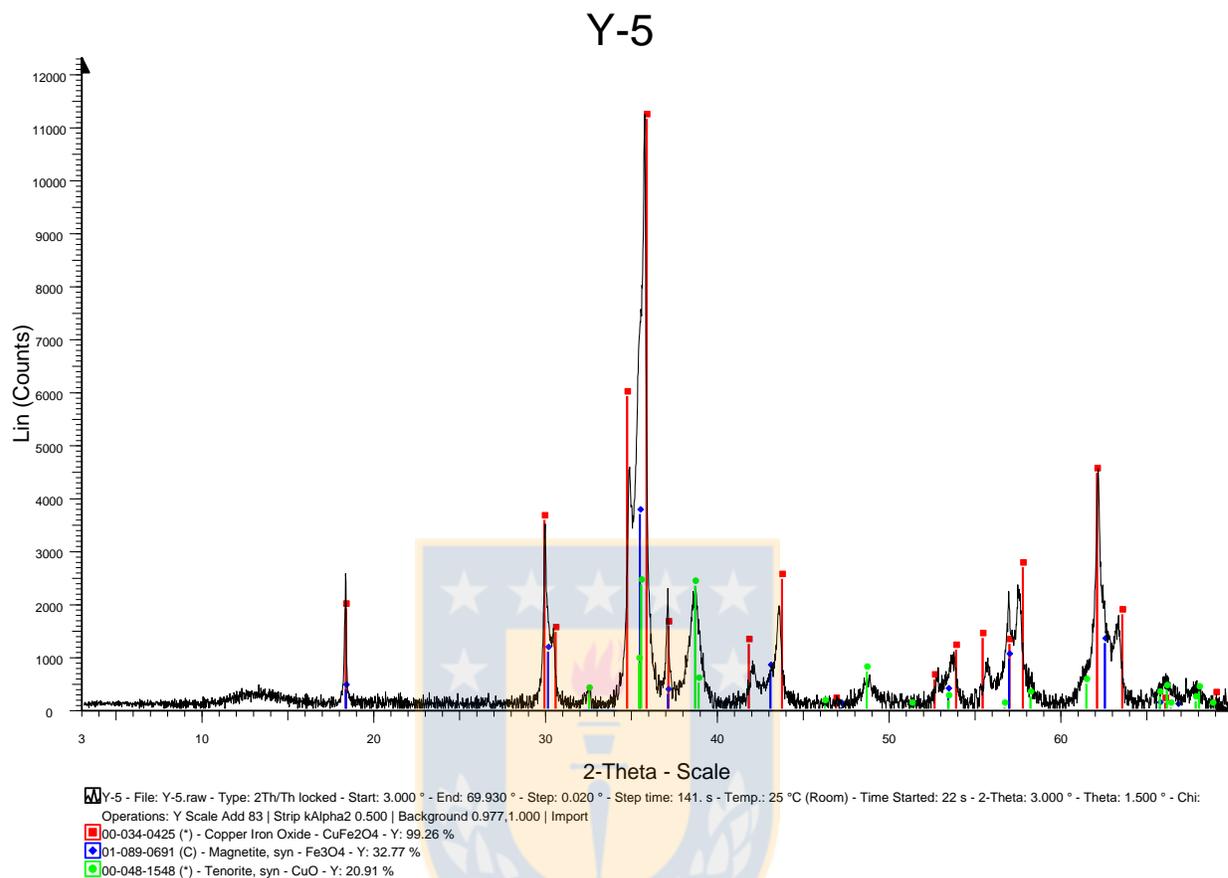
D-3 DIFRACTOGRAMAS PARA LA SINTESIS DE OXIDOS MIXTOS

Fig. 24 Difracción de rayos-X, para la ferrita cúprica con reactivos en proporción estequiométrica.



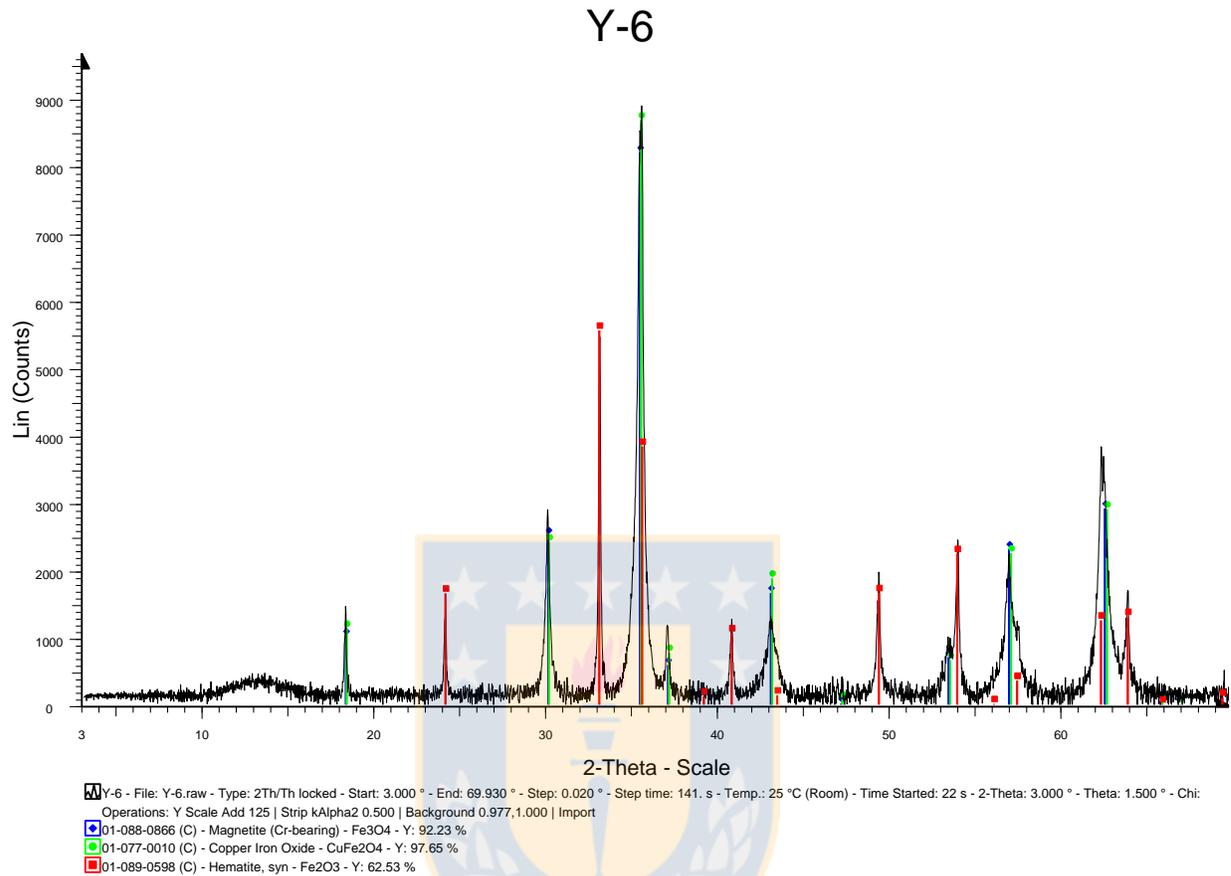
En la FIG. 24 se pudo apreciar como mediante reactivos en proporción estequiométrica alcanzaron una formación muy abundante de ferrita cúprica dejando casi despreciables los reactivos que no alcanzaron a conformar el compuesto buscado.

Fig. 25 Difracción de rayos-X, para la ferrita cúprica con reactivos en proporción 2/1 (CuO/Fe₂O₃).



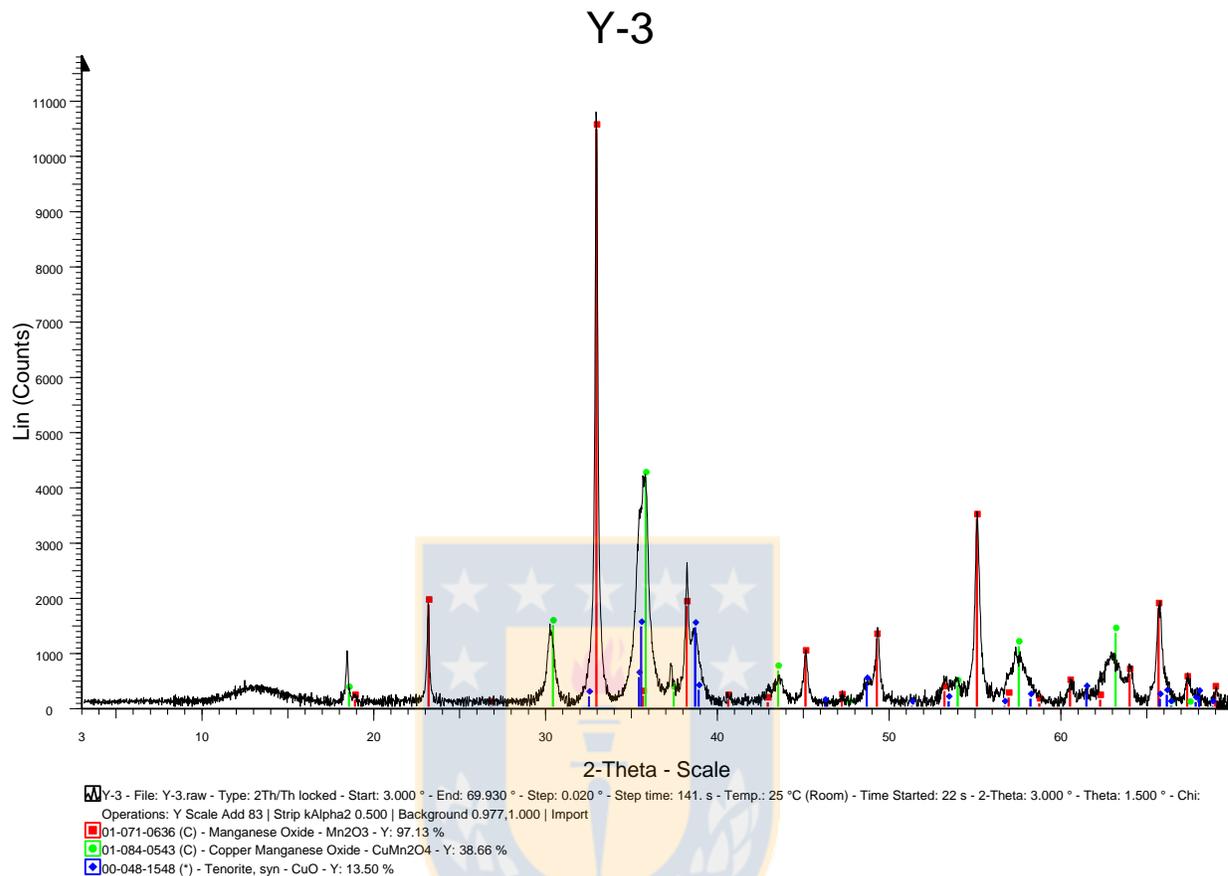
En la FIG. 25 se pudo apreciar como mediante reactivos en proporción 2/1 (CuO/Fe₂O₃) alcanzaron una formación muy abundante de ferrita cúprica, pero esta vez dejando reactivo en formación y descomposición como lo que pasa con la tenorita (poco abundante) y magnetita (poco abundante) respectivamente.

Fig. 26 Difracción de rayos-X, para la ferrita cúprica con reactivos en proporción 1/2 (CuO/Fe₂O₃).



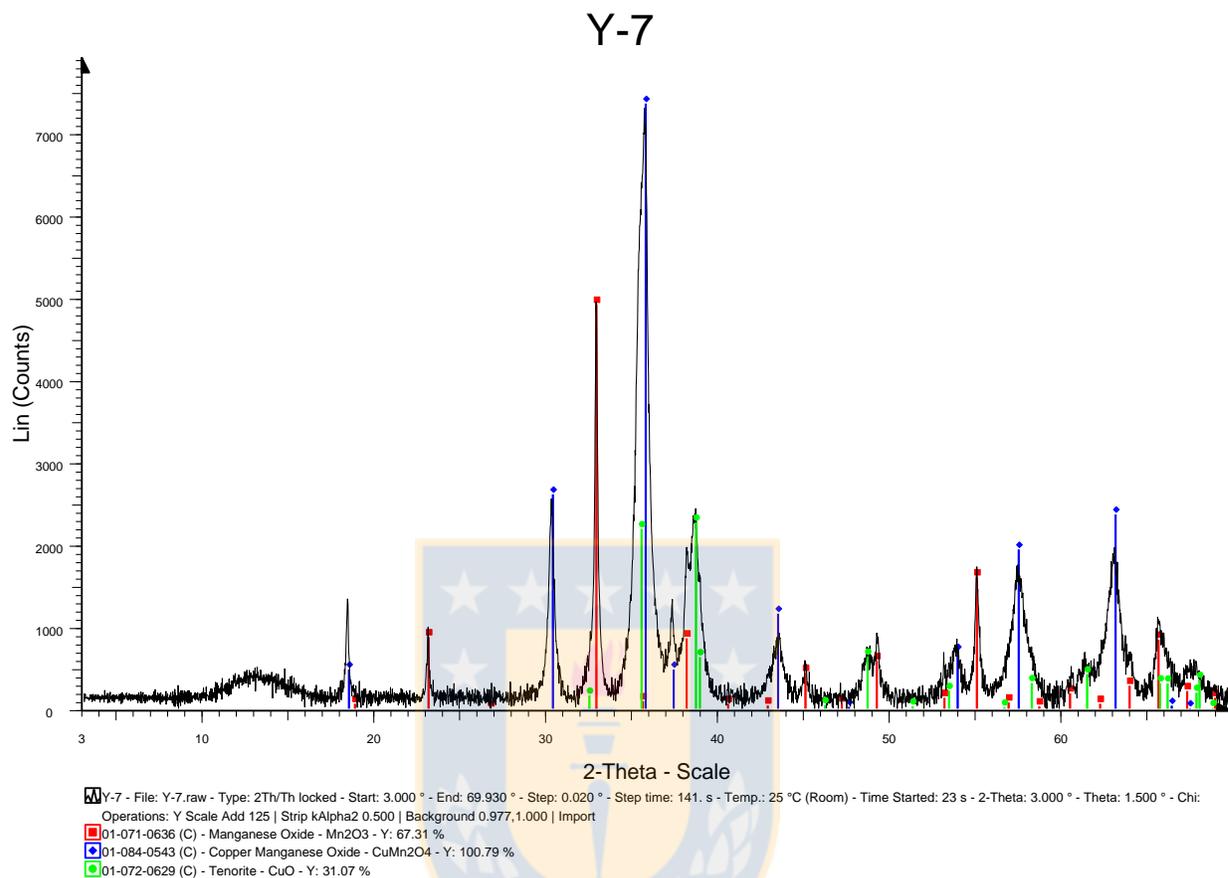
En la FIG. 26 se pudo apreciar como mediante reactivos en proporción 1/2 (CuO/Fe₂O₃) alcanzaron una formación muy abundante de ferrita cúprica (aproximadamente un 60% en masa), pero dejando reactivo en formación y descomposición como lo que pasa con la hematita (abundante) y magnetita (poco abundante) respectivamente, reaccionando en un 100% la tenorita utilizada como reactivo.

Fig. 27 Difracción de rayos-X, para la manganita de cobre (CuMn_2O_4) con reactivos en proporción 1/1 ($\text{CuO}/\text{Mn}_2\text{O}_3$).



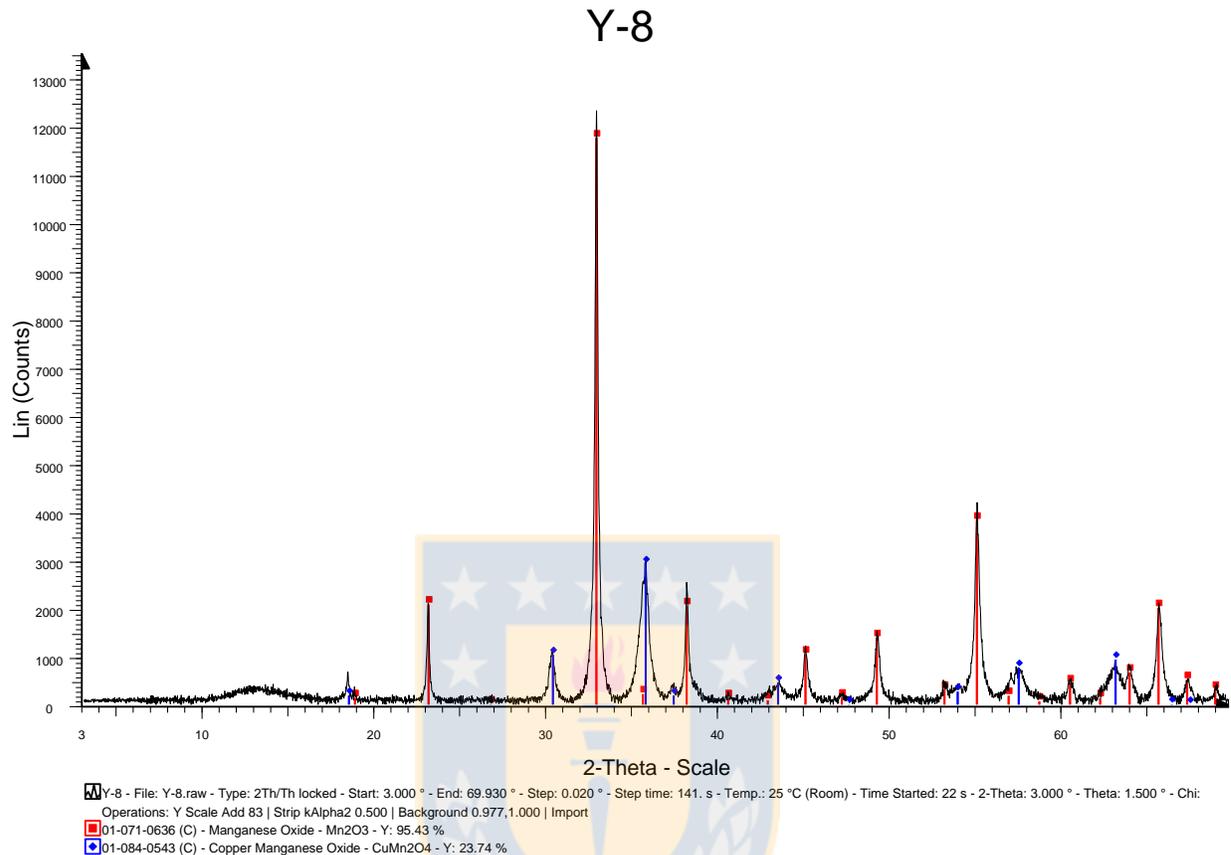
En la FIG. 27 se pudo apreciar como mediante reactivos en proporción 1/1 ($\text{CuO}/\text{Mn}_2\text{O}_3$) alcanzaron una formación abundante de manganita de cobre (CuMn_2O_4), dejando reactivo en formación como lo que pasa con la tenorita (poco abundante) y oxido de manganeso (III) (muy abundante), este último en mayor cantidad que el compuesto buscado.

Fig. 28 Difracción de rayos-X, para la manganita de cobre (CuMn_2O_4) con reactivos en proporción 2/1 ($\text{CuO}/\text{Mn}_2\text{O}_3$).



En la FIG. 28 se pudo apreciar como mediante reactivos en proporción 2/1 ($\text{CuO}/\text{Mn}_2\text{O}_3$) alcanzaron una formación muy abundante de manganita de cobre (CuMn_2O_4), dejando reactivo en formación como lo que pasa con la tenorita (abundante) y óxido de manganeso (III) (abundante).

Fig. 29 Difracción de rayos-X, para la manganita de cobre (CuMn_2O_4) con reactivos en proporción 1/2 ($\text{CuO}/\text{Mn}_2\text{O}_3$).



En la FIG. 29 se pudo apreciar como mediante reactivos en proporción 1/2 ($\text{CuO}/\text{Mn}_2\text{O}_3$) alcanzaron una formación poco abundante de manganita de cobre (CuMn_2O_4) (aproximadamente de un 60 % en masa), dejando reactivo en formación como lo que pasa con el óxido de manganeso (III) (muy abundante) y una reacción al 100% de la tenorita utilizada como reactivo.

ANEXO E**FORMACION DE COMPUESTO TRIPLE****CONDICIONES EXPERIMENTALES****E-1 FORMACION DE FERRITA DE COBRE Y FIERRO (CuMnFe₂O₅) RAZON 1/1/1****(CuO/Fe₂O₃/MnO)**

Reactivo cargado	: 25,65 % CuO 51,48 % Fe ₂ O ₃ (sintetizado) 22,87 % MnO (Pro-análisis MERCK) Briquetas
Horno	: Horizontal tubular 6 cm diámetro
Probeta	: navicilla de cerámico 5.15x1.55 cm
Temperatura	: 900 °C
Tiempo	: 48 horas
Atmosfera	: 506.8 cc/min N _{2(g)}
Producto obtenido	: por molienda a 100 % - 100 mallas; polvo gris.

ANEXO F**COMPUESTOS DOBLES Y TRIPLE DE COBRE, FIERRO Y MANGANESO**

Tabla 17: (Fig. 12) Lixiviación de ferrita cúprica en medio sulfúrico normal (266% de exceso de H₂SO₄ sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

t (min)	20 °C				60°C			
	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,10	3,98	0,01	0,23	0,34	14,27	0,15	3,34
30	0,12	4,77	0,02	0,34	0,37	15,38	0,20	4,44
60	0,15	6,26	0,02	0,38	0,41	17,17	0,25	5,46
90	0,18	7,46	0,02	0,42	0,46	18,99	0,30	6,56
120	0,21	8,83	0,02	0,46	0,50	20,89	0,41	9,01

Concentración máxima de cobre = 2,41 gpl.

Concentración máxima de fierro = 4,58 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

Tabla 18: (Fig. 13) Lixiviación de ferrita cúprica en diferentes medios lixiviantes (T= 20 °C)

t (min)	Medio salino (Cl ⁻)				Medio reductor (Fe ²⁺)				Medio oxidante (Fe ³⁺)				Medio cianurante (KCN)			
	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	--	--	0,00	0,00	--	--	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,05	2,03	0,01	0,31	0,07	3,07	--	--	0,10	3,98	--	--	0,05	2,08	0,00	0,00
30	0,11	4,59	0,02	0,35	0,12	5,16	--	--	0,17	6,90	--	--	0,05	2,26	0,00	0,00
60	0,14	5,90	0,02	0,39	0,14	5,75	--	--	0,18	7,27	--	--	0,06	2,36	0,00	0,01
90	0,18	7,31	0,02	0,42	0,18	7,66	--	--	0,19	7,80	--	--	0,06	2,47	0,00	0,01
120	0,23	9,63	0,02	0,47	0,22	8,96	--	--	0,20	8,38	--	--	0,08	3,25	0,00	0,02

Concentración máxima de cobre = 2,41 gpl.

Concentración máxima de hierro = 4,58 gpl para 60 gpl Cl⁻, 24,58 gpl para 20 gpl Fe²⁺, 24,58 gpl para 20 gpl Fe³⁺ y 4,58 gpl para 5 gpl KCN.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

Tabla 19: (Fig. 14) Lixiviación de ferrita cúprica en diferentes medios lixiviantes (T= 60 °C)

t (min)	Medio salino (Cl ⁻)				Medio reductor (Fe ²⁺)				Medio oxidante (Fe ³⁺)				Medio cianurante (KCN)			
	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	--	--	0,00	0,00	--	--	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,29	11,91	0,10	2,23	0,33	13,85	--	--	0,28	11,41	--	--	0,26	10,89	0,00	0,01
30	0,33	13,53	0,16	3,58	0,42	17,52	--	--	0,29	11,92	--	--	0,26	10,91	0,00	0,01
60	0,35	14,50	0,26	5,66	0,52	21,74	--	--	0,30	12,56	--	--	0,31	12,77	0,00	0,01
90	0,37	15,42	0,29	6,35	0,59	24,63	--	--	0,33	13,68	--	--	0,36	15,10	0,00	0,01
120	0,40	16,81	0,36	7,81	0,68	28,04	--	--	0,37	15,36	--	--	0,37	15,15	0,00	0,01

Concentración máxima de cobre = 2,41 gpl.

Concentración máxima de hierro = 4,58 gpl para 60 gpl Cl⁻, 24,58 gpl para 20 gpl Fe²⁺ y 24,58 gpl para 20 gpl Fe³⁺, 4,58 gpl para 5 gpl KCN.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.



Tabla 20: (Fig. 15) Influencia de la temperatura y de los medios lixiviantes en la extracción de cobre desde la ferrita cúprica. (t = 120 min.)

Influencia de la temperatura y los medios lixiviantes para CuFe_2O_4		
%E Cu	Medio	Temperatura (°C)
8,83	Sulfúrico Normal	20
20,89		60
9,63	Lixiviación salina	20
16,81		60
8,96	Acido - reductor	20
28,04		60
8,38	Acido - oxidante	20
15,36		60
3,25	Cianurante	20
15,15		60

Tabla 21: (Fig. 16) Lixiviación de manganita de cobre en medio sulfúrico normal (263% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

t (min)	20 °C				60 °C			
	Cu^{2+} (gpl)	%E _{Cu}	Mn^{2+} (gpl)	%E _{Mn}	Cu^{2+} (gpl)	%E _{Cu}	Mn^{2+} (gpl)	%E _{Mn}
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,45	37,27	0,05	1,81	2,55	65,53	0,80	27,94
30	1,77	45,52	0,11	3,66	2,78	71,34	0,96	33,40
60	1,85	47,60	0,15	5,29	2,88	73,93	1,05	36,53
90	1,91	49,03	0,18	6,12	2,92	75,16	1,09	38,07
120	1,96	50,44	0,20	7,04	2,97	76,40	1,14	39,77

Concentración máxima de cobre = 3,89 gpl.

Concentración máxima de manganeso = 2,87 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.



Tabla 22: (Fig. 17) Lixiviación de manganita de cobre en diferentes medios lixiviantes (T= 20 °C)

t (min)	Medio salino (Cl ⁻)				Medio reductor (Fe ²⁺)				Medio oxidante (Fe ³⁺)				Medio cianurante (KCN)			
	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Mn ²⁺ (gpl)	%E _{Mn}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Mn ²⁺ (gpl)	%E _{Mn}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Mn ²⁺ (gpl)	%E _{Mn}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Mn ²⁺ (gpl)	%E _{Mn}
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,24	31,74	0,04	1,46	2,54	65,24	2,69	93,47	1,51	38,88	0,18	6,22	0,05	1,29	0,00	0,01
30	1,79	46,03	0,08	2,78	3,01	77,45	2,72	94,62	2,05	52,74	0,23	7,83	0,11	2,73	0,00	0,01
60	1,87	48,18	0,11	3,72	3,38	86,99	2,75	95,72	2,25	57,83	0,30	10,46	0,14	3,67	0,00	0,01
90	1,98	50,91	0,15	5,19	3,61	92,73	2,78	96,81	2,52	64,82	0,40	13,75	0,20	5,07	0,00	0,02
120	1,99	51,16	0,19	6,58	3,70	95,11	2,81	97,93	2,90	74,57	0,50	17,26	0,21	5,45	0,00	0,02

Concentración máxima de cobre = 3,89 gpl.

Concentración máxima de manganeso = 2,87 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.



Tabla 23: (Fig. 18) Lixiviación de manganita de cobre en diferentes medios lixiviantes (T= 60 °C)

t (min)	Medio salino (Cl ⁻)				Medio reductor (Fe ²⁺)				Medio oxidante (Fe ³⁺)				Medio cianurante (KCN)				
	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Mn ²⁺ (gpl)	%E _{Mn}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Mn ²⁺ (gpl)	%E _{Mn}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Mn ²⁺ (gpl)	%E _{Mn}	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Mn ²⁺ (gpl)	%E _{Mn}	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	3,25	83,54	0,98	33,93	3,43	88,02	2,66	92,45	2,95	75,82	0,80	27,84	0,47	11,95	0,00	0,00	0,00
30	3,40	87,50	1,44	49,97	3,56	91,38	2,70	93,84	3,00	77,04	0,83	29,00	0,91	23,43	0,00	0,00	0,00
60	3,44	88,37	1,79	62,18	3,65	93,86	2,74	95,44	3,05	78,43	0,87	30,25	1,24	31,76	0,00	0,00	0,00
90	3,48	89,46	1,98	68,99	3,75	96,27	2,79	96,92	3,09	79,52	0,91	31,58	1,35	34,60	0,00	0,00	0,00
120	3,52	90,59	2,04	71,11	3,82	98,22	2,82	98,14	3,16	81,11	0,96	33,26	1,36	34,88	0,00	0,00	0,00

Concentración máxima de cobre = 3,89 gpl.

Concentración máxima de manganeso = 2,87 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.



Tabla 24: (Fig. 19) Influencia de la temperatura y de los medios lixiviantes en la extracción de cobre desde la manganita de cobre. (t = 120 min.)

Influencia de la temperatura y los medios lixiviantes para CuMn_2O_4		
%E Cu	Medio	Temperatura (°C)
50,44	Sulfúrico Normal	20
76,40		60
51,16	Lixiviación salina	20
90,59		60
95,11	Acido - reductor	20
98,22		60
74,57	Acido - oxidante	20
81,11		60
5,45	Cianurante	20
34,88		60



Tabla 25: (Fig. 20) Lixiviación de la ferrita de cobre y manganeso en medio sulfúrico normal (280% de exceso de H_2SO_4 sobre el estequiométrico) a diferentes temperaturas

t (min)	20 °C						60 °C					
	Cu^{2+} (gpl)	% E_{Cu}	Fe_T (gpl)	% E_{Fe}	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}	Cu^{2+} (gpl)	% E_{Cu}	Fe_T (gpl)	% E_{Fe}	Mn^{2+} (gpl)	% E_{Mn}
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,03	1,86	0,01	0,39	0,01	0,41	0,31	16,54	0,23	6,74	0,12	7,57
30	0,06	3,08	0,03	0,74	0,01	0,78	0,33	17,55	0,24	7,10	0,13	7,92
60	0,07	3,54	0,03	0,79	0,01	0,82	0,34	18,32	0,27	7,84	0,13	8,44
90	0,08	4,14	0,06	1,62	0,02	1,10	0,36	19,12	0,29	8,60	0,14	8,87
120	0,11	5,61	0,06	1,74	0,02	1,48	0,37	19,98	0,33	9,53	0,15	9,30

Concentración máxima de cobre = 1,87 gpl.

Concentración máxima de hierro = 3,43 gpl.

Concentración máxima de manganeso = 1,59 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.



Tabla 26: (Fig. 21) Lixiviación de ferrita de cobre y manganeso en diferentes medios lixiviantes (T= 20 °C)

t (min)	Medio salino (Cl ⁻)					
	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}	Mn ²⁺ (gpl)	%E _{Mn}
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,07	3,87	0,02	0,70	0,01	0,62
30	0,09	4,54	0,04	1,04	0,01	0,76
60	0,11	5,66	0,05	1,41	0,02	1,05
90	0,13	6,95	0,06	1,66	0,02	1,42
120	0,18	9,72	0,09	2,69	0,04	2,38
			Medio reductor (Fe ²⁺)			
0	0,00	0,00	--	--	0,00	0,00
10	0,04	1,87	--	--	0,03	2,17
30	0,06	3,12	--	--	0,04	2,76
60	0,07	3,95	--	--	0,05	3,20
90	0,10	5,45	--	--	0,06	3,77
120	0,12	6,49	--	--	0,08	5,14
			Medio oxidante (Fe ³⁺)			
0	0,00	0,00	--	--	0,00	0,00
10	0,06	3,18	--	--	0,03	2,19
30	0,07	3,78	--	--	0,04	2,39
60	0,09	5,05	--	--	0,04	2,70
90	0,12	6,32	--	--	0,05	2,94
120	0,14	7,35	--	--	0,05	3,20
			Medio cianurante (KCN)			
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,01	0,29	0,00	0,01	0,00	0,01
30	0,01	0,62	0,00	0,01	0,00	0,01
60	0,01	0,67	0,00	0,01	0,00	0,01
90	0,01	0,72	0,00	0,01	0,00	0,01
120	0,01	0,72	0,00	0,02	0,00	0,02

Concentración máxima de cobre = 1,87 gpl.

Concentración máxima de hierro = 3,43 gpl para 60 gpl Cl⁻, 23,43 gpl para 20 gpl Fe²⁺, 23,43 gpl para 20 gpl Fe³⁺ y 3,43 gpl para 5 gpl KCN.

Concentración máxima de manganeso = 1,59 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl.

Tabla 27: (Fig. 22) Lixiviación de ferrita de cobre y manganeso en diferentes medios lixiviantes (T= 60 °C)

t (min)	Medio salino (Cl ⁻)					
	Cu ²⁺ (gpl)	%E _{Cu}	Fe _T (gpl)	%E _{Fe}	Mn ²⁺ (gpl)	%E _{Mn}
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,48	25,74	0,38	11,01	0,17	10,88
30	0,51	27,39	0,49	14,34	0,22	13,80
60	0,55	29,31	0,59	17,23	0,25	15,57
90	0,62	32,94	0,66	19,28	0,29	18,38
120	0,65	34,51	0,79	23,05	0,31	19,35
			Medio reductor (Fe ²⁺)			
0	0,00	0,00	--	--	0,00	0,00
10	0,45	23,87	--	--	0,23	14,18
30	0,55	29,32	--	--	0,30	18,97
60	0,65	34,84	--	--	0,36	22,38
90	0,70	37,45	--	--	0,41	25,86
120	0,81	43,07	--	--	0,48	30,49
			Medio oxidante (Fe ³⁺)			
0	0,00	0,00	--	--	0,00	0,00
10	0,50	26,68	--	--	0,18	11,35
30	0,52	27,69	--	--	0,21	13,15
60	0,55	29,13	--	--	0,23	14,42
90	0,58	30,95	--	--	0,24	15,36
120	0,61	32,44	--	--	0,26	16,15
			Medio cianurante (KCN)			
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	1,12	0,00	0,01	0,00	0,00
30	0,01	1,68	0,00	0,01	0,00	0,00
60	0,01	2,30	0,00	0,02	0,00	0,00
90	0,01	2,85	0,00	0,02	0,00	0,00
120	0,01	2,88	0,00	0,02	0,00	0,00

Concentración máxima de cobre = 1,87 gpl.

Concentración máxima de hierro = 3,43 gpl para 60 gpl Cl⁻, 23,43 gpl para 20 gpl Fe²⁺ y 23,43 gpl para 20 gpl Fe³⁺.

Concentración máxima de manganeso = 1,59 gpl.

Concentración inicial de ácido sulfúrico = 60 gpl

Tabla 28: (Fig. 23) Influencia de la temperatura y de los medios lixiviantes en la extracción de cobre desde la ferrita de cobre y manganeso. (t = 120 min.)

Influencia de la temperatura y los medios lixiviantes para $\text{CuMnFe}_2\text{O}_5$		
%E Cu	Medio	Temperatura (°C)
5,61 19,98	Sulfúrico Normal	20
		60
9,72 34,51	Lixiviación salina	20
		60
6,49 43,07	Acido - reductor	20
		60
7,35 32,44	Acido - oxidante	20
		60
0,72 2,88	Cianurante	20
		60



ANEXO G

DIAGRAMAS DE ESTABILIDAD



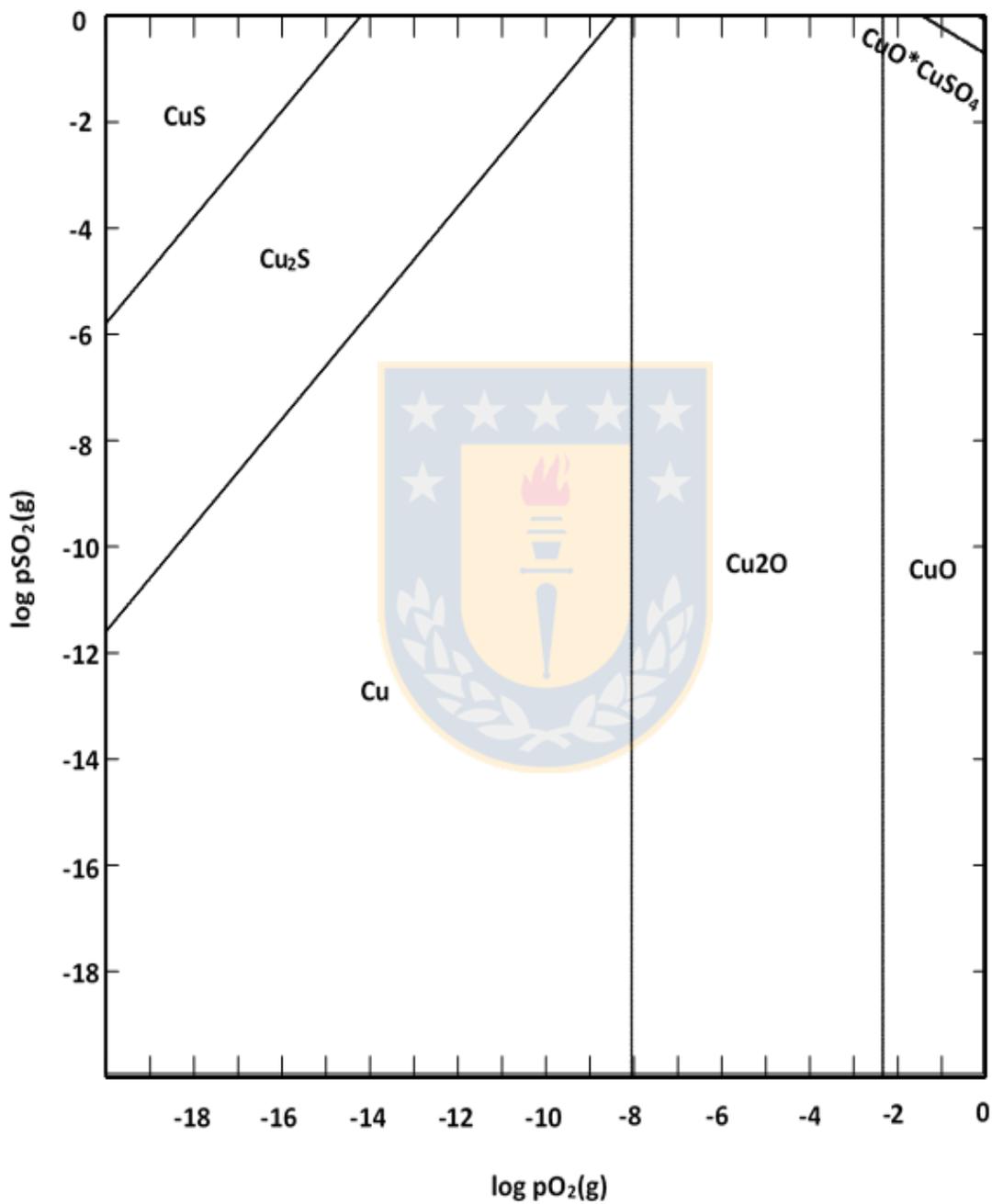


Fig. 30 Diagrama de estabilidad de fases para el sistema Cu – S – O a 850 °C

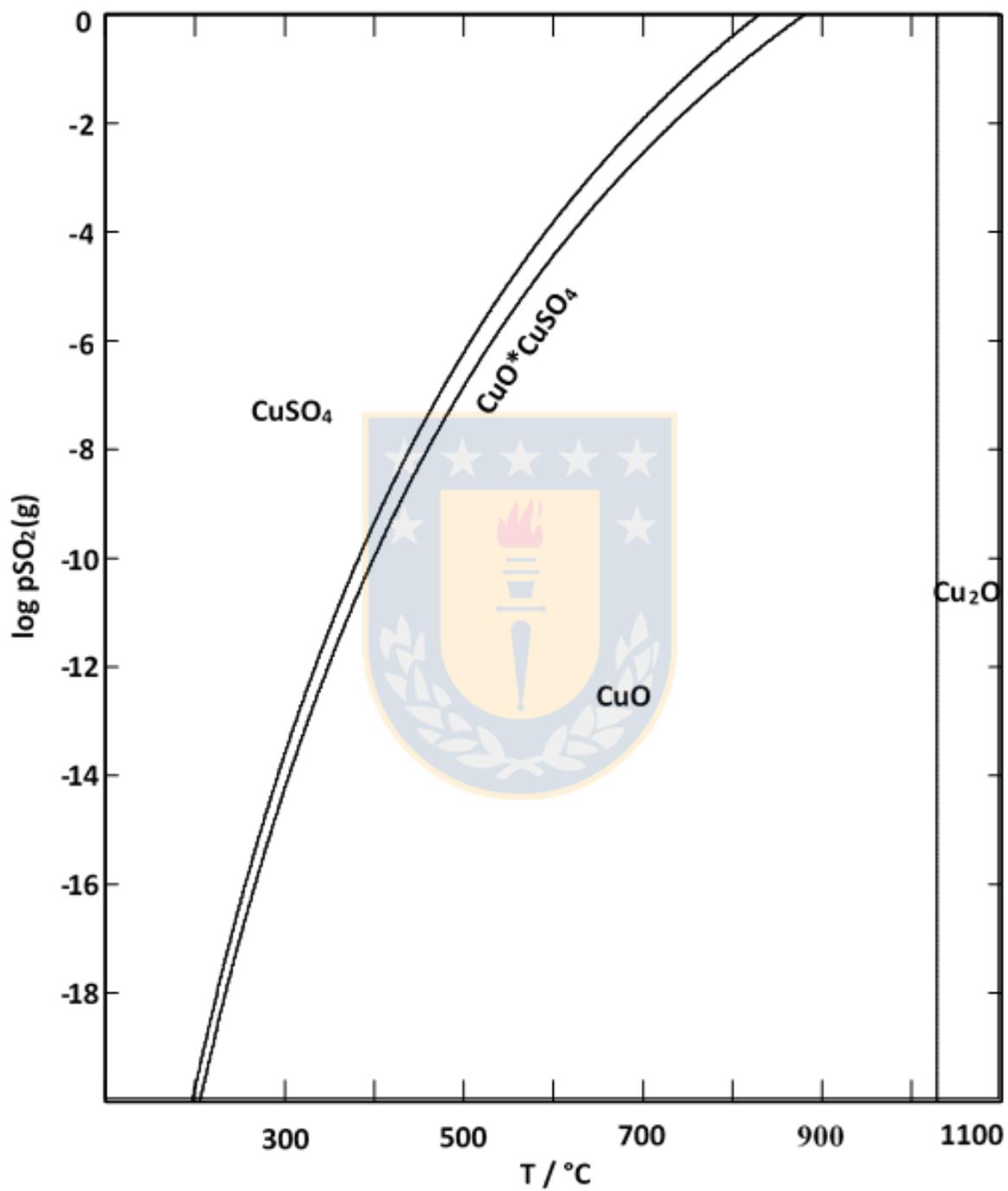


Fig. 31 Diagrama de estabilidad de fases para el sistema Cu – S – O a distintas temperaturas y $p\text{O}_2(\text{g}) = 0.21 \text{ atm}$

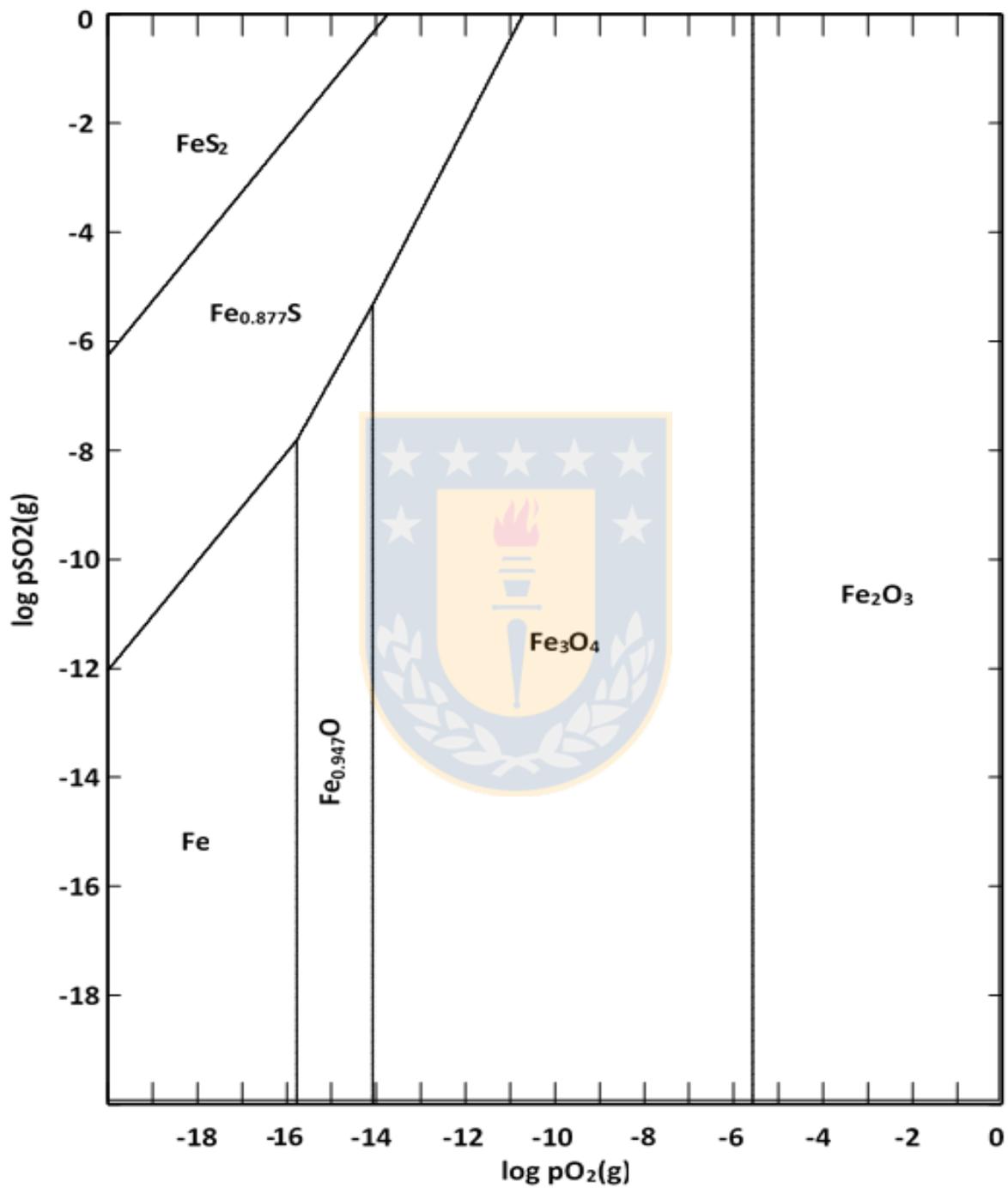


Fig. 32 Diagrama de estabilidad de fases para el sistema Fe – S – O A 950 °C

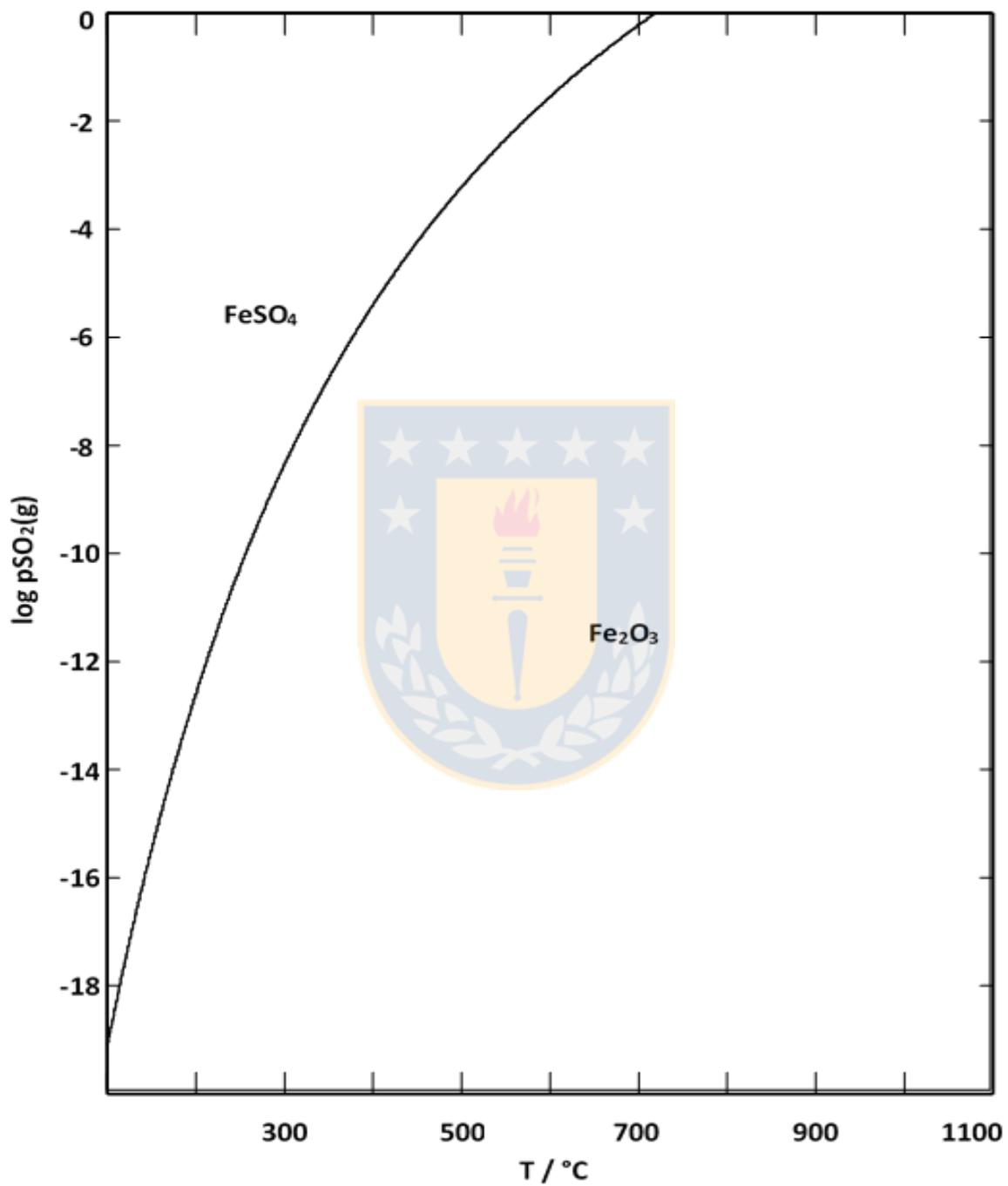


Fig. 33 Diagrama de estabilidad de fases para el sistema Fe – S – O a distintas temperaturas y $p_{\text{O}_2(\text{g})} = 0.21 \text{ atm}$

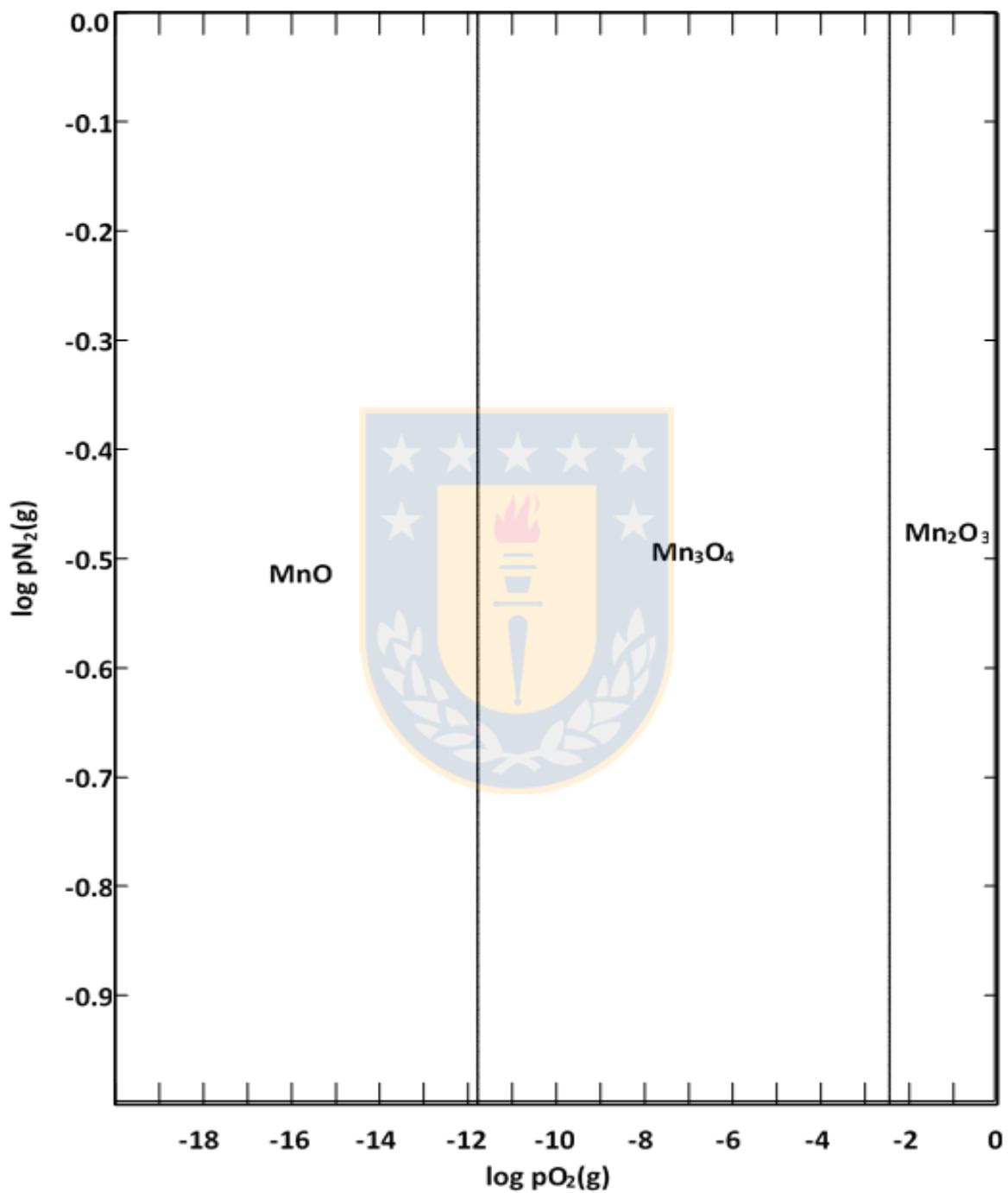


Fig. 34 Diagrama de estabilidad de fases para sistema Mn – N – O A 700 °C

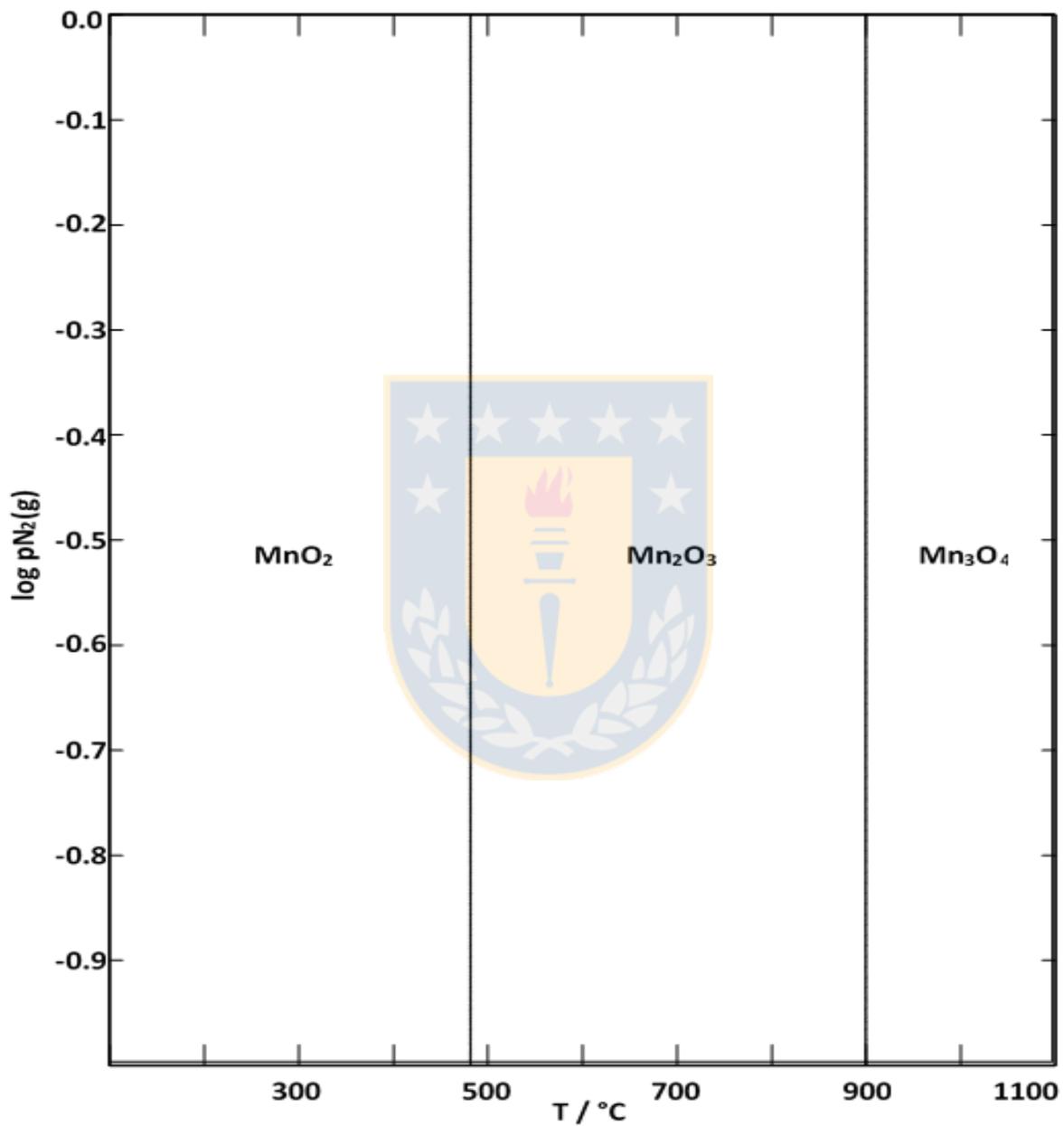


Fig. 35 Diagrama de estabilidad de fases para el sistema Mn – N – O a distintas temperaturas y $p_{\text{O}_2(\text{g})} = 0.21 \text{ atm}$

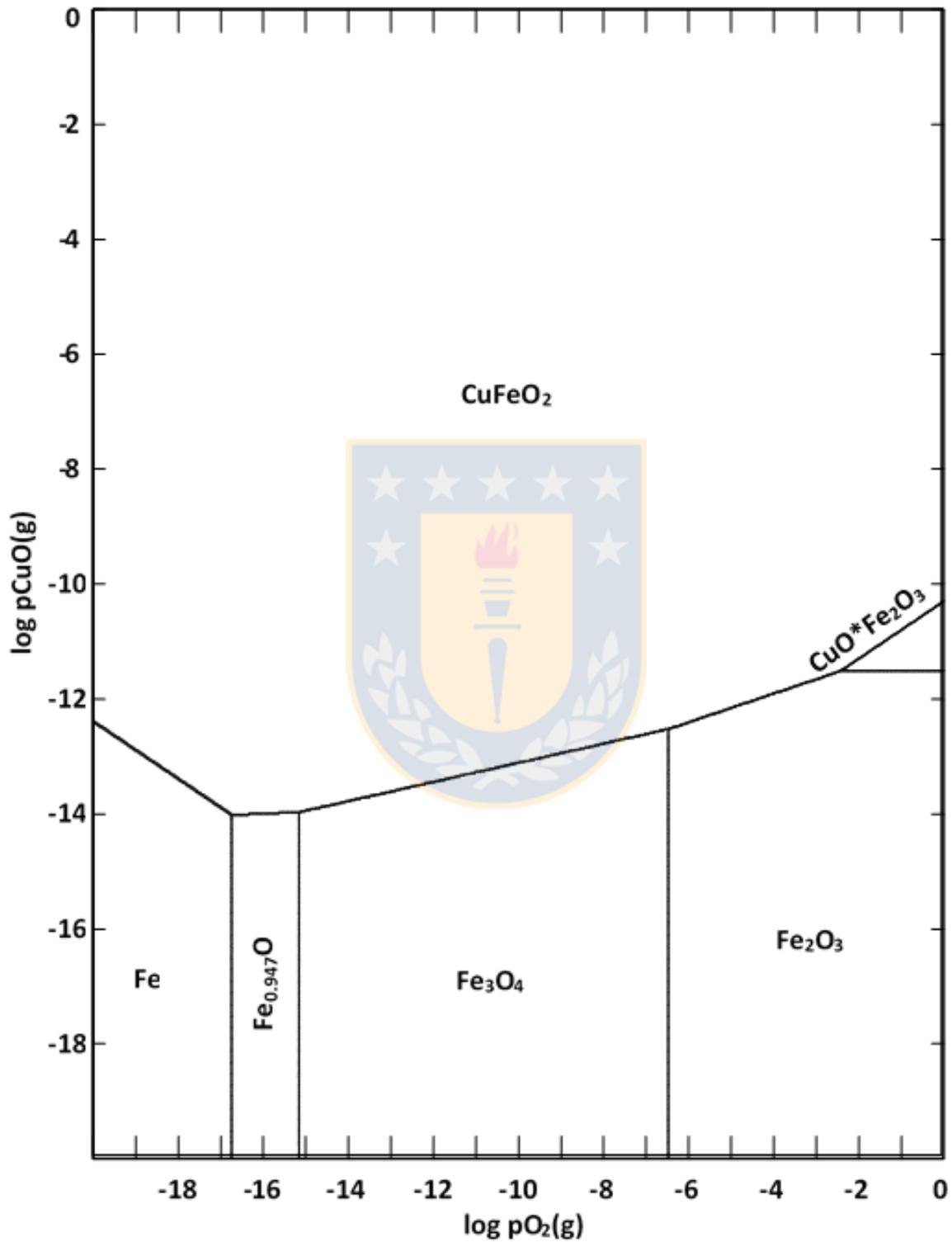


Fig. 36 Diagrama de estabilidad de fases para el sistema Cu – Fe – O a 900 °C

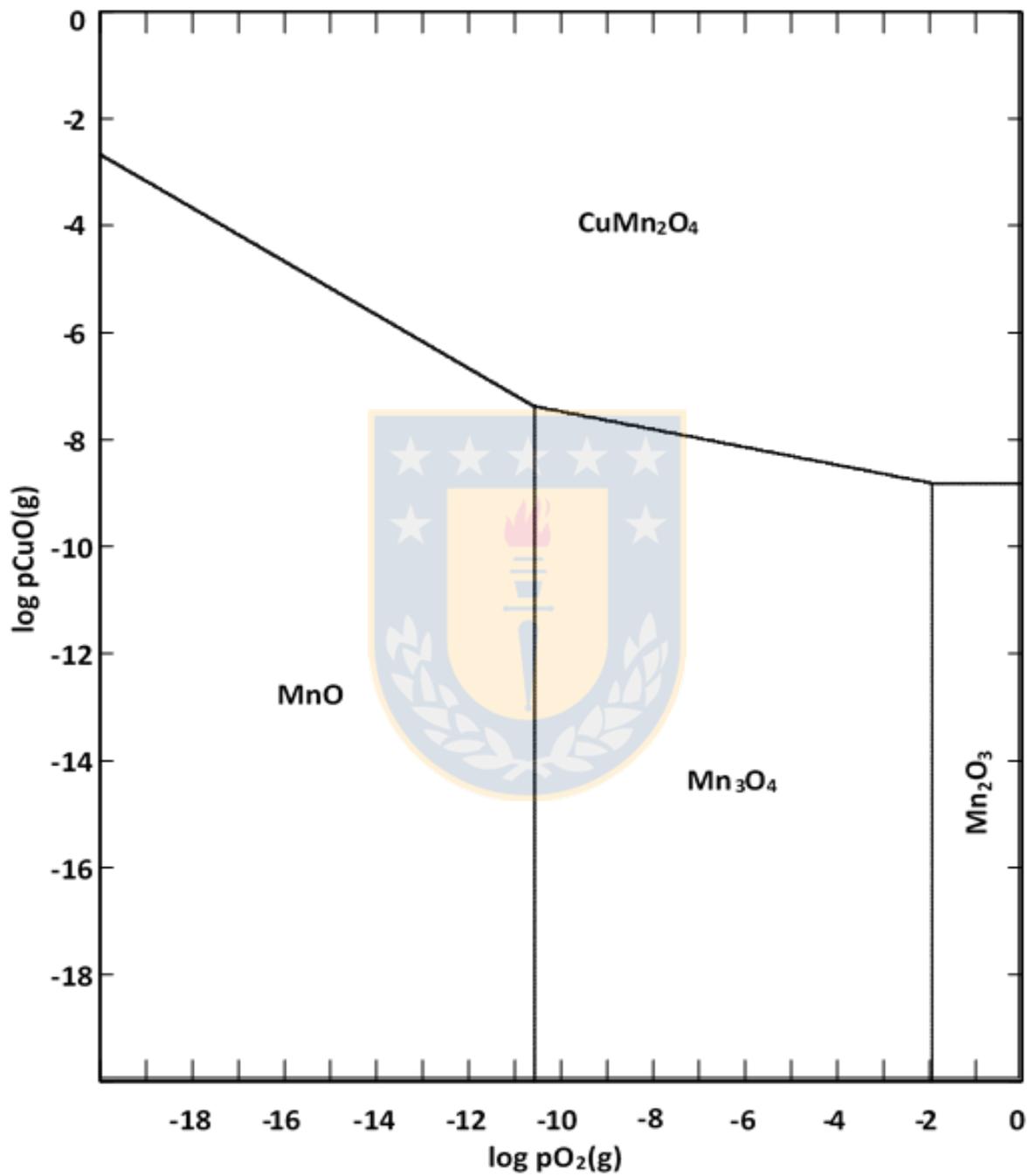


Fig. 37 Diagrama de estabilidad de fases para el sistema Cu – Mn – O a 750 °C

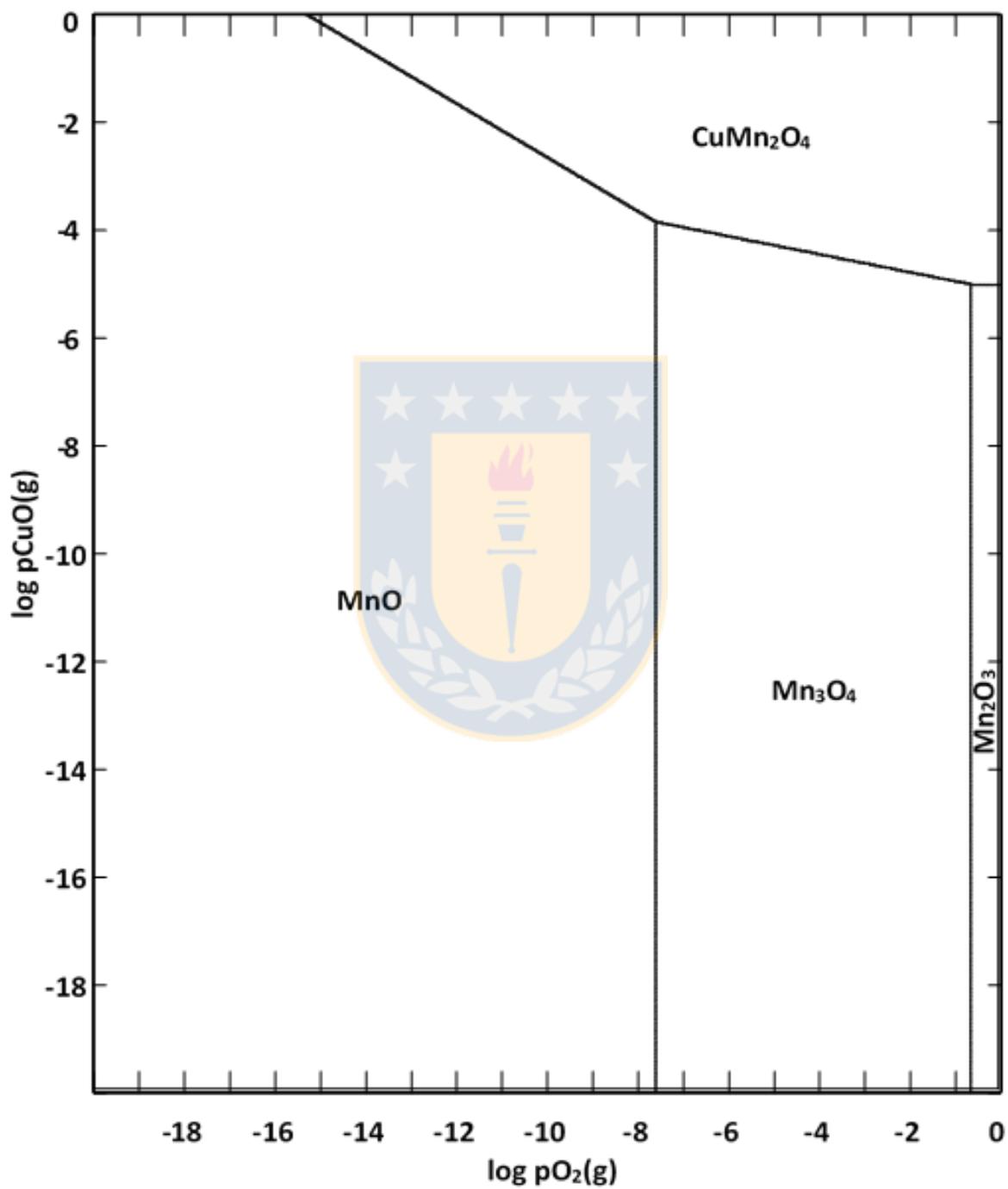


Fig. 38 Diagrama de estabilidad de fases para el sistema Cu – Mn – O a 900 °C

ANEXO H

FORMACION DE OXIDOS SIMPLES

CONDICIONES EXPERIMENTALES

H-1 FORMACION DE TENORITA (CuO)

Reactivo cargado	: CuSO ₄ (grado técnico) en forma de polvo
Horno	: Mufla
Probeta	: navecilla de acero 20x25cm
Temperatura	: 850 °C
Tiempo	: 2 horas
Atmosfera	: estándar
Producto obtenido	: por molienda a 100 % - 100 mallas; polvo negro.
Análisis DR-X	: tenorita (CuO).

H-2 FORMACION DE HEMATITA (Fe₂O₃)

Reactivo cargado	: FeSO ₄ (grado técnico) en forma de polvo
Horno	: Mufla
Probeta	: navecilla de acero 20x25cm
Temperatura	: 950 °C
Tiempo	: 2 horas
Atmosfera	: estándar
Producto obtenido	: por molienda a 100 % - 100 mallas; polvo rojo granate.
Análisis DR-X	: Hematita (Fe ₂ O ₃).

H-3 FORMACION DE OXIDO MANGANICO (Mn₂O₃)

Reactivo cargado : Mn_(s) (metálico, grado técnico) en forma de polvo

Horno : Mufla

Probeta : navecilla de acero 20x25cm

Temperatura : 700 °C

Tiempo : 24 horas

Atmosfera : estándar

Producto obtenido : por molienda a 100 % - 100 mallas; polvo negro.

Análisis químico : Oxido mangánico (Mn₂O₃).



H-4 DIFRACTOGRAMAS PARA LA FORMACION DE OXIDOS SIMPLES

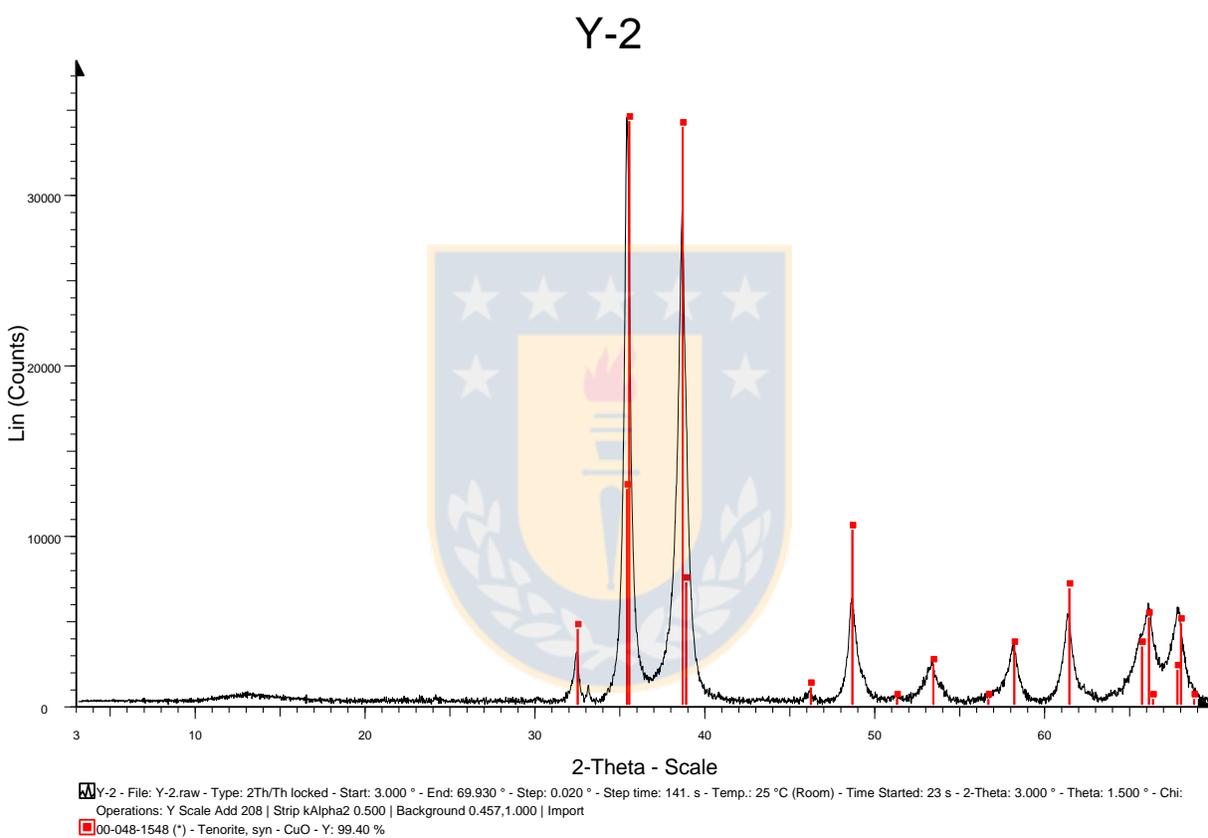


Fig. 39 Difracción de rayos-X, para la tenorita.

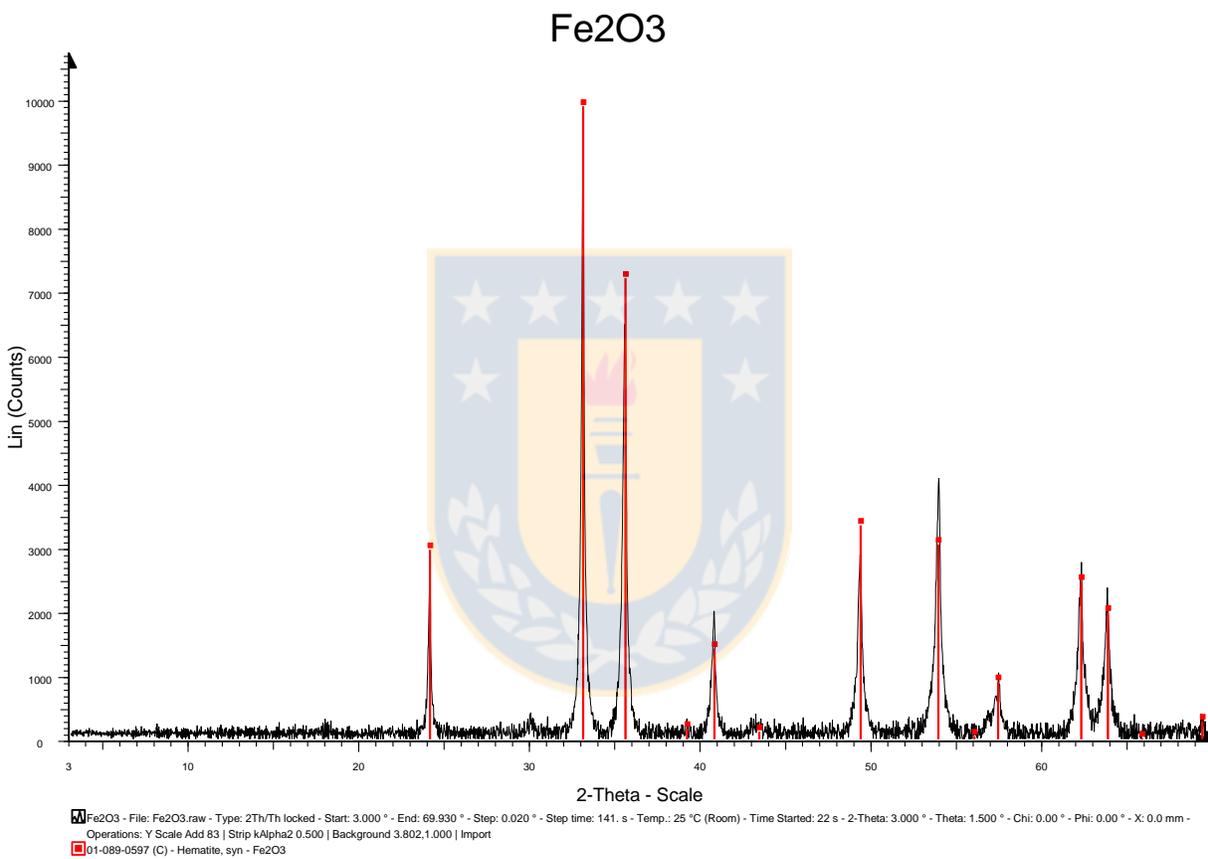


Fig. 40 Difracción de rayos-X, para la hematita.

H-5 ANALISIS QUIMICO PARA LA FORMACION DE OXIDO MANGANICO

Tabla 29: Análisis químico del óxido mangánico.

Teórico	Análisis químico
Manganeso (%)	Manganeso (%)
69.60	69.5



ANEXO I**IMÁGENES DE LOS EQUIPOS EXPERIMENTALES**

Fig. 41 Prensa Hidráulica.



Fig. 42 Horno Horizontal tubular.



Fig. 43 Horno Horizontal tubular.



Fig. 44 Vaso de reacción con filtración al vacío.



Fig. 45 pH – Metro.



Fig. 46 Sistema de agitación mecánico.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Estudio de lixiviación de óxidos sintéticos de Cu-Fe-Mn como base para explicar el comportamiento de los óxidos negros
Nombre Memorista: Yerko Alejandro Contreras Cerón

Modalidad		Profesor(es) Patrocinante(s)	
Concepto			
Calificación			
Fecha	04/01/2019	Prof. Fernando Parada L.	Prof. Andrés Reghezza I.
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Ingeniero Supervisor:	
		Institución:	

Comisión (Nombre y Firma)
Prof. Froilán Vergara G.

Resumen
<p>Los óxidos negros se definen como una serie de compuestos y mineraloides de tonalidades oscuras, de difícil reconocimiento, complejidad mineralógica y asociaciones polimetálicas refractarias a la acción ácida y de una lenta cinética disolutiva en los sistemas convencionales de lixiviación, lo cual representa un problema para el tratamiento hidrometalúrgico de menas de cobre que contienen este tipo de mineral. Estos óxidos se encuentran en yacimientos exóticos que están en sectores alejados a los pórfidos cupríferos andinos y como elementos mayoritarios destacan el Cu, Mn y Fe.</p> <p>En esta memoria se planteó el determinar las mejores condiciones disolutivas y el medio lixivante más adecuado para extraer el cobre desde compuestos de óxidos mixtos y triples de cobre, hierro y manganeso. Estos compuestos fueron sintetizados a escala laboratorio y son una buena aproximación de los óxidos negros antes mencionados. Posteriormente se estudió su lixiviación en diferentes medios: utilizando ácido sulfúrico se realizó una lixiviación estándar, una lixiviación acida salina, una lixiviación acida con sulfato ferroso y una lixiviación acida oxidante, además, también se realizó una lixiviación con KCN a pH básico, todas llevadas a cabo a dos temperaturas (20 y 60 °C) en un sistema agitado.</p> <p>Los resultados obtenidos en la lixiviación indican, que es posible aumentar la extracción de cobre al aumentar la temperatura como también al cambiar el medio lixivante. En la lixiviación acida con sulfato ferroso se obtuvieron los mejores resultados para todos los compuestos evaluados.</p>