

**DESARROLLO DE CORRELACIONES ENTRE MINERALOGIA Y
EXTRACCION DE ORO EN MINERALES AURIFEROS MEDIANTE DATOS DE
LIXIVIACION DIAGNOSTICO**

YESID ALBERTO PEÑATE ZUÑIGA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
POSTGRADO EN INGENIERIA METALURGICA
BUCARAMANGA**

2004

**DESARROLLO DE CORRELACIONES ENTRE MINERALOGIA Y
EXTRACCION DE ORO EN MINERALES AURIFEROS MEDIANTE DATOS DE
LIXIVIACION DIAGNOSTICO**

YESID ALBERTO PEÑATE ZUÑIGA

Trabajo de Investigación Presentado Como Requisito Para Optar al Título de
Magister en Ingeniería Metalúrgica

Director
CUSTODIO VASQUEZ QUINTERO
Ingeniero Metalúrgico M. Sc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
MAESTRIA EN INGENIERIA METALURGICA
BUCARAMANGA

2004

DEDICATORIA

Este trabajo, está dedicado a las personas más importantes de mi vida, casi todas mujeres quienes con sus bendiciones y apoyo han hecho posible la culminación de una meta y la consecución de grandes sueños.

- Mi mamá **Elvia y Felicia** (abuela y madre), quienes siempre estuvieron ahí apoyándome.
- Mis tías maternas quienes me ayudaron en mi formación integral.
- A mis hermano **Rafael** y mis hermanas **Beltris e Isabel**.
- A esa personita especial quien con su amor y dedicación a llenado mis días de felicidad, **Tatiana Lucia (mi tatico)**.

Para ellos con todo el amor y cariño del mundo.

Yesid.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a las siguientes personas por su aporte científico y profesional durante el desarrollo de este Trabajo de Investigación:

- **Dr. Julio Elías Pedraza Rosas**, Coordinador del Postgrado en Ingeniería Metalúrgica y Director del Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente, UIS.
- **Dr. Custodio Vásquez Quintero**, Profesor Titular Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, UIS. Director del Trabajo de Investigación.
- **Dr. Walter Pardavé Livia y Dr. Carlos A. García**, Profesores de las Escuelas de Ingeniería Metalúrgica y Geología, por todos sus consejos, aportes y orientación.
- A todo el personal del grupo de Investigaciones en Guatiguará, quienes contribuyeron con los estudios preliminares a este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. ESTADO DEL ARTE	4
1.1 EXPLOTACION MINERA DE LOS YACIMIENTOS	4
1.1.1 Localización y vías de acceso	5
1.1.2 Fisiografía	6
1.1.3 Geología estructural	6
1.1.4 Geología de los yacimientos estudiados	8
1.2 LIXIVIACION DIAGNOSTICA	10
1.3 CORRELACIONES Y MODELAMIENTO ENTRE MINERALOGIA Y EXTRACCION DE ORO	13
2. MARCO TEORICO	15
2.1 MINERALES DE ORO	15
2.1.1 Clasificación de los minerales de oro	15
2.1.2 Principales procesos de tratamientos de minerales de oro	21
2.2 EL PROCESO DE LIXIVIACION	24
2.2.1 Generalidades	24
2.2.2 Consideraciones cinéticas de la lixiviación	25
2.2.3 Variables del proceso	29

2.3 CIANURACION DE MINERALES DE ORO	35
2.3.1 Generalidades	35
2.3.2 Cinética de la disolución de oro	35
2.3.3 Efecto de las principales variables sobre la cianuración	39
2.4 LIXIVIACION DIAGNOSTICA DE MENAS AURIFERAS	44
2.4.1 Generalidades	44
2.5 CORRELACIONES Y MODELAMIENTO	53
2.5.1 Correlaciones entre mineralogía y extracción de oro	53
2.5.2 Modelo de balance de población	54
2.5.3 Modelos cinéticos de disolución de minerales	60
3. METODOLOGIA DE TRABAJO	66
3.1 PLAN DE ACTIVIDADES	66
3.1.1 Etapa 1: Revisión y análisis bibliográfico	66
3.1.2 Etapa 2: Revisión y estudios de caracterización mineralógica	66
3.1.3 Etapa 3: Aplicación de procedimientos de lixiviación diagnostica	67
3.1.4 Etapa 4: Análisis de los resultados obtenidos	67
3.1.5 Etapa 5: Desarrollo de correlaciones y modelamiento	67
3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	67
4. REVISION Y ESTUDIO DE RESULTADOS DE CARACTERIZACION MINERALOGICA	76
4.1 MINERALOGIA DE COMPOSITOS	78
4.1.1 Composito de Vetas	78

4.1.2 Composito de California	80
4.1.3 Compositos de Santa Rosa del Sur	84
4.2 MINERALOGIA DE LOS COMPOSITOS DE CADA TIPO DE MENA	94
4.2.1 Mineralogía del composito de Vetas	94
4.2.2 Mineralogía del composito de California	95
4.2.3 Mineralogía de los compositos de Santa Rosa del Sur (óxidos y sulfuros)	97
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	100
5.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES	100
5.1.1 Lixiviación diagnostica de cada mena	100
5.1.2 Resultados de cianuración de cada mena	103
5.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	123
5.2.1 Análisis de la mineralogía de las muestras de diferentes compositos	123
5.2.2 Análisis de la mineralogía de cada composito	127
5.2.3 Análisis de los resultados de lixiviación diagnostica	132
5.2.4 Análisis de las pruebas de cianuración de cada tipo de mena	137
6. DESARROLLO DE CORRELACIONES Y MODELAMIENTO	142
6.1 DESARROLLO DE CORRELACIONES SOBRE LAS CURVAS DE CIANURACION	144
6.2 DESARROLLO DE CORRELACIONES PARA LAS CURVAS DE CIANURACIÓN DE MAYOR PORCENTAJE DE EXTRACCION DE ORO	157
6.3 CORRELACIONES PARA DISOLUCION DE ORO DE DIFERENTES MATRICES MINERALES	163
6.4 MODELOS CINETICOS DE DISOLUCION	172

6.5 ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE CORRELACIONES Y MODELOS	183
7. CONCLUSIONES	187
8. RECOMENDACIONES	190
BIBLIOGRAFIA	192

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de minerales de oro	15
Tabla 2. Procesos de tratamiento de minerales de oro	22
Tabla 3. Influencia de la velocidad de flujo	39
Tabla 4. Influencia de la concentración	41
Tabla 5. Influencia de la concentración de álcalis	42
Tabla 6. Influencia de la concentración de oxígeno	43
Tabla 7. Textura y estructura municipio de Vetas	79
Tabla 8. Composición mineralógica del municipio de Vetas	80
Tabla 9. Textura y estructura del municipio de California	81
Tabla 10. Composición mineralógica del municipio de California	83
Tabla 11. Muestras que conforman el composito de Santa Rosa del Sur (óxidos)	85
Tabla 12. Caracterización mineralógica de Santa Rosa del Sur (óxidos)	86
Tabla 13. Muestras que conforman el composito de Santa Rosa del Sur (sulfuros)	90
Tabla 14. Caracterización mineralógica de Santa Rosa del Sur (sulfuros)	91
Tabla 15. Composición mineralógica del composito de Vetas	95
Tabla 16. Composición mineralógica del composito de California	96
Tabla 17. Análisis mineralógico de los compositos de Santa Rosa del Sur	97
Tabla 18. Consumo de cianuro del composito de Vetas	103
Tabla 19. Porcentaje de extracción de oro del composito de Vetas	104
Tabla 20. Consumo de cianuro del composito de California	105
Tabla 21. Porcentaje de extracción de oro del composito de California	106
Tabla 22. Consumo de cianuro del composito de Sinués - Tiguarí	107

Tabla 23. Porcentaje de extracción de oro del composito de Sinués - Tiguarí	108
Tabla 24. Consumo de cianuro del composito de Machuca - San Celestino	109
Tabla 25. Porcentaje de extracción de oro del composito de Machuca	110
Tabla 26. Consumo de cianuro del composito I - Oxidos	111
Tabla 27. Porcentaje de extracción de oro del composito I - Oxidos	112
Tabla 28. Consumo de cianuro del composito III - Oxidos	113
Tabla 29. Porcentaje de extracción de oro del composito III - Oxidos	114
Tabla 30. Consumo de cianuro del composito V - Oxidos	115
Tabla 31. Porcentaje de extracción de oro del composito V - Oxidos	116
Tabla 32. Consumo de cianuro del composito II - Sulfuros	117
Tabla 33. Porcentaje de extracción de oro del composito II - Sulfuros	118
Tabla 34. Consumo de cianuro del composito IV - Sulfuros	119
Tabla 35. Porcentaje de extracción de oro del composito IV - Sulfuros	120
Tabla 36. Consumo de cianuro del composito VI - Sulfuros	121
Tabla 37. Porcentaje de extracción de oro del composito VI - Sulfuros	122
Tabla 38. Clasificación de minerales de oro según grado de lixiviabilidad	137
Tabla 39. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de Vetas	145
Tabla 40. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de California	146
Tabla 41. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de Sinués - Tiguarí	147
Tabla 42. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de Machuca – San Celestino	148
Tabla 43. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de óxidos de Santa Rosa del Sur	149
Tabla 44. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito I de óxidos de Santa Rosa del Sur	150

Tabla 45. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito III de óxidos de Santa Rosa del Sur	151
Tabla 46. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito V de óxidos de Santa Rosa del Sur	152
Tabla 47. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de sulfuros de Santa Rosa del Sur	153
Tabla 48. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito II de sulfuros de Santa Rosa del Sur	154
Tabla 49. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito IV de sulfuros de Santa Rosa del Sur	155
Tabla 50. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito VI de sulfuros de Santa Rosa del Sur	156
Tabla 51. Correlaciones para – 200 Ty – Composito Vetas	159
Tabla 52. Correlaciones para – 200 Ty – Composito California	160
Tabla 53. Correlaciones para – 200 Ty – Composito Oxidos	161
Tabla 54. Correlaciones para – 200 Ty – Composito Sulfuros	162
Tabla 55. Modelo de núcleo sin reaccionar – Composito de Vetas	175
Tabla 56. Modelo de núcleo sin reaccionar – Composito de California	176
Tabla 57. Modelo de núcleo sin reaccionar – Composito de Oxidos	177
Tabla 58. Modelo de núcleo sin reaccionar – Composito de Sulfuros	178
Tabla 59. Modelo de grano – Composito de Vetas	179
Tabla 60. Modelo de grano – Composito de California	180
Tabla 61. Modelo de grano – Composito de Oxidos	181
Tabla 62. Modelo de grano – Composito de Sulfuros	182

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ejemplo típico de aplicación de cianuración diagnóstica a minerales auríferos	12
Figura 2. Diferentes tipos de asociación de oro con sulfuros minerales.	17
Figura 3. Minerales refractarios de oro.	20
Figura 4. Proceso típico del sistema de lixiviación.	27
Figura 5. Porcentaje de extracción en función del tiempo	29
Figura 6. Extracción en función del tamaño	30
Figura 7. Lixiviación en función de concentración de reactivos	31
Figura 8. Efecto de temperatura sobre difusión y control químico	33
Figura 9. Efecto de la agitación en el grado de lixiviación	33
Figura 10. Disolución electroquímica de oro en soluciones	38
Figura 11 A y 11B. Disolución de oro en función de velocidad de flujo	40
Figura 12. Procedimiento de preparación de cianuración diagnóstica	45
Figura 13. Procedimiento de diseño de cianuración diagnóstica	46
Figura 14. Procedimiento de diseño de cianuración diagnóstica (Cont).	47
Figura 15. Procedimiento de cianuración intermedia	48
Figura 16. Procedimiento de determinación de yeso y arsenatos	49
Figura 17. Procedimiento de determinación de pirrotita, calcita y ferritas	49
Figura 18. Procedimiento de determinación de uraninita y sulfuros de cobre	50
Figura 19. Procedimiento de determinación de oro en galena, esfalerita, etc.	50
Figura 20. Procedimiento de oro en pirita y arsenopirita	51
Figura 21. Procedimiento de determinación en matriz carbonacea	51
Figura 22. Representación típica de un ensayo de lixiviación diagnóstica	52

Figura 23. Consumo de cianuro del composito de Vetas	103
Figura 24. Porcentaje de extracción de oro del composito de Vetas	104
Figuras 25. Consumo de cianuro del composito de California	105
Figura 26. Porcentaje de extracción de oro del composito de California	106
Figura 27. Consumo de cianuro del composito de Sinués - Tiguarí	107
Figura 28. Porcentaje de extracción de oro del composito de Sinués - Tiguarí	108
Figura 29. Consumo de cianuro del composito de Machuca - San Celestino	109
Figura 30. Porcentaje de extracción de oro del composito de Machuca	110
Figura 31. Consumo de cianuro del composito I - Oxidos	111
Figura 32. Porcentaje de extracción de oro del composito I - Oxidos	112
Figura 33. Consumo de cianuro del composito III - Oxidos	113
Figura 34. Porcentaje de extracción de oro del composito III - Oxidos	114
Figura 35. Consumo de cianuro del composito V - Oxidos	115
Figura 36. Porcentaje de extracción de oro del composito V - Oxidos	116
Figura 37. Consumo de cianuro del composito II - Sulfuros	117
Figura 38. Porcentaje de extracción de oro del composito II - Sulfuros	118
Figura 39. Consumo de cianuro del composito IV - Sulfuros	119
Figura 40. Porcentaje de extracción de oro del composito IV - Sulfuros	120
Figura 41. Consumo de cianuro del composito VI - Sulfuros	121
Figura 42. Porcentaje de extracción de oro del composito VI - Sulfuros	122
Figura 43. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de Vetas	145
Figura 44. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de California	146
Figura 45. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de Sinués - Tiguarí	147
Figura 46. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de Machuca – San Celestino	148

Figura 47. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de óxidos de Santa Rosa del Sur	149
Figura 48. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito I de óxidos de Santa Rosa del Sur	150
Figura 49. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito III de óxidos de Santa Rosa del Sur	151
Figura 50. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito V de óxidos de Santa Rosa del Sur	152
Figura 51. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito de sulfuros de Santa Rosa del Sur	153
Figura 52. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito II de sulfuros de Santa Rosa del Sur	154
Figura 53. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito IV de sulfuros de Santa Rosa del Sur	155
Figura 54. Correlaciones para porcentaje de extracción de oro vs tiempo – composito VI de sulfuros de Santa Rosa del Sur	156
Figura 55. Correlaciones para – 200 Ty – Composito Vetas	159
Figura 56. Correlaciones para – 200 Ty – Composito California	160
Figura 57. Correlaciones para – 200 Ty – Composito Oxidos	161
Figura 58. Correlaciones para – 200 Ty – Composito Sulfuros	162
Figura 59. Curva cinética de disolución de oro de diferentes matrices	163
Figura 60. Modelo de núcleo sin reaccionar – Composito de Vetas	175
Figura 61. Modelo de núcleo sin reaccionar – Composito de California	176
Figura 62. Modelo de núcleo sin reaccionar – Composito de Oxidos	177
Figura 63. Modelo de núcleo sin reaccionar – Composito de Sulfuros	178
Figura 64. Modelo de grano – Composito de Vetas	179
Figura 65. Modelo de grano – Composito de California	180
Figura 66. Modelo de grano – Composito de Oxidos	181
Figura 67. Modelo de grano – Composito de Sulfuros	182

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE CORRELACIONES ENTRE MINERALOGIA Y EXTRACCION DE ORO EN MINERALES AURIFEROS MEDIANTE DATOS DE LIXIVIACION DIAGNOSTICA*

AUTORES: PEÑATE ZUÑIGA, Yesid Alberto y VASQUEZ QUINTERO, Custodio**

PALABRAS CLAVES: Lixiviación diagnostica, lixivabilidad, lixiviación, extracción de oro, mineralogía, correlaciones, modelamiento

CONTENIDO:

El trabajo de investigación comprende la formulación de correlaciones matemáticas que permiten predecir o calcular los diferentes porcentajes de disolución de oro que pueden ser extraídos de minerales auríferos al procesarse mediante cianuración en una granulometría específica y tomando como base en la caracterización mineralógica de menas auríferas de diversas regiones colombianas (Vetas y California (Santander) y Santa Rosa del Sur (Bolívar)).

Este resultado se consigue mediante la aplicación de la técnica de lixiviación diagnostica a las diferentes menas auríferas y luego el ajuste estadístico de los datos obtenidos mediante regresiones, de forma que se consiga un ajuste o coeficiente de correlación cercano a la unidad para validar la correlación.

Inicialmente los minerales son cianurados en diferentes granulometrías (-60 + 100 mallas, -100 +200 mallas y -200 mallas), se considera como tamaño óptimo de conminución, aquel donde se producen los mayores porcentajes de disolución de oro en menores tiempo de procesamiento. En este tamaño el mineral correspondiente es cianurado y establecida su curva cinética de disolución, de forma que con estos datos de granulometría, porcentaje de disolución de oro vs tiempo, mineralogía, etc. Se logra establecer la correlación matemática que mejor representa el comportamiento cinético de este tipo de mineral.

Los resultados del estudio demuestran que siguiendo esta metodología es posible conseguir estas correlaciones, que en su mayoría las ecuaciones corresponden al tipo logarítmico y que los coeficientes de correlación alcanzados son bastante altos, de tal manera que una vez establecida la posible composición mineralógica de un mineral, se puede predecir la curva cinética de disolución de oro desde este mineral, permitiendo de esta manera un control más técnico de los procesos de extracción y una herramienta en la toma de decisiones respecto a los procesos de tratamiento de minerales de oro.

* Trabajo de Investigación de Maestría en Ingeniería Metalúrgica.

** Facultad de Ingenierías Físico – Químicas, Maestría en Ingeniería Metalúrgica, Dr. Custodio Vásquez Quintero, Director del Trabajo de Investigación.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF RELATIONSHIP BETWEEN MINERALOGY AND GOLD EXTRACTION FROM GOLD ORES THROUGH DIAGNOSTIC LEACHING DATES*

AUTHORS: PEÑATE ZUÑIGA, YESID ALBERTO Y VASQUEZ QUINTERO, CUSTODIO**

KEY WORDS: diagnostic leaching, leachability, leaching, gold extraction, mineralogy, interrelationship, modeling.

CONTENT:

Research work includes the development of formulations and mathematical relationships which allowing predict or calculate different gold extraction percents that can be obtained from gold ores when these are processed through cyanidation in a specific particle size and taking in account the mineralogy characterization of gold ores from different Colombian regions (Vetas y California (Santander) y Santa Rosa del Sur (Bolívar)).

This result is obtained through applicability of diagnostic leaching technique to different gold ores and the statistical adjust of the produced dates through exponential, roots, power, logarithmic and polynomial regressions, so an adjust or correlation coefficient next to unit can be reached and the correlation can be validated.

Firstly, ores are cyanided in different particles sizes (-60 + 100 mesh, -100 +200 mesh and -200 meshes), an optimal particle size will be that when higher percents of gold dissolution be reached with lower processing times. On this particle size, the correspondent ore is cyanided and established its kinetical dissolution curve, so with these dates (particle size, gold dissolution percent vs time, mineralogy, etc.), a mathematical relationship can be obtained and it will represent the kinetical behaviour of this ore type.

The study results show that following the proposed methodology is possible reach relationships, mostly equations which are corresponding to the logarithmic type and correlation coefficients very high, on this way, once established the expected mineralogical composition of a gold ore, the kinetical dissolution curve of gold can be predicted allowing on this form a more technical control of the extraction process and an interesting tool when important decisions should be taken about the treatment's processes of gold ores in situ or plant.

* Research Work of Master in Metallurgical Engineering.

** Faculty of Physical – Chemicals Engineering , Master in Metallurgical Engineering, Dr. Custodio Vásquez Quintero, Adviser of Research Work.

INTRODUCCION

La extracción de oro en Colombia, ocupa un renglón de mucha importancia en la generación de divisas para el país. Sin embargo, su explotación y extracción sigue siendo un proceso artesanal con muy bajo nivel de tecnificación y capacitación del personal a cargo de esta actividad.

Las zonas mineras de Vetas y California (Santander del Sur) y el Sur de Bolívar, áreas en las cuales se enmarca esta investigación, son regiones de poco desarrollo tecnológico, pero con yacimientos bastante importantes de metales preciosos como oro y plata, que hasta ahora vienen siendo explotados en forma poco efectiva, sin una adecuada planeación geológica y metalúrgica de los trabajos realizados, llegando a ser en muchos casos causantes de amenazas y daños al ambiente.

En estos asentamientos mineros, la extracción de los valores metálicos contenidos en los minerales, se realiza en plantas de tratamientos y mediante procesos no aptos para tal fin y con índices de recuperación muy bajos. La extracción de oro de sus minerales, se realiza mediante el proceso de cianuración - cementación, con muy bajo nivel de tecnificación, sin analizar si el mineral a tratar requiere pretratamientos y sin conocimiento del tipo de minerales que se procesa o en algunos casos con un conocimiento muy empírico, lo que obligatoriamente conlleva a bajos niveles de productividad, comparados con la inversión realizada.

Como una forma de contribuir al desarrollo y bienestar de las regiones y el país, el Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente, en asocio con instituciones gubernamentales (Gobernación de Santander, Alcaldía de Santa Rosa del Sur – MINERCOL - UIS), han venido planteado la realización de estudios de Mejoramiento de los Procesos de Beneficio de Metales Preciosos en estas zonas mineras, y de los cuales hace parte esta investigación.

Para los conocedores de la materia, es claro que dentro de este tipo de investigaciones, el primer paso en el desarrollo de los estudios e investigación de un depósito de oro debe incluir la caracterización mineralógica de las menas conteniendo el metal de interés y segundo, la determinación de la abundancia de este metal en ellos.

Este proyecto parte de resultados obtenidos por el personal del Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente, referentes a la mineralogía y composición química de los minerales de interés y plantea la formulación de Correlaciones entre la mineralogía de las menas tratadas y los porcentajes de extracción de oro de estos minerales, de forma que cuando en las zonas mineras enmarcadas (Vetas, California y Santa Rosa del Sur de Bolívar), se examine la mineralogía de las menas encontradas en sus minas, pueda establecerse cual será su comportamiento al ser sometidas a procesos de lixiviación, cual es el tamaño de partículas que arrojará los mayores porcentajes de extracción, que relación porcentaje de extracción de oro vs tiempo seguirá este mineral y que respuesta metalúrgica tendrá frente al proceso de cianuración.

Estas formulaciones, a las cuales se ha llegado en esta investigación, están basadas en los datos obtenidos de los ensayos de lixiviación convencional (Cianuración) y lixiviación diagnóstica, realizados sobre las menas características de la zona, también denominados compositos. En estos ensayos, se ha sometido las diferentes muestras de menas a una disolución selectiva (Cianuración – ataque ácido), con variados reactivos escogidos de acuerdo a los diferentes tipos de minerales identificados en las menas y que permiten identificar el grado de asociación o de permanencia de oro en estos compuestos, por ejemplo: Oro libre, oro asociado a pirita, oro asociado a carbonatos, etc.

Con estos datos, se asoció el comportamiento de los minerales en los procesos de extracción con su mineralogía, mediante el uso de formulaciones matemáticas, tipo correlaciones o ajuste de curvas mediante regresiones, a la vez que se comprobó si alguna de las menas tratadas seguía el comportamiento planteado por alguno de los modelos cinéticos sobre disolución de minerales.

Además de las predicciones sobre porcentaje de extracción vs tiempo que se obtuvo de las correlaciones, también se pudo determinar los tamaños adecuados a que deben ser reducidas las partículas minerales, para que se obtenga amplia liberación de las partículas de oro asociadas a estos minerales y por ende una mayor lixiviabilidad, que se verá reflejada en el aumento de los porcentajes de extracción de oro de estas menas.

Se considera entonces, que el desarrollo de correlaciones matemáticas y la comprobación de algunos modelos cinéticos teóricos que se ha obtenido en esta investigación, conjugan de manera apropiada la caracterización mineralógica, la mineralogía de procesos y los datos de lixiviación diagnóstica de los diferentes minerales auríferos de las zonas mineras de Santa Rosa del Sur (Bolívar) y Vetas y California (Santander del sur) con el grado de extracción de oro de estos minerales, de forma que estas correlaciones permiten predecir el comportamiento de estos minerales al ser sometidos a procesos de lixiviación (cianuración), particularmente en lo referente a los porcentajes de extracción de oro que de ellos pueden obtenerse.

Al presentar los resultados de este trabajo, se espera contribuir enormemente con el desarrollo tecnológico de la región y el mejoramiento de los procesos de beneficio de minerales auríferos en las zonas de estudio.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 EXPLOTACION MINERA DE LOS YACIMIENTOS^[1]

Aunque algunos documentos, señalan que la explotación minera en los municipios de Vetas y California se remonta a los tiempos precolombinos alrededor del año 1550, es la década posterior a 1980, la que aparece como la época que marco el auge de las explotaciones mineras en el sur de Bolívar y Santander, desarrollándose básicamente una minería de subsistencia sin ningún tipo de avance tecnológico; se destaca una diferencia con la zona minera de California, donde se ha implementado rudimentariamente los molinos de pisones (Californiano) o el molino de arrastre, con alto uso del barril amalgamador.

Desde esta época, se han venido realizando estudios geológicos y mineralógicos en estas zonas por parte de entidades gubernamentales, sin embargo estos estudios han tenido poca divulgación en el medio científico - tecnológico, en parte, afectados en su realización por los diversos problemas de orden publico que afectan estas regiones del país. Puede decirse entonces, que los informes formales de estudios técnicos realizados sobre la geología, caracterización mineralógica o mineralización de esta zona, así como estudios del comportamiento metalúrgico de estas menas en procesos de extracción son muy limitados o casi nulos, desconociéndose la forma de ocurrencia del mineral de interés económico.

^[1] Cardozo, A. Informe geológico “Mejoramiento de los procesos de beneficio de minerales auríferos en los municipios de vetas y California (Santander). Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente – UIS. 2002

En años recientes, el Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente de la Universidad Industrial de Santander^[2], en asocio con instituciones gubernamentales (Gobernación de Santander - Alcaldía de Santa Rosa del Sur - MINERCOL), ha venido desarrollando estudios de Mejoramiento de los Procesos de Beneficio de Metales Preciosos en estas zonas, los cuales contempla la realización de la caracterización mineralógica (estudios petrográficos, geoquímicos y mineralógicos) y físico - química, junto con estudios de procesamiento metalúrgico de las menas de estas regiones.

1.1.1 Localización y vías de acceso^[1, 3]. Las áreas de estudio, corresponden a la zona minera de San Pedro Frío del municipio de Santa Rosa del Sur (Bolívar) y las zonas mineras de los municipios de Vetas y California (Santander). En lo concerniente a la localización y vías de acceso, fisiografía, geología estructural y geología del yacimiento, la información se basa en los informes presentados por Cardozo^[1] y Narváez^[3].

San Pedro Frío es uno de los nueve corregimientos del municipio de Santa Rosa del Sur y, el principal productor de oro de la región. Se encuentra ubicado al norte del municipio y para acceder a la zona desde el municipio de Santa Rosa, se debe hacer un recorrido de 3 a 4 horas en vehículo automotor sobre un carretable en regular estado, hasta el lugar denominado la Punta, desde allí es necesario tomar un camino de herradura durante 4 a 5 horas para llegar al corregimiento de San Pedro Frío.

El municipio de Vetas, se encuentra ubicado a 90 Km por la vía que de Bucaramanga conduce a Cúcuta, pasando por el corregimiento de Berlín, donde se toma un carretable que nos lleva a la zona minera con 80.54 hectáreas aproximadamente y ubicada muy cerca la cabecera municipal por el carretable que de Vetas conduce al municipio de California.

^[2] Grupo de investigación en minerales, biohidrometalurgia y ambiente – UIS. Informe final “mejoramiento de los procesos de beneficio de metales preciosos en el Sur de Bolívar” 2002.

Grupo de investigación en minerales, biohidrometalurgia y ambiente – UIS. Informe final “Aplicación de tecnologías limpias para el beneficio de metales preciosos y control de la contaminación del río Suratá, distrito de Vetas – California (Santander). 2003

^[3] Narvaez, M. Informe geológico Minercol – Alcaldía de Santa Rosa del Sur (Bolívar).

El municipio de California, se encuentra ubicado a 49 Km por la vía que de Bucaramanga conduce al municipio de Matanza. El área de estudio está ubicada a 5,1 Km por el carreteable que de California conduce a la vereda la Baja.

1.1.2 Fisiografía^[1, 3]. El sector aurífero de San Pedro Frío se encuentra situado sobre una topografía altamente montañosa con una variación de cota de 780 msnm hasta 1680 msnm, con pendientes que oscilan entre 20° y 47°. La zona esta bajo la influencia de un clima cálido húmedo con temperaturas que fluctúan entre los 15°C y 22°C. El área esta cubierta por una vegetación extensa y variada de bosque húmedo tropical que corresponde a los pisos altitudinales Montano y Premontano.

La zona minera del municipio de Vetas se encuentra ubicada dentro del macizo de Santander con topografía abrupta con elevaciones que van entre los 2900 msnm hasta 4000 msnm con pendientes superiores a 30°. La cobertura vegetal corresponde a pequeños arbustos y frailejones, propia de páramo.

La zona minera de California, posee topografía abrupta y altura entre los 2300 msnm hasta 3000 msnm con pendiente promedio de 30° y montañas orientadas hacia el noroeste. La cubierta vegetal esta compuesta principalmente por rastrojo alto y pequeños bosques nativos, la densidad es media a baja.

1.1.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL^[1, 3]. Los eventos geológicos en el sector de San Pedro Frío y en general en toda la serranía de San Lucas, están relacionados con la tectónica de placas debido a que esta región está sobre un borde continental activo.

Durante el Triásico - Jurásico, se desarrolló un volcanismo ácido continental efusivo y explosivo que culminó con inyecciones de Silos y Diques de composición básica, que sirven para corroborar litológicamente la disgregación de los protocontinentes de Laudarais y Gondwana, e iniciar la actual deriva continental de estos.

Al finalizar esta etapa volcánica, se desarrollan grandes cuerpos intrusivos como el Batolito de Norosí, y posteriormente se presenta un fracturamiento de dirección N 50° -60°E y N 10° -20°W; para esta época la serranía de San Lucas era un área emergida sometida a erosión, lo cual manifiesta que este borde continental de la placa suramericana se convierte desde ese entonces en un borde activo, en donde se ha iniciado un proceso de fragmentación de la corteza continental y de la corteza oceánica, ocurriendo así la subducción de esta última (placa del pacifico) bajo la primera (Placa Suramericana).

Para el distrito minero de Vetas – California y debido a los distintos eventos tectónicos que afectaron esta zona, se evidencia la presencia de estructuras de bandeamiento del neiss, diaclasas (mineralizadas y no mineralizadas), fallas y lineamientos. El Neiss presenta un rango de dirección en el bandeamiento, N 60° - 80 ° E con buzamiento 60 – 80° sureste.

Las diaclasas, es el tipo de registro estructural que predomina en la zona de estudio. Esta afectando en un continuo y marcado fracturamiento la roca neisica. En el área se observaron familias de diaclasas no mineralizadas y en algunos sectores rellenas de minerales máficos (Biotitas) con alteraciones de óxidos de hierro y cuarzo, continuas y de forma irregular.

Las diaclasas mineralizadas corresponden a la dirección de los filones mineralizados observados en las minas: La Elsy, Elsy – Trompeteros, providencia, el Dorado, la machuca y Tiguarí. El área se encuentra localizada sobre la región estructural oriental, en el departamento de Santander, afectada por la falla de Cucutilla con dirección noreste, lo cual aparentemente esta relacionada con la mineralización de gran parte de la región.

1.1.4 Geología de los yacimientos estudiados^[1, 3]. La mineralización del área de Santa Rosa, está conformada por un dique cuarcítico blanco lechoso (ganga) donde se encuentra diseminado el oro y la plata, tiene una dirección que varía entre N 15° E y N 64° E, buzamiento mínimo de 40° y máximo de 86° SE, con espesores que van desde los 20 cm hasta 1,5m.

El dique cuarcítico, es una roca compacta de color blanco lechoso a gris de composición cuarzosa con presencia de sulfuros y óxidos de hierro. El cuarzo presenta formas angulosas y en diferentes tamaños

Los respaldos que se encuentran a lado y lado del filón tienen un espesor que va desde 3 a 5 metros aproximadamente, corresponde a una roca ígnea intrusiva de consistencia semicompacta a deslizable de color blanco sucio con venas multidireccionales de color amarillo ocre (claro a oscuro), negro y café (producto del contenido de Goetita y Limolita), y posee hábito pseudo cavernoso.

Cabe anotar que en el sector de Mina Nueva (una de las zonas muestreadas), se realiza una minería a cielo abierto, en donde no se observa una estructura filoniana definida, con alto grado de meteorización.

En la mineralización del distrito minero de Vetas y California, se encontró que las vetas, Stockwork (enrejados) y diseminaciones de la mineralización, son controladas estructuralmente; las estructuras mineralizadas se localizan en diaclasas o fracturas de roca encajante o siguiendo los planos de exfoliación del neis, presentándose minerales de mena: Pirita, sulfuros de hierro, cuarzo, óxidos de hierro y limonitas de coloración pardo – negruzcas.

Los filones mineralizados corresponden a cuerpos semitabular dispuestos en forma subparalela, de aspecto brechoide con fragmentos de cuarzo y plagioclasas. La textura característica de los filones mineralizados es producto de relleno de cavidades y remplazamiento de minerales, con coloración amarillo pardo y varía según la cantidad de

sulfuros presentes. Estos filones mineralizados (distrito Vetas y California) presentan un rango de orientación N 30 E a N 70 E y una fuerte inclinación general hacia el oeste.

Las venas auríferas se encuentran encajadas en las rocas neisica, producto del ascenso de una masa magmática de composición félsica a intermedia hasta un nivel hipoabisal que actuó como fuente energética movilizandoy transportando elementos químicos de las partes profundas hasta los sectores superficiales, involucrando aguas magmáticas y meteóricas, generando zonas de alteración. Este fracturamiento de roca encajante y el ocasionado por la intrusión magmática, sirvieron de conducto para el emplazamiento de la solución fluida mineralizante (modelo genético de mineralización del distrito de Vetas y California).

Las venas mineralizadas presentan alteración hidrotermal en forma paralela a las venas o filones mineralizados, con variaciones laterales de acuerdo a las asociaciones minerales de alteración identificadas. A partir de las venas de cuarzo y sulfuros se reconocen zonas de alteración hidrotermal crecientes hacia los respaldos del filón; la primera zona, de alteración sericítica, es la menos desarrollada y se presenta hasta unos pocos metros del filón, disminuyendo a medida que se aleja del filón.

La alteración argílica es la más desarrollada superando el metro de espesor y caracterizada por presentar asociaciones de minerales arcillosos producto de alteración de minerales formadores de roca encajante. Estos minerales arcillosos corresponden a illita, montmorillonita y limonita. Posteriormente, a esta alteración se presenta una etapa de oxidación que es el rango más notable de la alteración supergénica donde opera descomposición de la pirita manchando la roca con coloraciones parduscas y produciendo porosidad en la roca por disolución de pirita (textura celular).

1.2 LIXIVIACIÓN DIAGNOSTICA

Los reportes apuntan al desarrollo de la lixiviación diagnóstica en los Laboratorios de Investigación Anglo Americana (AARL)^[4] durante la mitad de los años ochenta, abriendo una puerta al metalúrgico, al entendimiento de las diferentes asociaciones de oro en los minerales que conforman las menas que lo contienen (análisis mineralógico), información hasta ese entonces, mucho más utilizada por los geólogos, permitiéndoles obtener mayor aprovechamiento y aplicación de la mineralogía de procesos, en áreas tales como: Diseño de nuevos diagramas de flujo de beneficio de minerales, alteración de los diagramas ya existentes e identificación de problemas sobre el área en plantas y unidades de procesamiento.

Algunos investigadores^{[5][6]} establecen que muchas de las pérdidas de oro durante los procesos de recuperación, se deben a que las características de los minerales que contienen este metal no han sido determinadas y por tanto las plantas o procesos de beneficio no obedecen a diseños correctos. Para conocer la forma de ocurrencia del metal de interés, se debe proceder a utilizar diferentes técnicas tales como difracción de rayos X, microscopía óptica de secciones pulidas y en algunos casos microscopía electrónica, de tal forma que la metodología seguida involucre aspectos como:

- Identificación de minerales de oro presentes en las menas.
- Determinación de cantidades de oro asociado a sulfuros y otros minerales.
- Determinación de las características de liberación de todos los minerales asociados al oro.
- Identificación de minerales contenidos en silicatos.
- Estudios de molienda y cianuración para determinar el porcentaje de oro cianurable.
- Determinación de la influencia de arcillas y materiales carbonáceos en el proceso de cianuración de oro.

^[4] Lorenzen, L. Some guidelines to the design of a diagnostic leaching experiment. *Minerals Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp 247 - 256, 1995.

^[5] Petruk, W. Mineralogical evaluations of gold recoveries by extractive metallurgy techniques. *Process mineralogy*. New York. 1995. Pag. 191 – 200.

- Realizar balances de materiales y determinar la distribución de oro en minerales, minerales asociados e interpretar resultados.

Se menciona la importancia que adquiere la textura de los minerales como requisito para el éxito del procesamiento y la conminución de las partículas de forma que se logre suficiente liberación de los minerales o se exponga suficientemente las partículas para ser lixiviada. La facilidad o dificultad en la exposición de las partículas (grado de liberación) depende en gran medida de las texturas minerales tales como tamaño de grano, cristalinidad y tipo de uniones entre partículas minerales.

Muchos de estos requerimientos anteriormente mencionados para obtener alto beneficio y recuperación a partir de minerales de oro, pueden ser obtenidos mediante la aplicación de la técnica de cianuración (lixiviación) diagnóstica.

La Cianuración (lixiviación) diagnóstica, tal como se establece en la literatura [4], es una disolución oxidante selectiva en la cual el mineral menos estable presente en la matriz de la muestra, es solubilizado primero en un medio acuoso ácido. El residuo es filtrado, lavado (agua/solución de ácido diluido) y cianurado para extraer el oro liberado en la etapa de destrucción del mineral menos estable en la matriz de la muestra y el cual se encontraba asociado, luego los sólidos son lavados con solución diluida de cianuro y alistada para repetir el procedimiento de destrucción del siguiente mineral que pueda estar asociado con el oro.

El proceso se repite con una lixiviación ácida cada vez más oxidativa hasta que todo el oro no refractario y recianurado es lixiviado por el cianuro y se obtiene un registro de la cantidad de oro asociado con cada uno de los diferentes minerales presentes en la matriz de la muestra y la extensión total de la reacción de extracción, que generalmente está dentro del 90 %. Un ejemplo típico de aplicación de cianuración diagnóstica a minerales de oro, se muestra en la figura 1.

^[6] Petruk, W. Some relationship between mineral textures and extractive metallurgy. Process mineralogy. New York. 1995. Pag 1-13

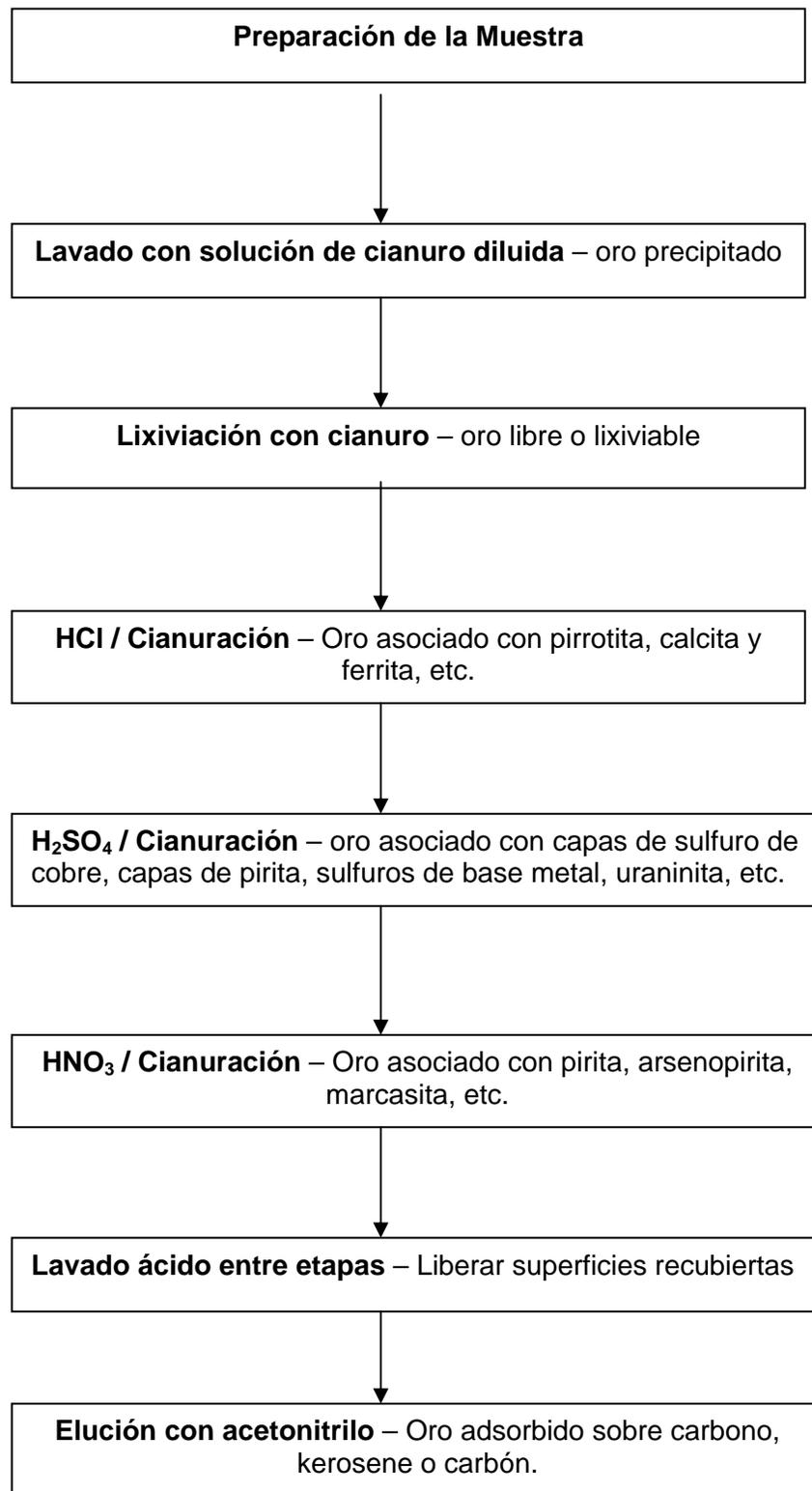


Figura 1. Ejemplo Típico de aplicación de Cianuración Diagnostica a minerales auríferos

Fuente: Lorenzen, L. Some guidelines to the design of a diagnostic leaching experiment. Minerals Engineering, Vol. 8, No. 3, pg 247 - 256, 1995.

1.3 CORRELACIONES Y MODELAMIENTO ENTRE MINERALOGIA Y EXTRACCION DE ORO

A partir del desarrollo de la lixiviación diagnóstica como técnica, han sido muchos los trabajos realizados sobre minerales auríferos, sin embargo, en lo referente al desarrollo de correlaciones entre la mineralogía y el porcentaje de extracción de oro de minerales auríferos en las regiones de estudio, no existe ningún antecedente de realización de trabajos previos relacionados con el tema, ni en el ámbito local, ni en el ámbito nacional. Los estudios y trabajos más relacionados, han sido realizados por parte de investigadores extranjeros, en su mayoría Canadienses, Australianos y Sudafricanos.

Un intento por relacionar el grado de liberación mineral con el comportamiento en lixiviación de minerales refractarios, solo aparece hasta 1994^[7], en la actualidad aun se realizan trabajos de investigación con estos fines.

Por otra parte, trabajos relacionados con el modelamiento del grado de liberación mineral, han sido desarrollados por autores como Gaudin (1939), quien desarrolló un modelo de liberación muy simple, sin uso significativo en predicción cuantitativa. Posteriormente otros investigadores como King (1979), quien tomó un camino diferente, midiendo los interceptos de un mineral ocluido en una línea transversal de las secciones pulidas de un mineral. Este fue el modelo que mejores aproximaciones dio al grado de liberación de un mineral, luego estuvo Wiegel (1983) que desarrolló un modelo extensivo del modelo de Gaudin, pero cuyas predicciones desvían considerablemente de la realidad. Hacia 1984, Finch y Petruck, propusieron funciones de distribución para el modelo de King, permitiendo su aplicabilidad. Más tarde, Hsieh y colaboradores (1995), desarrollaron el modelo de exposiciones, en el cual incorporaban factores como fractura intergranular, que no siempre ocurre.

^[7] Van Deventer, J.S. The interrelationship between mineral liberation and leaching behaviour. Minerals processing, Vol.41, pp 1 - 15, 1994.

Aunque un modelo apropiado que relacione el grado de liberación de un mineral con su comportamiento en la lixiviación no ha sido establecido, en la literatura técnica es posible encontrar diversos modelos cinéticos de disolución de minerales, que relacionan variables de procesamiento de minerales con el grado de conversión o reacción de las partículas minerales, que aun cuando no incluyen factores mineralógicos en su formulación si lo hacen con parámetros como concentración de reactivos, porosidad, coeficiente de difusión, etc., entre estos modelos, los más aceptados son los siguientes: Modelo de Núcleo sin Reaccionar, el Modelo Homogéneo, el Modelo de Poro Uniforme, el Modelo de Poros al Azar y el Modelo de Grano entre otros, los cuales describen la forma cinética en que se produce en la mayoría de veces la disolución de minerales en un fluido.

Aun cuando se han planteado diversos modelos de liberación de partículas minerales, esta área de investigación de minerales, aun es un problema bastante complejo, sin embargo, en la actualidad^[8], se están desarrollando en el mundo trabajos de investigación para tratar de correlacionar y entender la interrelación existente entre la mineralogía de una mena, con su comportamiento en lixiviación y por ende su relación con el porcentaje de extracción del metal de interés desde estos minerales.

^[8] Petersen, K. The use of neural network analysis of diagnostic leaching data. Universidad de Stellenboch, Sudáfrica. Bajo desarrollo.

2. MARCO TEORICO

2.1 MINERALES DE ORO

2.1.1 Clasificación de los minerales de oro. Generalmente, los minerales dentro del grupo de un metal, suelen clasificarse por su abundancia en la naturaleza, por su composición mineralógica o por su proceso de tratamiento. Para el caso de los minerales de oro, su clasificación se ha hecho con base en la estrecha relación existente entre mineralogía y proceso de tratamiento. La tabla 1, presenta una forma de clasificación de los minerales de oro.

Tabla 1. **CLASIFICACION MINERALES DE ORO**

I)	ORO LIBRE. Placeres (aluviales, eluviales o fluviales)
II)	ORO COMBINADO. Teluros
III)	ORO ASOCIADO CON: <ul style="list-style-type: none">- Sulfuros de hierro (pirita, marcasita y pirrotina)- Sulfuros de arsénico y antimonio (arsenopirita y estibinita)- Sulfuros de cobre (principalmente, calcopirita)- Otros sulfuros (galena y blenda) y sulfosales- Oxidos de hierro- Minerales de uranio- Minerales carbonáceos y grafiticos- Silicatos y carbonatos- Minerales micáceos- Minerales de manganeso

NOTA: Lógicamente, la amplia gama puede abarcar combinaciones de uno o más de los minerales citados

Fuente: Instituto tecnológico geominero de España. Minería química. 1991. Pg: 154

El oro puede también presentarse en una serie de asociaciones complejas que requieren pretratamiento de estos minerales, generalmente procesos oxidativos debido a que el tratamiento directo de cianuración es ineficiente o antieconómico.

Las principales asociaciones suceden cuando el oro se encuentra ligado a sulfuros, minerales consumidores de reactivos (pirrotita, arsenopirita, etc.), minerales carbonáceos o combinaciones de los anteriores. Se define entonces, como “oro libre”, las partículas de oro que pueden ser liberadas totalmente de la mena mediante molienda, “oro asociado” cuando las partículas de oro están unidas a los límites de grano después de molienda, pero quedan expuestas a la acción de los reactivos (cianuro), “oro ocluido o encapsulado” aquel en que las partículas de oro están completamente encerradas dentro de las partículas minerales y como “oro submicroscópico o diseminado” cuando las partículas están incluidas en sulfuros o diseminadas en la matriz o están por debajo de los límites de detección de la microscopía óptica. Una ilustración gráfica de estos conceptos, se muestra en la figura 2.

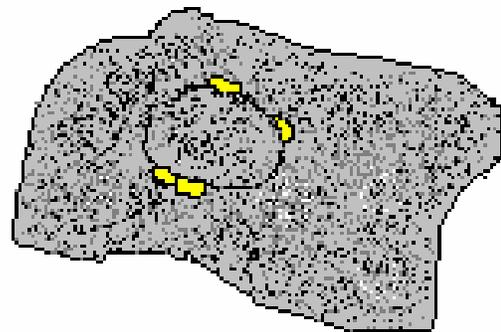
1. Oro libre: Una de las formas comunes de encontrar el oro en la naturaleza es como oro libre o nativo, variando su pureza y granulometría desde centímetros hasta micras. El oro fino se encuentra en yacimientos tipo sedimentario, pero muy frecuentemente en yacimientos hidrotermales, por ejemplo epitermales.

Algunas veces, el oro se encuentra aleado con plata (15 – 35 % Ag), aleación que se conoce como oro “electrum” y algunas veces aleado con mercurio formando amalgama (Au_2Hg_3) aunque en muy raras ocasiones.

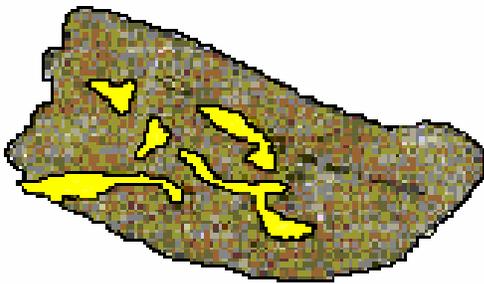
Otra de las formas de encontrar oro es como trazas en el carbón, agua de mar y en cenizas de materias vegetales y animales.

2. Oro combinado: Las principales especies de oro combinado son los telurios, conteniendo pequeñas cantidades de otros elementos como antimonio, plomo y mercurio. Estos compuestos son difíciles de cianurar y requieren pretratamientos, dando lugar procesos especiales. Entre estos compuestos tenemos: calaverita, krenesita, silvanita, petzita y hesita (Ag_2Te con hasta 4,7 % de Au).

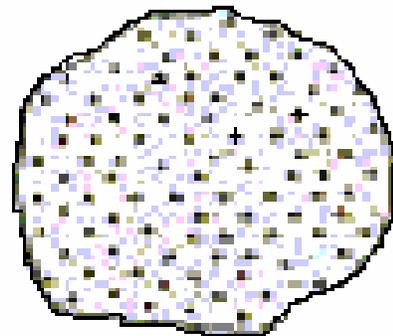
Figura 2. Diferentes tipos de asociación de oro con sulfuros minerales



Oro presente en los limites de las partículas de sulfuros



Oro en pirita concrecionaria



Oro en partículas coloidales o en solución sólida en sulfuros

3. Oro asociado:

En este grupo se presentan las siguientes agrupaciones:

- Sulfuros de hierro: la pirita es el mineral más común que puede llevar el oro asociado. Dependiendo de las condiciones de formación del yacimiento, este oro puede ser liberado por molienda más o menos fina, o estar diseminado como inclusiones en el tamaño de micras, haciendo al mineral refractario a los procesos de tratamiento normales.

De gran importancia es el contenido de azufre, el cual aumenta la dificultad de tratamiento con su incremento y pudiendo estar asociado el oro a la pirita y/o ganga.

Un caso particular es el de la pirrotita, $Fe_{1-x}S$ (x entre 0 y 2), requiriendo proceso previo de tratamiento de oxidación y posterior cianuración,

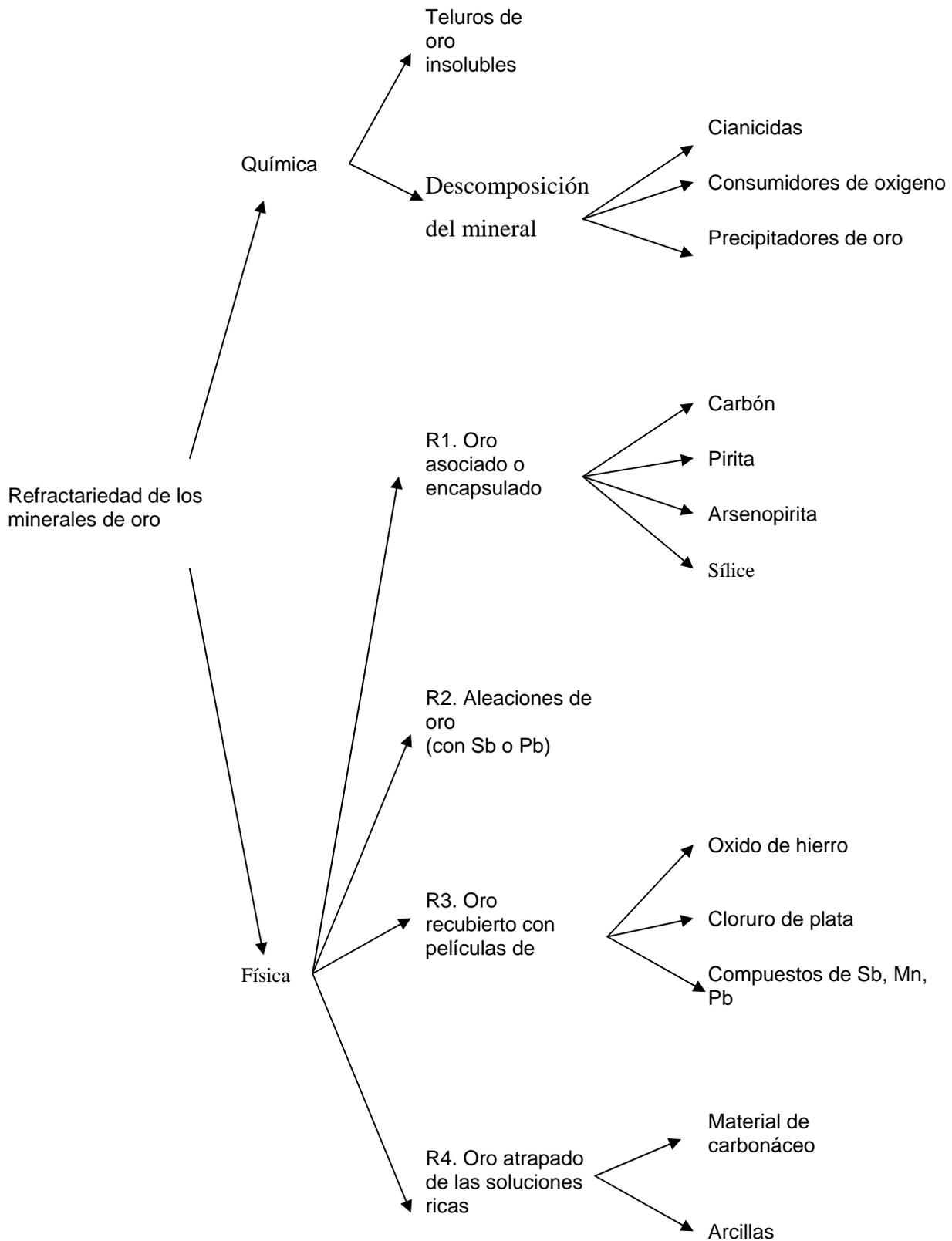
- Sulfuros de arsénico y antimonio: Normalmente se presentan como especies mixtas de pirita y arsenopirita, donde el oro está asociado a los granos de sulfuro de forma finísima, a veces menor a una micra, imposible de detectar por los métodos normales de microscopía.
- Sulfuros de cobre: En la mayoría de yacimientos, la calcopirita se encuentra asociada con mayor o menor contenido de pirita, y el oro, muy fino, puede estar bordeando o algunas veces incluido en ambas especies. Muchos de los yacimientos de sulfuros de cobre contienen pequeñas cantidades de oro en el orden de partes por millón (ppm).
- Otros sulfuros: Algunos de los otros sulfuros con los cuales podemos encontrar el oro asociado de manera similar a como se encuentra asociado con pirita, arsenopirita y calcopirita, se presenta con compuestos con minerales como galena, blenda, calcosita, covelina, niquelita, etc.

- Óxidos de hierro: la magnetita y otros óxidos de hierro secundarios (hematita, goethita, limonita y jarosita) pueden llevar asociaciones de oro. En el caso de óxidos secundarios es normal que el oro se encuentre finamente diseminado (micras) y recubierto por finas partículas de arcillas y lamas naturales. En el tratamiento de estos minerales, las pérdidas de metal pueden ser debidas más al recubrimiento de las partículas por material arcilloso que a su grado de liberación.
- Minerales de uranio: este tipo de asociaciones entre el oro y los minerales de uranio es frecuente en Sudáfrica. Generalmente los granos de oro son muy finos y ocluidos en el mineral (uraninita) y en la ganga silícea, aunque algunas veces pueden ocurrir asociaciones más complejas.
- Minerales carbonáceos y grafiticos: Se conoce como materiales carbonáceos, aquellas menas que contienen carbono, carbón activado o carbón en forma de grafito o compuestos de cadena larga como los ácidos húmicos. La dificultad en el tratamiento de estas menas está en la adsorción del oro disuelto por el material carbonaceo, originando una precipitación prematura y perdidas en el proceso de lixiviación.
- Silicatos y carbonatos: En estos minerales el oro puede estar ocluido o bordeando los granos, la presencia de sulfuros es escasa y por esta razón, aunque el oro se encuentre finamente diseminado, se obtienen buenas recuperaciones por lixiviación convencional. Otro caso es el de oro en rocas tipo magmático epitermales, donde el oro puede estar encapsulado en la sílice y dificultar su extracción.

Otra forma de clasificación de los minerales de oro, es aquella basada en su refractariedad o baja extracción de oro de sus minerales mediante métodos convencionales como concentración gravimétrica o cianuración.

Esta clasificación se manifiesta en la figura 3, donde una mayor refractariedad o impedimento para extraer oro por cianuración total corresponde a aquellas asociaciones designadas por R1, mientras una menor refractariedad corresponde a R4.

Figura 3. Minerales Refractarios de Oro



Fuente: López, María esperanza. La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de minerales auroargentíferos. Tesis de maestría en ingeniería metalúrgica, UIS, 1999. Bucaramanga.

2.1.2 Principales procesos de tratamiento de minerales de oro. Tomados desde el punto de vista de los procesos de tratamiento, las menas que contienen oro, se pueden clasificar en diferentes grupos:

- a. Placeres con oro libre (aluvial, eluvial o fluvial).
- b. Menas de oro libre, que requieren reducción de tamaño para su liberación y posterior recuperación.
- c. Menas refractarias que dificultan su recuperación y requieren procesos especiales de pretratamiento.

Los procesos de pretratamiento fundamentalmente son flotación, oxidación, calcinación y tostación. Ha adquirido importancia la biolixiviación de menas auríferas mediante oxidación bacteriana.

En general, el conocimiento mineralógico de las menas, sus características físicas, el grado de liberación del oro y la evaluación de las reservas del yacimiento son los principales factores que definen el proceso de tratamiento que se ha de seguir en la recuperación de la mena, también son de importancia las condiciones de la localidad de explotación y las características medioambientales.

Una clasificación que se pueden realizar según el tipo de proceso de tratamiento empleado en cada tipo de mineral, se presenta en la tabla 2. Esta clasificación puede ser:

- Oro libre: (menas del grupo 1). Normalmente se emplea concentración gravimétrica o amalgamación (oro grueso) o la cianuración (oro fino).
- Menas no refractarias o fácilmente lixiviables: (menas del grupo 1 y algunas del grupo 3). El proceso principal para este tipo de menas es la lixiviación con cianuro.

Tabla 2. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE MENAS DE ORO

TIPO MENA AURIFERA	PROCESOS
<p>I) ORO LIBRE</p> <ul style="list-style-type: none"> - ALUVIONES, ELUVIONES, FLUVIALES - OTRAS MENAS 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración gravimétrica–Amalgamación–Cianuración residuos (oro fino). • Idem • Concentración gravimétrica–Amalgamación–Flotación–Cianuración residuos (oro fino).
<p>II) ORO COMBINADO</p> <ul style="list-style-type: none"> - TELUROS 	<ul style="list-style-type: none"> • Flotación–Oxidación (tostación) concentrados–cianuración Cianuración residuos • Cianuración directa Tratamiento residuos con SO₂ Flotación–Tostación concentrados–Cianuración. • Flotación–Cianuración concentrados–Tostación residuos Cianuración.
<p>III) ORO ASOCIADO</p> <ul style="list-style-type: none"> - PIRITA Y MARCASITA - PIRROTINA 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración gravimétrica (del oro y/o sulfuros si están liberados). • Flotación–Fusión de concentrados (oro en sulfuros). • Flotación–Cianuración residuos (oro en ganga). • Flotación–Cianuración concentrados con o sin tostación Cianuración residuos (oro en sulfuros y ganga). • Flotación–Concentrados auríferos (para venta)-Cianuración residuos. •Cianuración–Flotación residuos–Recianuración concentrado con o sin tostación. • Cianuración (preaireación y baja alcalinidad) •Cianuración–Flotación residuos–Recianuración concentrados con o sin tostación.

<ul style="list-style-type: none"> - ARSENOPIRITA 	<ul style="list-style-type: none"> • Flotación–Tostación concentrados–Cianuración. Cianuración residuos flotación. • Flotación–Concentrados auríferos (para venta). Cianuración. Cianuración residuos flotación. • Tostación – Cianuración. • Cianuración directa.
<ul style="list-style-type: none"> - MINERALES COMPLEJOS DE COBRE (principalmente con calcopirita) 	<ul style="list-style-type: none"> • Flotación–Fusión concentrados de cobre (oro en lodos electrolíticos). • Flotación diferencial Cu–Mo–Cianuración concentrado Mo. • Flotación–Fusión de concentrados cobre (oro en sulfuros). • Cianuración de residuos flotación (oro en ganga).
<ul style="list-style-type: none"> - MINERALES COMPLEJOS PLOMO–ZINC (Iguar a minerales complejos de cobre) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gravimetría–Amalgamación (si el oro se libera por conminución)
<ul style="list-style-type: none"> - OXIDOS DE HIERRO 	<ul style="list-style-type: none"> • Conminución–Cianuración directa
<ul style="list-style-type: none"> - MINERALES DE URANIO 	<ul style="list-style-type: none"> • Flotación–Lixiviación ácida, concentrado (extracción de uranio)-Tostación del con- centrado–Cianuración.
<ul style="list-style-type: none"> - MINERALES CARBONACEOS, Y GRAFITICOS 	<ul style="list-style-type: none"> • Calcinación–Cianuración • Oxidación química–Cianuración • Pasivación superficie material carbonáceo (reactivos específicos)-Cianuración. • Flotación–Oxidación concentrado–Cianuración (si el oro está solo en material carbonáceo). • Flotación carbón–Cianuración residuo (si el oro no está en material carbonáceo)
<ul style="list-style-type: none"> - SILICATOS, CARBONATOS (minerales sedimentarios con oro fino y pocos sulfuros) 	<ul style="list-style-type: none"> • Conminución–Cianuración.

- Menas refractarias no fácilmente lixiviables: (menas del grupo 2 y 3). Requieren procesos previos de pretratamiento y/o métodos específicos de solubilización del oro. Ejemplos típicos de estos son los teluros, minerales sulfurosos y minerales carbonáceos.

Con respecto a la recuperación del oro de las soluciones cuando ya se ha realizado la cianuración, hay dos tipos de procesos industriales muy empleados:

- Merrill – Crowe por cementación con zinc.
- Adsorción con carbón activado, mediante carbón en pulpa (CIP), carbón en lixiviación (CIL) o carbón en lixiviación con oxígeno (CILO). Estos dos últimos incluyen lixiviación y adsorción.

El proceso Merrill – Crowe requiere una posterior purificación del precipitado de oro para obtener el metal en barra (bullón).

El proceso con carbón activado, requiere una desorción del carbón y posterior electrolisis de la solución.

2.2 EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN

2.2.1 Generalidades. Se considera como proceso de lixiviación, aquel realizado siempre en presencia de soluciones acuosas y en el cual hay suficiente solubilidad o disolución de los minerales o compuestos presentes en el material a tratar, de forma que se obtenga una concentración aceptable del metal de interés en la solución.

Es muy importante en este tipo de procesos, que se produzca un rechazo o poco consumo de los reactivos por los minerales o compuestos no útiles, considerados ganga; de forma que se faciliten los procesos posteriores de separación, obteniéndose soluciones de lixiviación de aceptable pureza en cuanto al metal deseado. Este concepto puede ser

incorporado al proceso, conociendo las constantes de solubilidad de la ganga y la mena útil en términos de las variables de mayor influencia en el proceso, tales como temperatura, presión y concentración.

Los procesos de lixiviación, generalmente involucran diferentes tipos de reacciones de disolución, uno de los tipos de reacciones de mayor importancia, corresponde a las reacciones de disolución con oxidación o reducción, debido a que incluye la cianuración de minerales auríferos.

- Reacciones de disolución con oxidación o reducción, este tipo de reacciones es de mucha importancia en la metalurgia, suceden cuando un metal (o elemento no metálico) en la solución tiene un estado de oxidación diferente de aquel que tenía en el mineral; para que se produzcan este tipo de reacciones durante la lixiviación, el sistema debe contener un agente oxidante o reductor, así la solubilidad del metal será función de la concentración de este agente en equilibrio con el mineral o compuesto que se está lixiviando. Como ejemplo de este tipo de reacciones, es de gran importancia la disolución de oro nativo en soluciones de cianuro:



2.2.2 Consideraciones cinéticas de la lixiviación. La economía de la lixiviación, especialmente los costos de capital de plantas de operación, en algunos casos es extendida a funciones de las velocidades de lixiviación, sin embargo la velocidad promedio de lixiviación no es tan importante como el tiempo de lixiviación necesario para llegar a una extracción aceptable.

Los materiales que se vayan a lixiviar pueden contener los valores minerales o compuestos a disolver, por lo menos en tres formas físicas diferentes:

1. Libres, como partículas puras.
2. Mezclado, como partículas multifases en la cual, el valor mineral se encuentra expuesto por lo menos de un lado al lixivante.
3. Disperso, como material rodeado por ganga y poco accesible o no accesible a lixivante.

Los minerales del tipo 3, se consideran inexplotables, mientras los del tipo 1 y 2 son considerados capaces de ser lixiviados directamente y la velocidad de lixiviación, puede ser expresada en primera instancia, en términos de la velocidad con que el mineral se va a dejar penetrar por el lixivante que lo va a atacar: $\frac{dx}{dt} = f(x)$, donde x es la distancia lineal de penetración normal a la superficie siendo lixiviada.

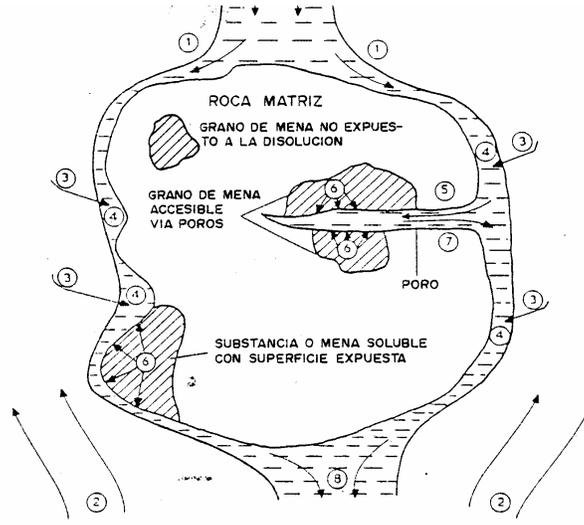
En general, si el proceso de disolución no deja residuos sólidos sobre la superficie de la fase atacada, y el sistema es adecuadamente agitado, la lixiviación tendrá un comportamiento lineal: $\frac{dx}{dt} = k$, donde k es una constante independiente de x o t .

Sin embargo, k será una función de la temperatura T y posiblemente de la solubilidad S , de la difusividad de la especie soluto en la solución D y un parámetro que describa la agitación tal como el número de Reynolds Re o la velocidad de agitación W .

La secuencia de pasos fundamentales en el proceso de lixiviación, se ilustran en la figura 4 y se pueden resumir como siguen:

1. Reactivos difunden a la superficie del mineral (agentes oxidantes, reductores, ligandos complejantes, iones hidroxilo o hidrogeno).
2. Adsorción de los reactivos sobre la superficie mineral.
3. Reacción química sobre la superficie del mineral.
4. Desorción de los productos de reacción de la superficie mineral.
5. Difusión de los productos de reacción hacia la solución.

Figura 4. Proceso típico del sistema de lixiviación.



- ① FLUJO DE LA SOLUCION DISOLVENTE
- ② OXIGENO TRANSPORTADO POR DIFUSION Y CONVECCION
- ③ DISOLUCION DE OXIGENO O AIRE
- ④ OXIDACION DE Fe^{2+} A Fe^{3+} POR ACCION BACTERIANA
- ⑤ Fe^{3+} Y ACIDO TRANSPORTADO POR DIFUSION
- ⑥ OXIDACION Y DISOLUCION
- ⑦ TRANSPORTE DE LA MENA POR DIFUSION
- ⑧ TRANSPORTE DE LA MENA POR DISOLUCION

Figura I.1. Proceso típico del sistema de lixiviación.
(Fuente: Warren Spring Laboratory. Estudio para CEE. 1981)

Fuente: Instituto tecnológico geominero de España. Minería química. 1991. Pg: 22

Cualquiera de estos pasos puede ser la etapa controlante en el proceso, la ecuación que define la constante de velocidad de reacción k , viene dada por:

<u>Paso</u>	<u>Constante de velocidad</u>
1	$k = xD_R(C_R^\circ - C_R^s)W^n$
2	$k = k' C_R^\circ$
3	$k = (K' C_R^\circ)/(1 + KC_R^\circ)$
4	$k = k''$
5	$k = xD_p(C_p^s - C_p^\circ)W^n$

Donde D_R , D_p = son constantes de difusión de los reactivos y los productos, x , k' , k'' , K' y K son varias constantes, C_R° , C_p° son la concentración de reactivos y productos en la solución, C_R^s , C_p^s son la concentración de reactivos y productos en la superficie, W es la velocidad de agitación y n es un exponente (constante).

En general, solamente los pasos 1 y 5 son dependientes de la velocidad de agitación para velocidades de lixiviación lineales.

Solamente el paso 4 es plenamente independiente de concentraciones de reactivos o productos pero el paso 3 sería muy similar a este si $KC_R^\circ \gg I$.

Aparte de la dependencia de la velocidad de agitación como un indicador del paso que determina la etapa controlante, también se puede tener indicación examinando la temperatura, sin embargo los pasos 1 y 5 tienen muy baja dependencia de la temperatura y además, generalmente los procesos comerciales de reacciones de lixiviación son controlados por la difusión (transporte)^[9] y se requiere tiempo para obtener la extracción deseada, que suele alcanzar el 90 – 95 %.

La figura 5, muestra una curva típica de extracción como función del tiempo. Esta curva se caracteriza por una velocidad inicial relativamente rápida y luego disminuye, a medida que la extracción se aproxima a la asintota de máxima extracción obtenible para un tamaño dado.

La caída en la velocidad, puede atribuirse a alguno de los siguientes aspectos:

- Disminución en el área superficial del mineral (partículas grandes disminuyen de tamaño y las pequeñas desaparecen).
- Disminución en la velocidad de lixiviación de partículas en rocas porosas o con grietas debido al incremento en las distancias de difusión.
- Disminución de la concentración del reactivo.
- Incremento de la concentración del soluto aproximándose a la saturación.
- Formación de productos de reacción insolubles sobre la superficie del mineral.

^[9] Society of Mining Engineers. Mineral processing handbook, 1985 pag. 13-11, 13-23.

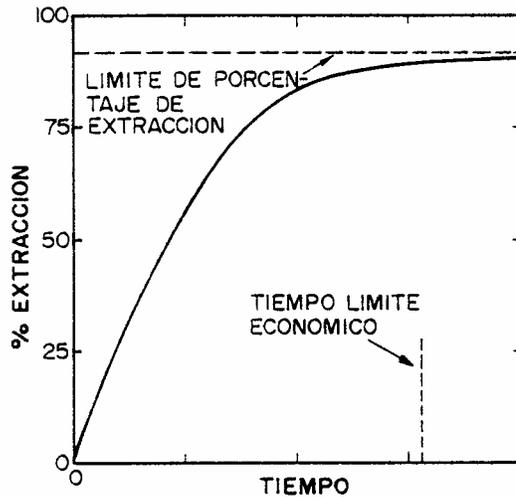


Figura 5 Porcentaje de extracción en función del tiempo

Fuente: Society of Mining Engineers. Mineral processing handbook, 1985 pg. 13-24

2.2.3 Variables del proceso

Normalmente la clave en los procesos de lixiviación, es obtener la máxima velocidad de disolución selectiva (mínimo de tiempo) ajustando las variables del proceso y minimizando los costos.

Las variables del proceso son: Tamaño o área superficial de los minerales, las distancias de difusión (Función de la agitación) y la concentración de los reactivos. A estas variables hay que agregar el potencial de oxidación – reducción, temperatura, densidad y viscosidad de pulpa, así como el agua de lavado usada en los circuitos. Algunas de estas variables las define el tipo de mineral y otras se definen según diseño de planta, pero igual el operador de la planta puede regular algunas.

2.2.3.1 Tamaño de partícula. A diferencia de otras variables del proceso, el tamaño de partículas impone las mayores restricciones sobre los porcentajes de extracción y el máximo obtenible.

Diferente de la flotación donde las partículas solo necesitan estar expuestas, en la lixiviación las partículas necesitan ser liberadas plenamente, con lo cual entre más fina sea la reducción de tamaño, mayor será la extracción. Este concepto nos lleva al punto conocido como límite económico de reducción de tamaño, o aquel punto donde los costos generados por una mayor reducción de tamaño no son cubiertos por una mayor extracción de los metales valiosos presentes. Tiene influencia en esta parte, la porosidad que puedan presentar algunas rocas. La figura 6, muestra el límite económico de molienda como función del tamaño de partícula.

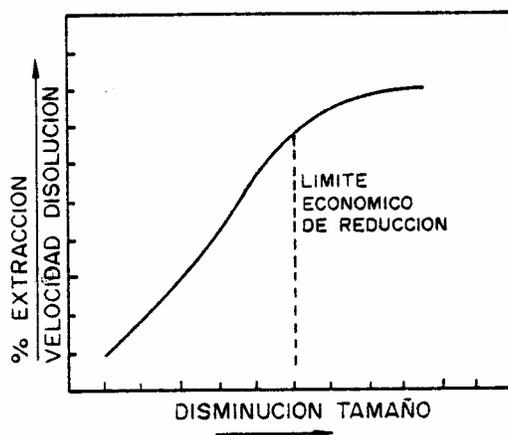


Figura 6. Extracción en función de tamaño.

Fuente: Instituto tecnológico geominero de España. Minería química. 1991. Pg: 52

Según el método propuesto por Kautzmann y Miltzarek^[10], la granulometría óptima en la cual se obtendrán las mayores disoluciones de oro, será aquella que en ensayos de cianuración convencional luego de 48 horas, presente las mayores disoluciones de este metal.

^[10] KAUTZMANN,R y MILTZAREK, G. Caracterizao tecnológica do minerio de riacho dos machados para fins de lixiviacao de ouro. Encontro nacional de tratamento de minerios e hidrometalurgia. Vol. II. Metalurgia Extractiva. Rio de Janeiro: CETEM, 1995.

2.2.3.2 Concentración de reactivos. Este es uno de los factores vitales en cualquier operación de lixiviación e incluye una de las variables mas o menos completamente bajo control del operador. Debido a que los costos de reactivos son una gran parte de los costos de operación, una optimización de la concentración del reactivo se hace necesaria para minimizar el consumo mientras se obtiene máxima extracción.

Aunque se conocen algunos principios que afectan la escogencia de la concentración de los reactivos, en general esta selección es sumamente compleja y requiere de trabajo experimental para encontrar la concentración optima para un determinado mineral.

En un modelo cinético simple, donde la velocidad de reacción es controlada por difusión y que involucre un solo reactivo, la velocidad de reacción será directamente proporcional a la concentración del reactivo.

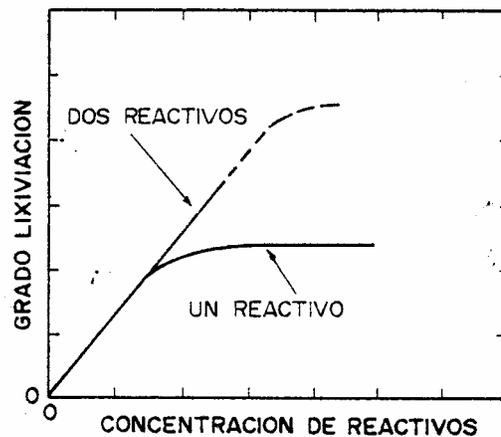


Figura 7. Lixiviación en función de la concentración de reactivos.

Fuente: Society of Mining Engineers. Mineral processing handbook, 1985 pg. 13-24

En sistemas que involucran dos o más reactivos, la máxima velocidad de reacción para una concentración variable de un reactivo, es limitada por la difusión del otro reactivo (determinada concentración), esto se observa en la figura 7. En este caso, se hace necesario

aumentar la concentración de ambos reactivos para obtener un aumento en la velocidad de disolución. Esta aplicación es fundamentalmente importante en sistemas que involucran la adicción de oxígeno a temperatura ambiente (Cianuración) debido a la limitada solubilidad del oxígeno.

La solubilidad de gases como el oxígeno en agua, es marcadamente dependiente de la temperatura y la presión, la solubilidad del oxígeno en agua a temperatura y presión ambiente varia de 4 – 10 ppm, lo cual es bajo comparado con otros gases, sin embargo mayores valores se pueden obtener presurizando el sistema; en algunos casos donde se requiere adicción de oxígeno, generalmente se emplea aire como suministro del oxígeno requerido.

2.2.3.3 Temperatura. Un incremento en la temperatura de lixiviación, usualmente suele utilizarse para aumentar la solubilidad de sustancias o incrementar la velocidad de reacción (Lixiviación oxidativa a presión) o minimizar la disolución de ganga.

Para reacciones controladas por difusión (energía de activación sobre 4 kcal/mol), el efecto de aumentar la temperatura sobre un rango determinado, crea un incremento en la velocidad de reacción que es más o menos lineal (Ver figura 8).

Para minerales de metales como el oro, cobre, uranio y otros metales base, un incremento en la temperatura de procesamiento tiene poca importancia y por eso se utiliza temperatura ambiente^[11].

^[11] Society of Mining Engineers. Mineral processing handbook, 1985. Pag 13-25.

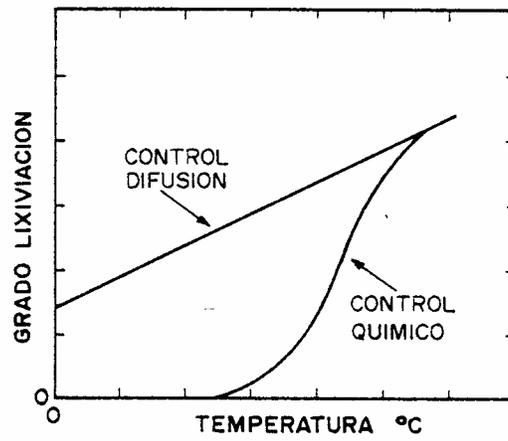


Figura 8. Efecto de la temperatura sobre la difusión y reacción química.

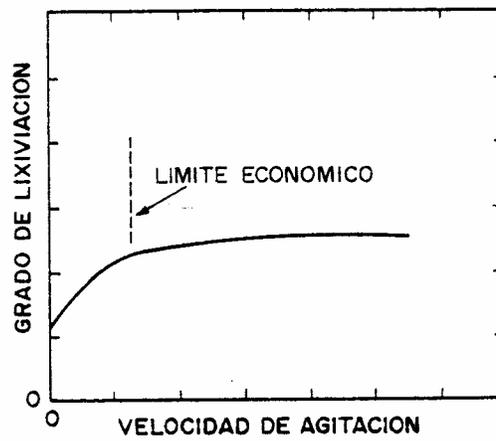


Figura 9. Efecto de la agitación en el grado de lixiviación.

Fuente: Society of Mining Engineers. Mineral processing handbook, 1985 pg. 13-24

2.2.3.4 Velocidad de agitación. La figura 9, muestra como para reacciones controladas por difusión, cuando se estudian con disco rotatorio u otro método, el efecto de aumentar la velocidad de agitación, se ve reflejado en un incremento en la velocidad de reacción hasta un valor límite debido a la reducción del espesor en la capa límite de difusión.

Un aumento de energía en un sistema de lixiviación mediante un agitador, tiende a incrementar la pendiente de la curva en la primera parte de esta, pero no afecta la parte final de la curva. De este modo, el tiempo necesario para obtener una extracción cercana al máximo es casi el mismo que sin aumento de agitación (ingreso de energía). En algunos casos, solo se aumenta la agitación para prevenir que haya sedimentación de la pulpa.

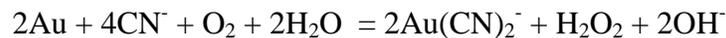
En casos donde se debe adicionar al sistema un reactivo gaseoso, como en la cianuración con agitación, una de las funciones principales de la agitación es permitir la transferencia de masa del gas al líquido.

2.2.3.5 Densidad de pulpas. La densidad de pulpas o relación sólido- líquido, cubre un amplio rango en lixiviación con agitación y depende de factores como: método de preparación del alimento, tamaño requerido de partículas, tipo de mineral, requerimientos del proceso, etc.

Para la mayoría de minerales (Au, Cu, U, Ni), donde el porcentaje disuelto es poco comparado con el porcentaje alimentado, los porcentajes de pulpa durante la lixiviación no son críticos, aunque si influyen el tiempo promedio de residencia en agitación, en estos casos se utiliza el valor más alto conveniente. En general, el factor que más afecta la densidad de pulpa es la forma de preparación del alimento, aunque el circuito de lavado y el carácter del mineral también pueden tener efecto.

2.3 CIANURACIÓN DE MINERALES DE ORO

2.3.1 Generalidades. En la mayoría de los minerales de oro, este elemento se encuentra en forma metálica y debe ser oxidado durante el proceso de disolución. Cuando se tiene el oxígeno como oxidante, la reacción de lixiviación es:



El oxígeno se suministra a través del aire y a la vez sirve para agitar la pulpa, el cianuro se adiciona como cianuro de sodio o de calcio y la cal se utiliza para controlar la alcalinidad.

La disolución de oro, puede verse afectada negativamente por cianicidas (minerales de cobre, sulfuros de arsénico y antimonio, sulfuros de otros metales, azufre y minerales arcillosos), que no solo disminuyen la concentración de cianuro disponible para la lixiviación sino que además pueden inhibir el proceso.

Durante el proceso de lixiviación, la velocidad de cianuración de oro está controlada por la difusión y puede ser limitada por el transporte de reactivos, oxígeno o cianuro dependiendo de su concentración relativa. La velocidad, también puede ser controlada por la velocidad de reacción en la superficie, y esto sucede cuando bajo ciertas condiciones, se forman capas básicas de cianuro auroso y causa pasivación de las partículas.

2.3.2 Cinética de la disolución de oro (Cianuración). Para poder explicar la cinética de disolución de oro en soluciones acuosas cianuradas, existen tres ecuaciones clásicas, estas son:

- Ecuación de Elsner (1846):



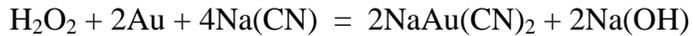
- Ecuación de Janin (1892):



- Ecuación de Bodlaender (1896):



el peróxido de hidrógeno, vuelve a reaccionar:



Esta última ecuación es similar a la ecuación de Elsner, donde el peróxido de hidrógeno desaparece en un balance total.

En 1934, Barsky, Swaison y Hedley, determinaron las energías de formación de los complejos aurocianurados, obteniéndose estos resultados:

Elsner: -90 Kcal/mol

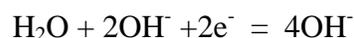
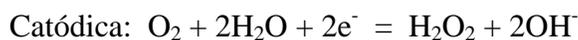
Janin: +13.5 Kcal/mol

Bodlaender: -22.5 Kcal/mol

Según estos resultados, la ecuación de Elsner es la que mejor describe la disolución del oro mediante cianuración, por tener mayor cambio de energía libre negativa. Se demostró que esta reacción sucede hasta que todo el cianuro se ha consumido o todo el metal se ha disuelto.

Con el paso del tiempo y de forma muy gradual, se ha establecido que la lixiviación de oro es básicamente un proceso de corrosión electroquímico, con la velocidad controlada por difusión del cianuro (CN^-) y oxígeno (O_2) o por la reducción del oxígeno sobre el mineral.

La velocidad de disolución, no se puede aumentar significativamente porque el oro es pasivado por el cianuro o por la formación de capas de óxidos. Hacia 1980, Nicol aclara que en el proceso, el mineral presenta dos áreas adyacentes: catódica y anódica, con el siguiente mecanismo de lixiviación:



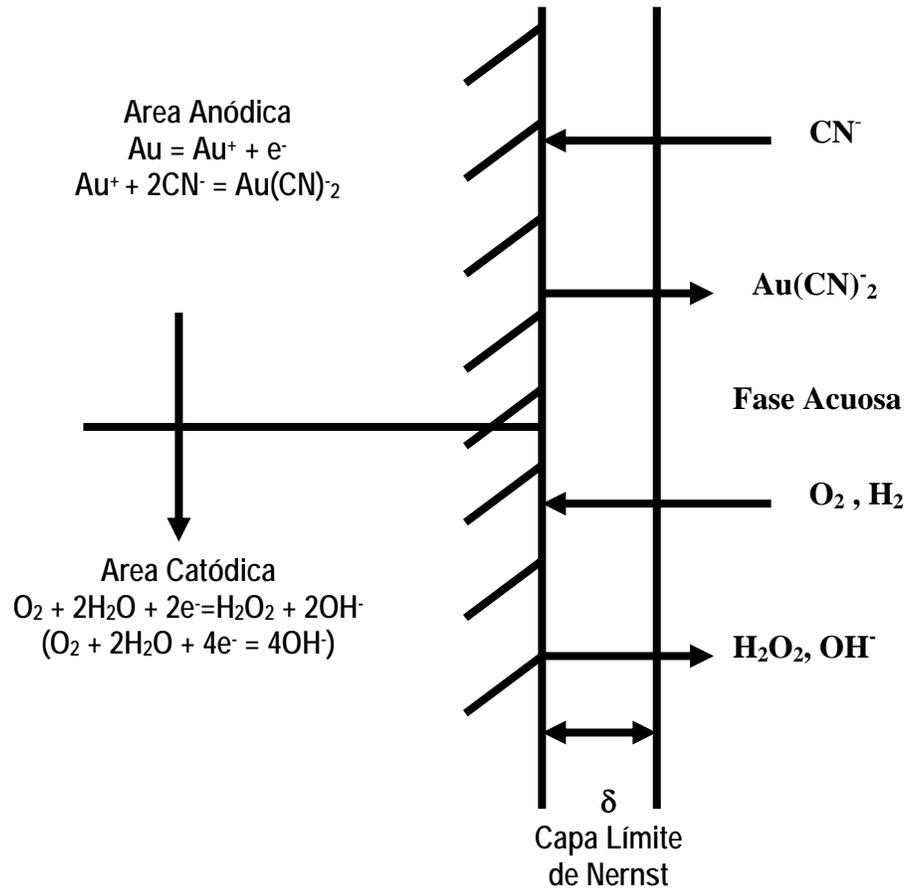
Una representación esquemática de este proceso se muestra en la figura 10. Este esquema está más en concordancia con la ecuación química de Bodlaender (formación intermedia de H_2O_2) que con la ecuación de Elsner, lo cual puede confirmarse con el hecho que pequeñas adiciones de H_2O_2 aumentan ligeramente el grado de disolución del oro, pero concentraciones mayores, pasivan la superficie y retardan la disolución.

Aparte de la reacción química, la cianuración de oro está regida por procesos físicos de difusión con varias etapas; entre ellas: Disolución de cianuro y oxígeno, transporte de estos reactivos a la superficie de mineral, adsorción del cianuro y oxígeno, la reacción electroquímica y la formación del complejo cianurado y al final la desorción y transporte de este complejo a la solución.

Este proceso de cianuración, obedece a parámetros químicos como la concentración de cianuro y oxígeno, la influencia de la agitación, que afecta la difusión y la temperatura que afecta la velocidad de reacción química, además está la alcalinidad que actúa como agente protector evitando hidrólisis del cianuro.

Cuando el proceso se presenta en condiciones normales de agitación, temperatura y oxígeno disuelto, la disolución la rige la difusión de CN^- , pero si la concentración de CN^- se aumenta hasta que sea mayor que la concentración de O_2 , está regirá la disolución.

Figura 10. Disolución Electroquímica de Oro en Soluciones



Fuente: López, María Esperanza. La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de minerales auroargentíferos. Tesis de Maestría en ingeniería metalúrgica, UIS, 1999. Bucaramanga

2.3.3 Efecto de las principales variables sobre la cianuración. El proceso de lixiviación de minerales, a través de un reactivo químico, está influenciado por una gran cantidad de variables, que muchas veces dificulta su control. Para tener conocimientos sobre la influencia de estos factores, se recurre a experimentación con minerales a condiciones tan idénticas como sea posible al proceso de cianuración de oro, sin embargo muchas veces se presentan desviaciones o comportamientos anormales, muchas veces difíciles de explicar.

Entre los principales factores que influyen el proceso de cianuración de minerales de oro tenemos: la velocidad de flujo, concentración de cianuro, alcalinidad, concentración de oxígeno, temperatura, agentes reductores, etc.

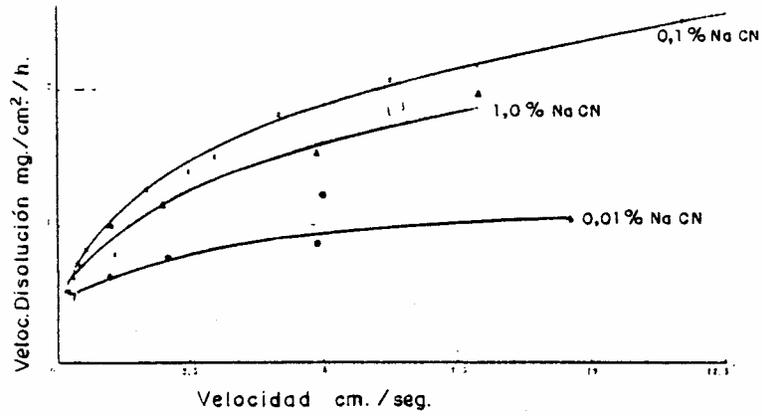
2.3.3.1 Velocidad de flujo. Este tipo de variable aplicada a la cianuración de oro, expresa los resultados de la velocidad de disolución de oro a diferentes concentraciones de cianuro y diferentes velocidades de flujo. La representación gráfica de estos resultados en forma normal y logarítmica se observan en la tabla 3 y figura 11(a y b).

Tabla 3. Influencia de la velocidad de flujo en la cianuración

Velocidad V cm/seg.	Disolución m mg/cm ² /h	Log V	Log m
I) Concentración NaCN = 0,01%			
0,21	0,52	-0,68	-0,28
0,31	0,48	-0,51	-0,32
0,99	0,62	0,00	-0,21
2,1	0,76	+0,33	-0,12
4,9	0,86	+0,69	-0,07
5,0	1,22	+0,79	+0,09
9,6	1,05	+0,98	+0,02
II) Concentración NaCN = 0,1%			
0,22	0,59	-0,66	-0,23
0,55	0,82	-0,26	-0,09
1,1	0,79	+0,04	-0,12
1,7	1,27	+0,23	+0,10
2,9	1,40	+0,40	+0,15
3,0	1,50	+0,48	+0,18
4,2	1,81	+0,62	+0,26
6,3	2,07	+0,80	+0,32
7,9	2,17	+0,90	+0,34
11,7	2,51	+1,06	+0,40
13,2	2,63	+1,12	+0,42
III) Concentración NaCN = 1%			
0,24	0,62	-0,62	-0,21
0,37	0,72	-0,43	-0,14
1,0	1,0	0,00	0,00
2,0	1,15	+0,30	+0,06
4,9	1,52	+0,69	+0,18
7,9	1,96	+0,90	+0,29

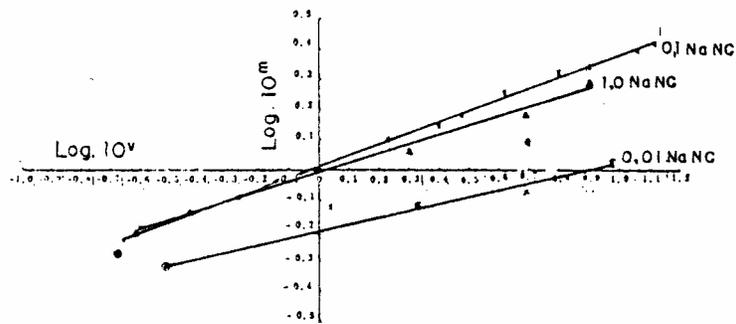
Fuente: Instituto tecnológico geominero de España. Minería química. 1991. Pg: 206

Figuras 11a - 11b. Disolución de oro en función de la velocidad de flujo



Disolución oro en función velocidad flujo

Fuente: Instituto tecnológico geominero de España. Minería química. 1991. Pg: 207



Idem. Representación logarítmica.

En la representación de estos datos, se obtiene una línea recta para cada concentración, representada por la ecuación:

$$\text{Log } m = n \log V + C$$

Donde n es la pendiente de la recta, m es la velocidad de flujo (cm/seg), V es la velocidad de disolución (mg/cm²/h), C es prácticamente cero o despreciable. Por tanto:

$$m = K V^n$$

K tiene los valores 0.63 (para 0.01 % de NaCN) y 1 (para 0.1 y 1 % de NaCN).

2.3.3.2 Concentración de cianuro. El efecto de la concentración de cianuro, se analiza tomando una velocidad constante (5cm/s) y sometiendo las muestras a diferentes concentraciones de cianuro, donde se obtienen resultados como los mostrados en la tabla 4.

Tabla 4. Influencia de la concentración de cianuro en la disolución de oro

INFLUENCIA CONCENTRACION CIANURO EN CIANURACION

Concentración % NaCN	Disolución mg/cm ² /h
0,005	0,77
0,01	0,93
0,015	1,11
0,02	1,13
0,026	1,38
0,03	1,38
0,04	1,42
0,05	1,31
0,106	1,41

Fuente: Instituto tecnológico geominero de España. Minería química. 1991. Pg: 208

Según estos resultados, la velocidad de disolución de oro en soluciones de cianuro aumenta hasta un máximo para concentraciones de cianuro de 0.025 %, manteniéndose prácticamente constante por encima de este valor. Esto concuerda con la teoría de la

película de difusión que dedujo que por encima de 0.02 % la velocidad de disolución se mantenía constante. Es por esta razón que la mayoría de las plantas de cianuración utilizan soluciones entre 0.02 y 0.03 % de cianuro libre para tratar sus minerales de oro.

2.3.3.3 Alcalinidad. Las principales funciones del hidróxido de calcio en la cianuración son prevenir las pérdidas de cianuro por hidrólisis, neutralizar los compuestos ácidos y ayudar a la floculación o sedimentación de partículas, clarificando la solución y permitiendo que se pueda separar el mineral tratado de la solución rica.

Sin embargo, algunos investigadores han determinado que la velocidad de disolución disminuye rápidamente con la adición de cal, cuando se está cerca de $\text{pH} = 11$ y llega a ser casi nula a pH cercano a 12. Esta influencia se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Influencia de la concentración de álcalis

% Na (OH)	Disolución mg/cm ² /h
0,012	1,69
0,022	1,70
0,051	1,69
0,11	1,58
0,16	1,43
0,30	1,46
% Ca (OH)	Disolución mg/cm ² /h
0,00	1,46
0,002	1,51
0,006	1,63
0,009	1,85
0,012	1,68
0,019	1,23
0,031	0,92
0,047	0,68
0,077	0,41

Fuente: Instituto tecnológico geominero de España. Minería química. 1991. Pg: 209

Según estos resultados, el aumento en la concentración de álcalis tiene efecto adverso e la disolución de oro.

2.3.3.4 Concentración de oxígeno. El oxígeno es promotor de la disolución de metales preciosos en soluciones cianuradas. Para este propósito, suele utilizarse el oxígeno absorbido por las soluciones circulante y agitadas y muchas veces introducido como adicción en los tanques de agitación.

El efecto debido a la concentración de oxígeno en la disolución de minerales de oro mediante cianuración, se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Influencia de la concentración de oxígeno en la cianuración

% NaCN	mg.O ₂ /litro	Disolución mg/cm ² por h.
0,01	10,0	0,65
	17,5	0,75
	28,4	0,52
	31,5	0,58
	34,6	0,20
0,025	10,0	1,67
	12,3	1,62
	17,7	1,55
0,25	21,3	1,70
	26,8	1,03
	32,2	0,72
	9,5	1,54
	13,6	2,11
	22,7	2,22
	28,6	1,76
0,10	33,6	1,80
	2,8	0,30
	4,0	0,54
	9,0	1,80
	14,2	2,63
	17,2	2,40
0,20	24,6	2,01
	31,0	1,81
	9,0	1,76
	14,3	2,80
	22,5	3,70
0,50	27,8	4,15
	33,5	3,30
	10,0	1,40
	12,5	2,28
	15,5	2,56
	18,0	3,19
	20,5	3,38
	22,3	3,55
	23,7	4,49
	27,4	3,84
29,4	2,00	

Fuente: Instituto tecnológico geominero de España. Minería química. 1991. Pg: 210

Según estos resultados, el aumento de la concentración de oxígeno en la disolución aumenta hasta un máximo, por encima del cual disminuye la disolución, pero este máximo aumenta con la concentración de cianuro.

La concentración de oxígeno que presenta mayor razón de disolución no está definida, pero parece estar entre 14 y 28 mg O₂ por litro de solución o entre 31 y 62 % de saturación.

Aunque el exceso de oxígeno en la solución puede disminuir la velocidad de disolución, en la práctica los minerales de oro contienen constituyentes consumidores de oxígeno que retarden o inhiban la disolución, pudiendo el problema deberse a deficiencia de oxígeno.

2.3.3.5 Temperatura. La velocidad de disolución de oro incrementa con la temperatura hasta un máximo de 85 °C, sin embargo, este aumento en la disolución de oro es copiado por el aumento en el consumo de cianuro, pese a esto, muchas plantas siguen utilizando esta temperatura en sus procesos mediante calentamiento artificial.

2.4 LIXIVIACIÓN DIAGNOSTICA DE MENAS AURIFERAS

2.4.1 Generalidades. El concepto de lixiviación diagnostico, es muy simple. El mineral menos estable presente en la matriz de la muestra, es solubilizado primero en un medio acuoso ácido. El residuo es filtrado, lavado (agua/solución de ácido diluido) y cianurado para extraer el oro liberado en la etapa de destrucción del mineral menos estable en la matriz de la muestra y la cual se encontraba asociado, luego los sólidos son lavados con solución diluida de cianuro y alistada para repetir el procedimiento de destrucción del siguiente mineral que pueda estar asociado con el oro.

El proceso se repite con una lixiviación ácida cada vez mas oxidativa hasta que todo el oro no refractario y recianurado es lixiviado por el cianuro y se obtiene un registro de la cantidad de oro asociado con cada uno de los diferentes minerales presentes en la matriz de la muestra y la extensión total de la reacción de extracción, que generalmente está dentro del 90 %. La metodología para el diseño y la implementación de un ensayo de lixiviación diagnostica de minerales auríferos, se presenta a continuación mediante diagramas de flujo.

Metodología de aplicación de procedimientos de ensayo de lixiviación diagnóstico(Diagramas de flujo):

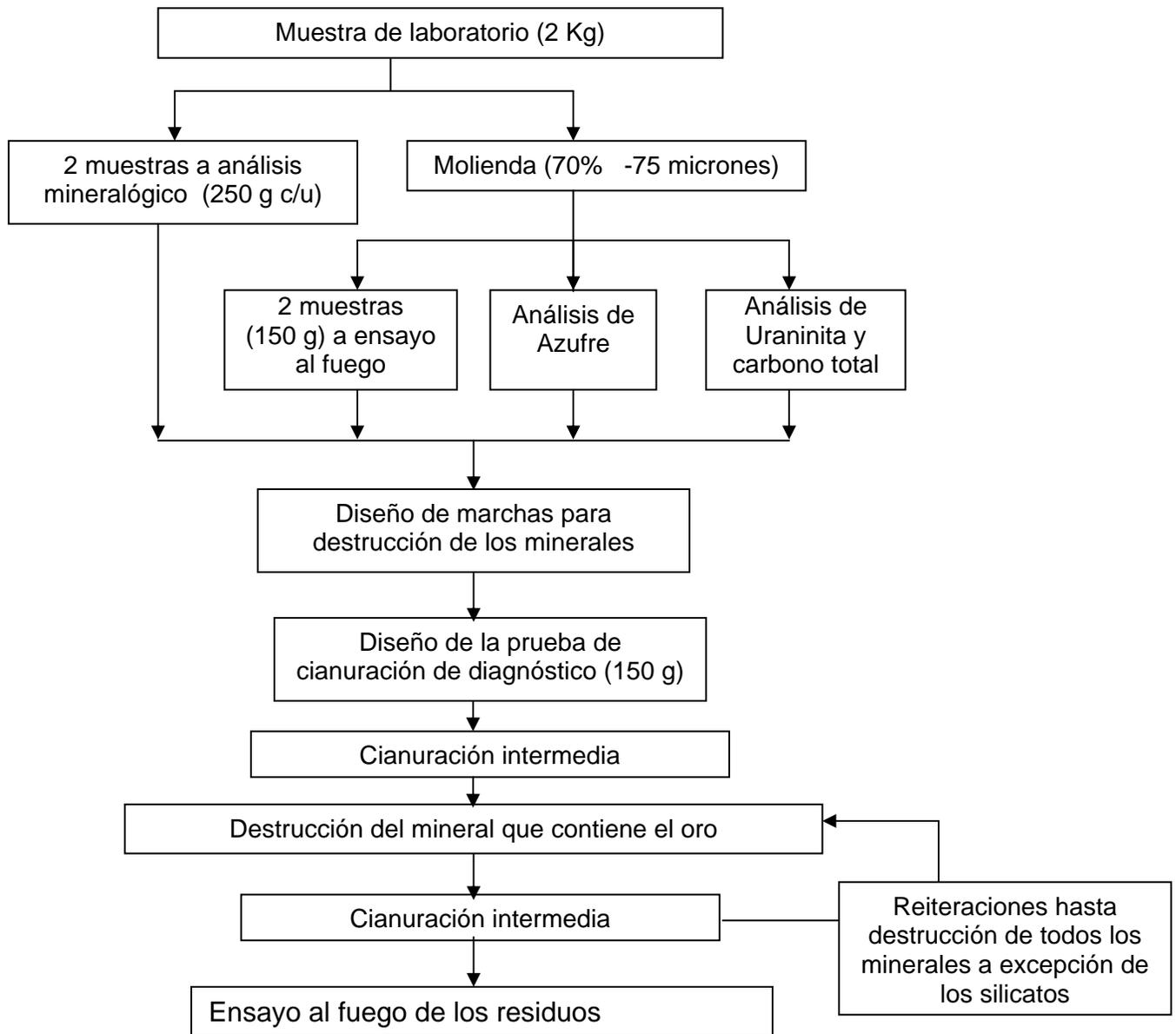


Figura 12. Procedimiento de Preparación de un ensayo de cianuración diagnóstico

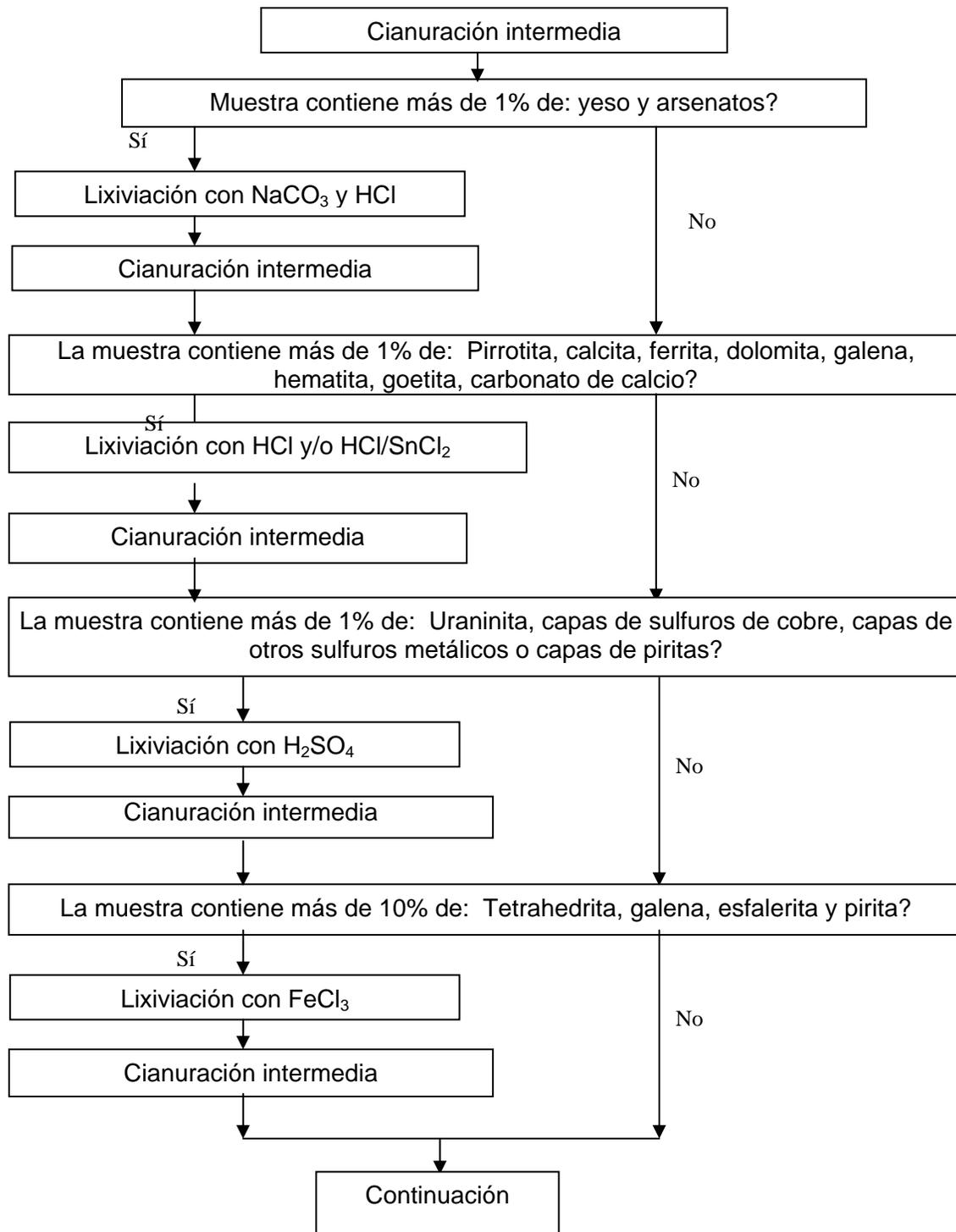


Figura 13. Procedimiento de Diseño de un Ensayo de cianuración de diagnóstico

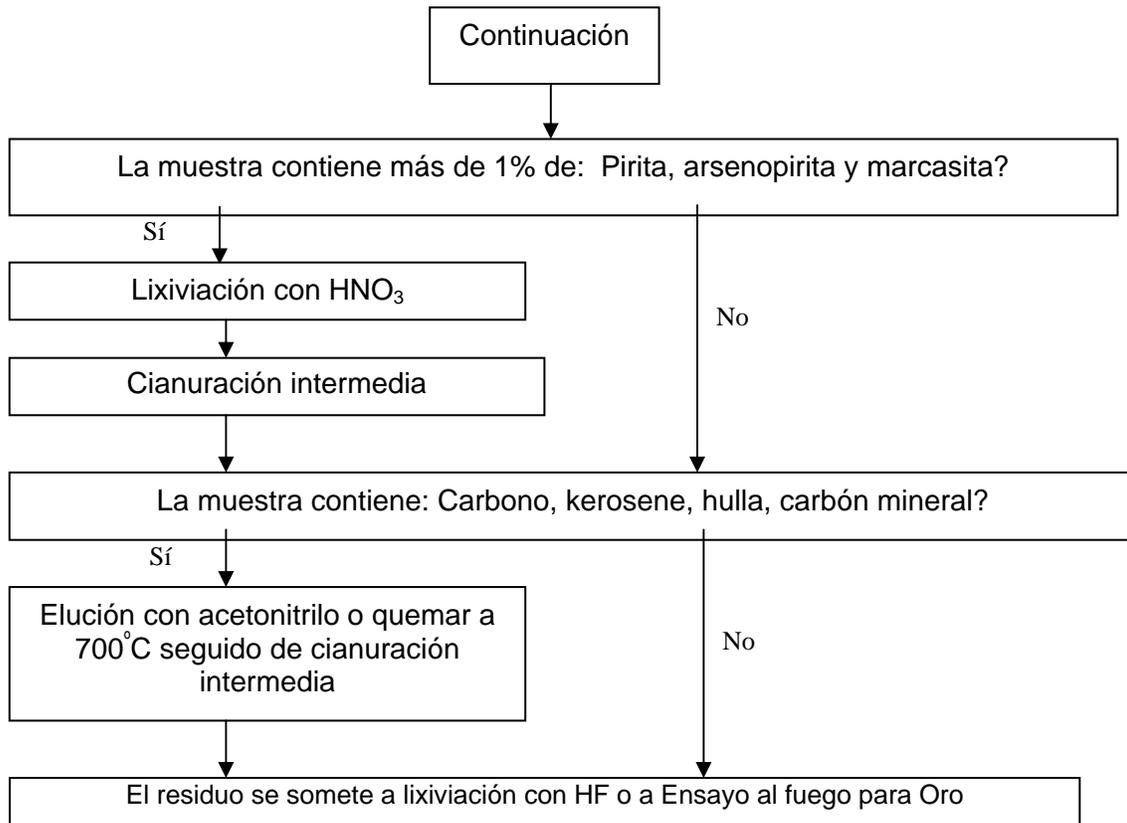


Figura 14. Procedimiento de Diseño de un ensayo de cianuración diagnóstico (Continuación)

Fuente: Lorenzen, L. Some guidelines to the design of a diagnostic leaching experiment. Minerals Engineering, Vol. 8, No. 3, pg 247 - 256. 1995.

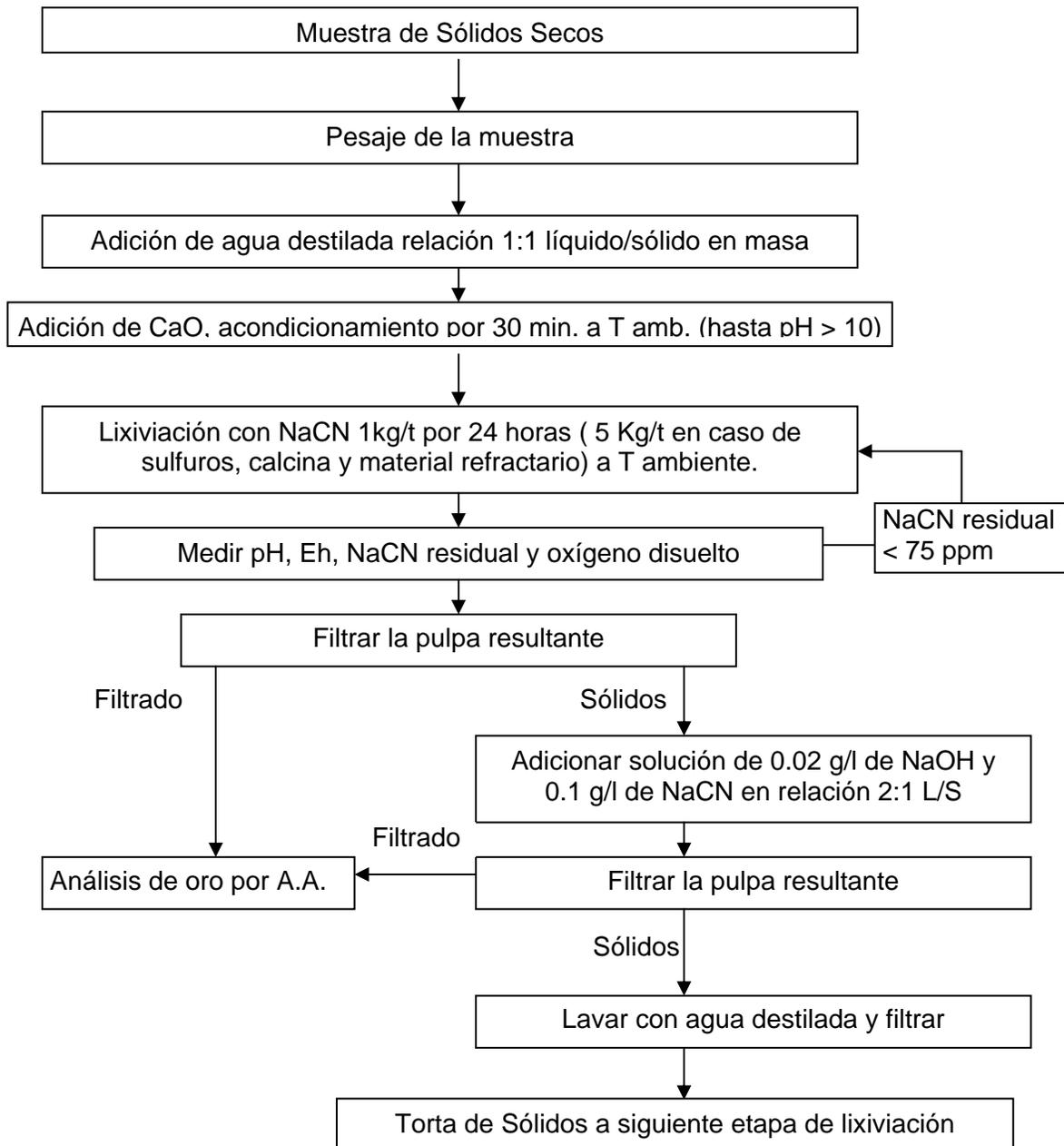


Figura 15. Procedimiento de Cianuración intermedia en un ensayo de cianuración diagnóstico

Fuente: Lorenzen, L. Some guidelines to the design of a diagnostic leaching experiment. Minerals Engineering, Vol. 8, No. 3, pg 247 - 256, 1995.

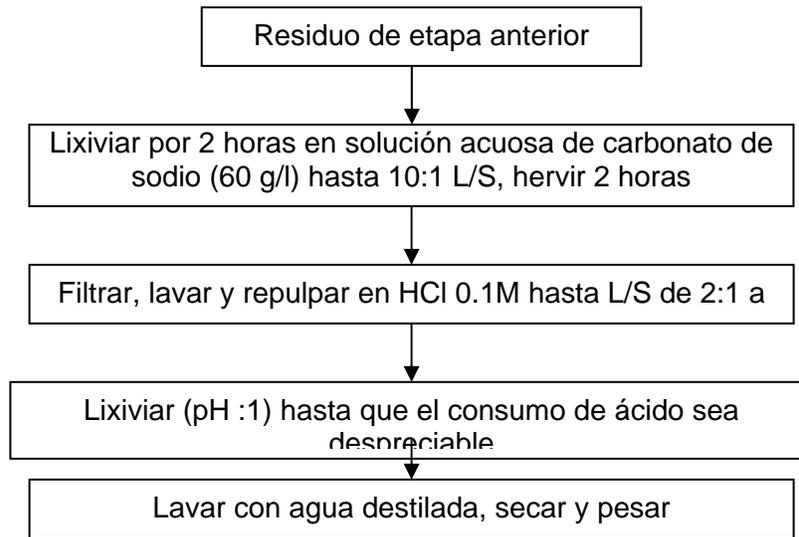


Figura 16. Procedimiento para determinación de yeso y arsenatos

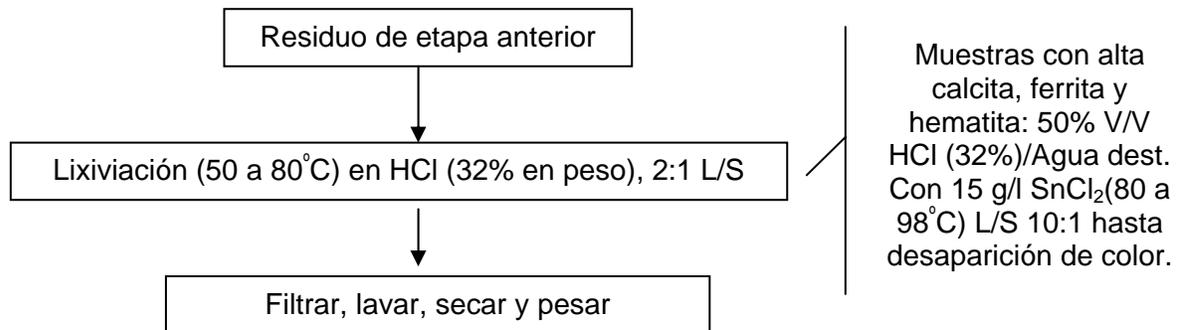


Figura 17. Procedimiento para determinación de pirrotita, calcita, ferritas, dolomita,

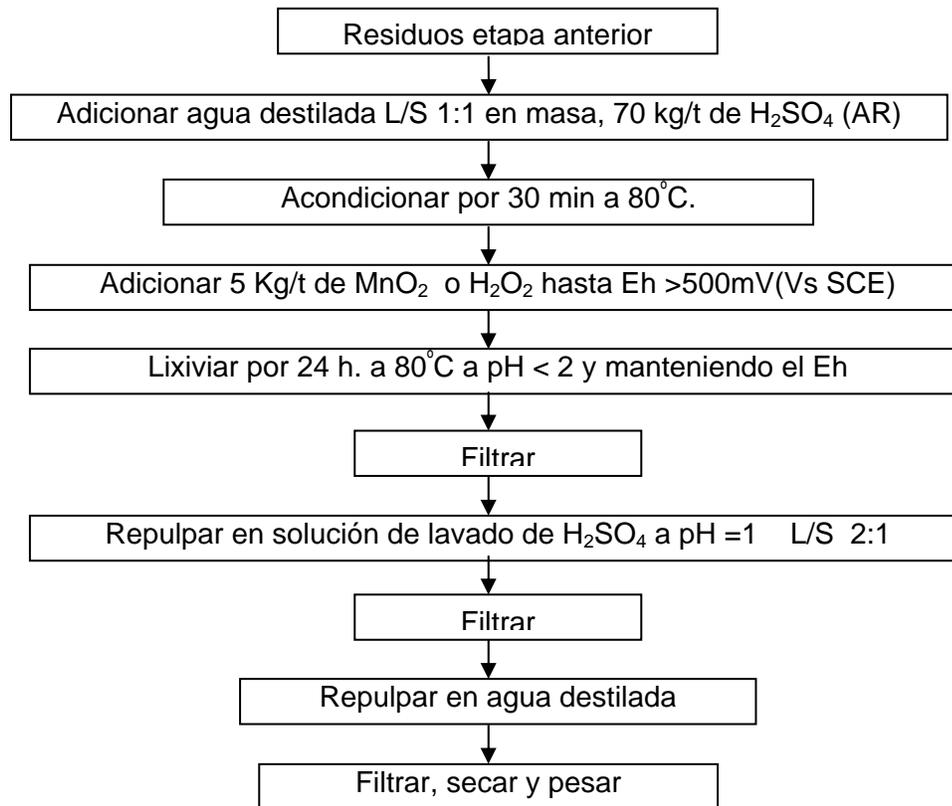


Figura 18. Procedimiento para Determinación de uraninita, sulfuros de cobre y otros sulfuros de metal base



Figura 19. Procedimiento para Determinación de oro asociado a tetrahedrita, galena, esfalerita y pirita concentrada.

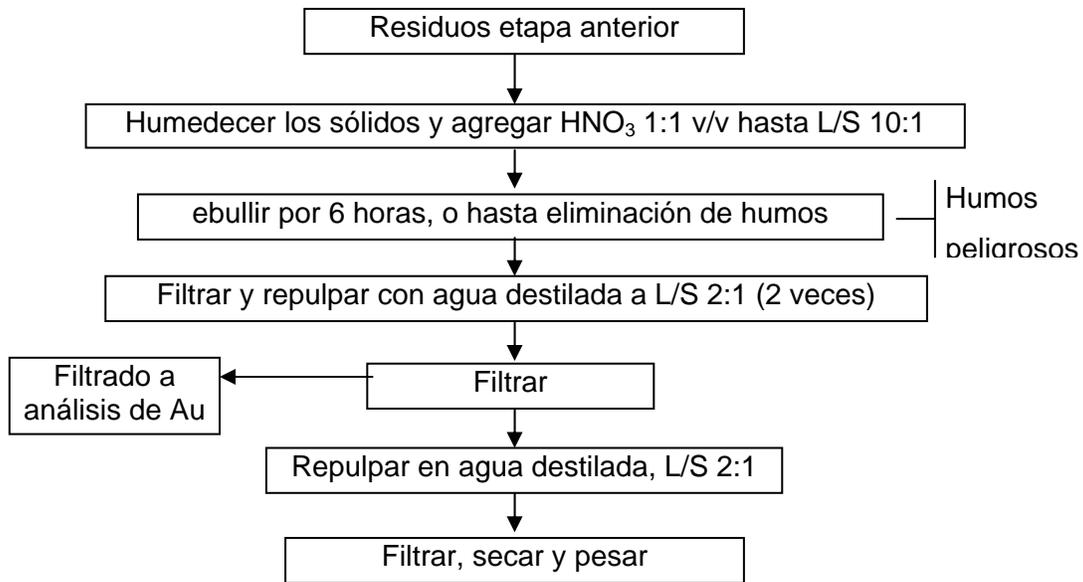


Figura 20. Proceso de Determinación de pirita, arsenopirita y marcasita

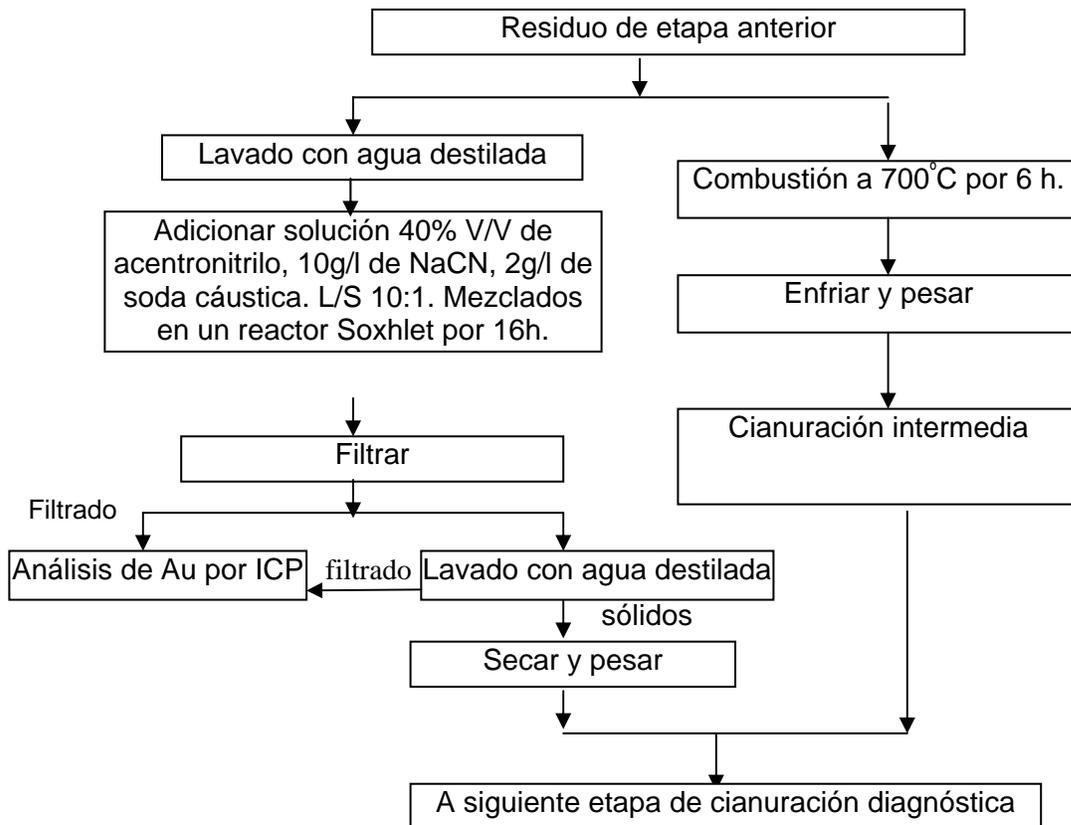
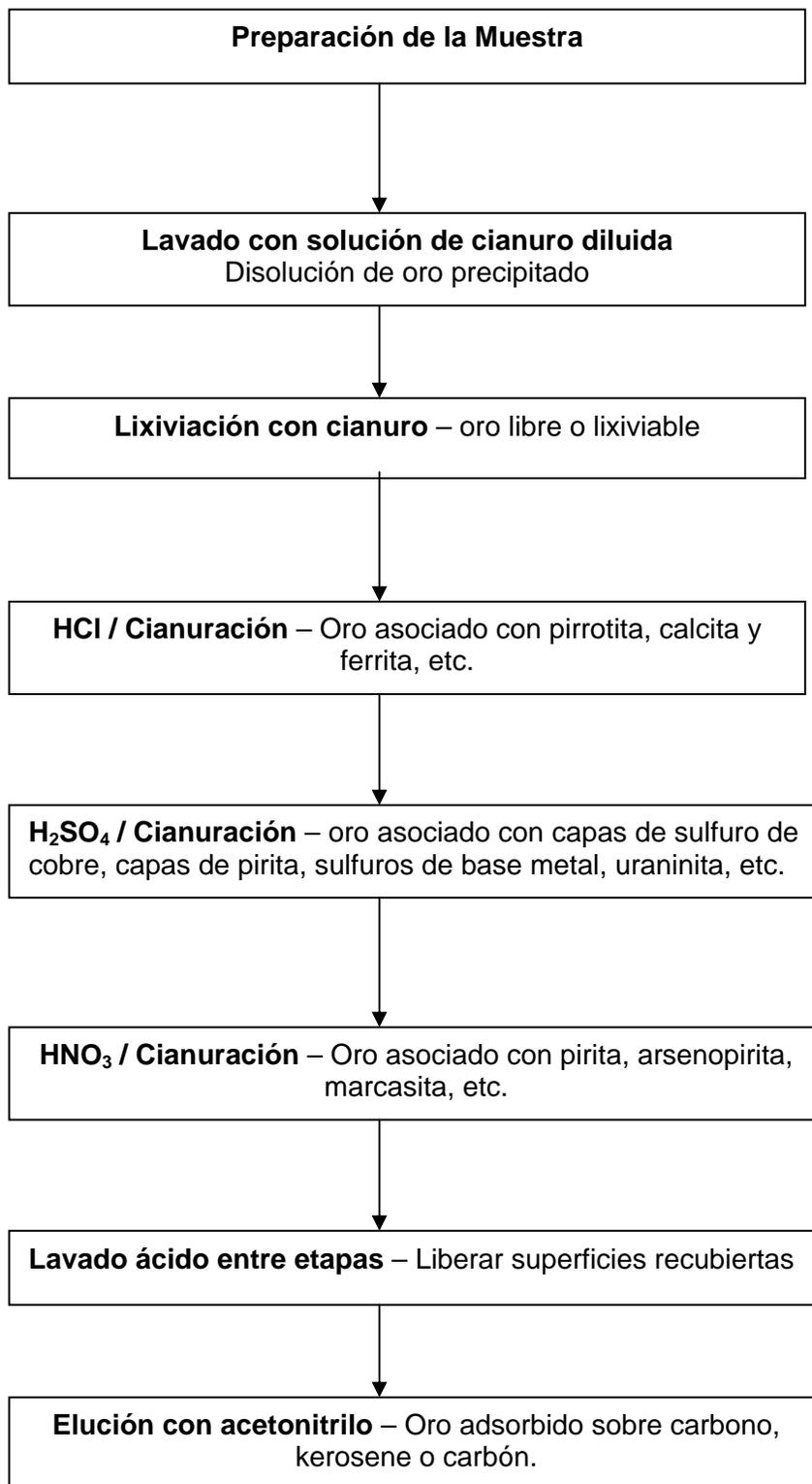


Figura 21. Proceso de Determinación en matriz carbonácea

Figura 22. Representación Típica de un Ensayo de Lixiviación Diagnóstico (Cianuración)



2.5 CORRELACIONES Y MODELAMIENTO

2.5.1 Correlaciones entre mineralogía y extracción de oro. La interrelación entre el grado de liberación y el comportamiento en lixiviación de los minerales de oro, es un tema que aun no se ha desarrollado profundamente, en parte debido al poco entendimiento que se tiene del tema y principalmente debido a la complejidad de estos procesos individuales (lixiviación y grado de liberación mineral).

Miembros de la Universidad de Stellenbosch (Sudáfrica)^[12], han concluido que la lixivabilidad de las menas no es solamente dependiente del grado de liberación que se alcance en la conminución, sino que además depende del grado de exposición que alcanza en si las partículas o granos de oro en el mineral de mena que lo contiene, encontrando que el grado de liberación (lixiviabilidad), es una función no solamente del tamaño de partícula al cual se ha sometido conminución la mena de interés sino también de la forma de ocurrencia del oro (partículas) en los minerales de mena, lo cual refuerza la utilidad de la técnica de lixiviación diagnóstica en combinación con otros ensayos.

Estos investigadores propusieron el siguiente tipo de correlaciones para el oro contenido en los diferentes minerales de mena:

2.5.1.1 Oro asociado a sulfuros de base metálica. El comportamiento del oro asociado a estos minerales corresponde al tipo de ecuación matemática:

$$Au_{SBM} = a_1 + b_1 \ln t$$

Donde Au_{SBM} , es el porcentaje de oro asociado a estos minerales, a y b son constantes características del tipo de mena tratada y t es el tiempo en horas.

^[12] Lorenzen, L y Annandale, G. Interrelationship between mineral liberation and leaching behaviour of refractory ores. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Stellenbosch, Sudáfrica. ICAM 1996.

2.5.1.2 Oro asociado a pirita. El comportamiento en disolución de cianuro del oro asociado a estos minerales corresponde al tipo de ecuación matemática:

$$Au_{PIRITA} = a_2 + b_2 \sqrt{t}$$

Donde Au_{PIRITA} , es el porcentaje de oro asociado a estos minerales, a y b son constantes características del tipo de mena tratada y t es el tiempo en horas.

2.5.1.3 Oro asociado a silicatos. El comportamiento en disolución de cianuro del oro asociado a estos minerales corresponde al tipo de ecuación matemática:

$$Au_{SILICATOS} = e^{a_3 + b_3 \sqrt{t}}$$

Donde $Au_{SILICATOS}$, es el porcentaje de oro asociado a estos minerales, a y b son constantes características del tipo de mena tratada y t es el tiempo en horas.

2.5.2 Modelo de balance de población. El modelo de balance de población, es un procedimiento general utilizado para predecir cambios en la distribución de propiedades para procesos cinéticos que involucran partículas.

El procedimiento que se sigue en este, proporciona las bases para predecir cambios en distribuciones de partículas, así como los cambios en la distribución de constituyentes valiosos durante la lixiviación y otros procesos de interés en metalurgia extractiva.

En 1964, dos grupos de investigadores, Hulburt y Katz, Randolph y Larson, notaron que muchos de los problemas que involucran cambios en sistemas particulados no podían ser solucionados utilizando expresiones de velocidad, continuidad y masa como usualmente se hace. Pero de igual forma notaron que estos sistemas poseen la así llamada distribución de propiedades, entonces propusieron el uso de una ecuación para la continuidad de un número de partículas, lo que llamaron "Balance de Población", como una forma de describir el comportamiento de tales sistemas.

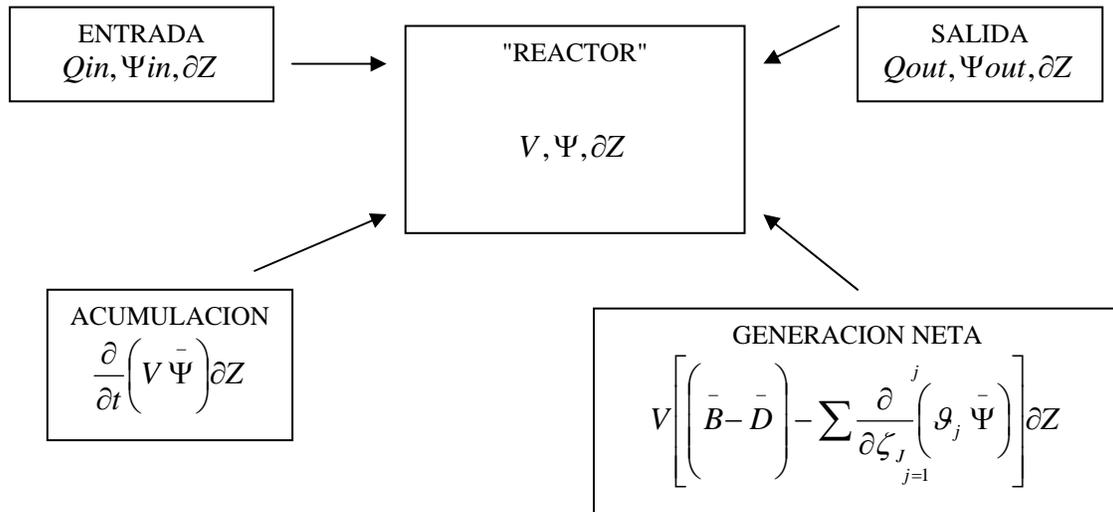
Este balance, se puede desarrollar a partir de la ecuación de conservación:

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{salidas} + \text{Generación Neta} \quad \text{Ec. (0)}$$

Esta ecuación, aplicada a un sistema de partículas con un set de propiedades $\{\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_j\}$ donde entradas y salidas, representan cambios en el número de partículas en el intervalo de la propiedad específica resultante del flujo convectivo (influjo y exflujo), mientras que el término de generación, cuenta para partículas que entran y dejan el intervalo de la propiedad específica, como resultado de la cinética de las partículas individuales, tales como la reacción química, rompimiento de partículas, etc.

Los autores, desarrollaron dos formas de balance de población: La forma microscópica, que toma los cambios en una población de partículas en un volumen infinitesimal en cualquier posición geométrica (x,y,z) como una función del tiempo. La otra forma, la macroscópica, tiene en cuenta los cambios promedios en la población de partículas dentro de un recipiente de procesamiento completo (suprime la dependencia espacial).

La forma microscópica requiere de información del flujo del recipiente muy detallada para su implementación (perfiles de velocidad de partículas). La forma macroscópica, es aplicable cuando se puede asumir como primera aproximación un buen mezclado o cuando se tiene información de la distribución de los tiempos de residencia.



$$\frac{\partial}{\partial t} (V \bar{\Psi}) = Q_{in} \Psi_{in} - Q_{out} \Psi_{out} + V \left[\left(\bar{B} - \bar{D} \right) - \sum_{j=1}^j \frac{\partial}{\partial \zeta_j} \left(g_j \bar{\Psi} \right) \right]$$

De acuerdo a este esquema, se puede asumir que dentro de un reactor (recipiente de lixiviación) en un tiempo (t), tenemos un total de partículas $\bar{n}(t)$ por unidad de volumen y además que: $f_0(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j; t) \partial \zeta_1 \partial \zeta_2 \dots \partial \zeta_j$ es la fracción de estas partículas con propiedad Z_1 entre ζ_1 y $\zeta_1 + \partial \zeta_1$ y la propiedad Z_2 entre ζ_2 y $\zeta_2 + \partial \zeta_2$; abreviando entonces:

$$\bar{\Psi} \partial Z = \bar{n}(t) f_0(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j; t) \partial \zeta_1 \partial \zeta_2 \dots \partial \zeta_j \quad \text{Ec.(1)}$$

Donde $\bar{\Psi} \partial Z$ es el número de partículas por unidad de volumen en el reactor, con propiedades en los intervalos sin especificar. La acumulación de partículas con propiedades en estos intervalos, dentro del reactor de volumen V , es por definición, la relación en el tiempo del cambio del número de partículas:

$$\text{Acumulación} = \frac{\partial}{\partial t} (V \bar{\Psi}) \partial Z \quad \text{Ec.(2)}$$

La velocidad a la cual las partículas en los intervalos de propiedades específicas están entrando al reactor, es igual al número total de partículas por unidad de volumen en la corriente de entrada. n_{in} , veces la velocidad de flujo de volumen Q_{in} , veces la fracción de partículas en la entrada con propiedades en el intervalo especificado $f_{0in}(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j; t) \partial\zeta_1 \partial\zeta_2 \dots \partial\zeta_j$.

$$\text{Entrada} = n_{in} Q_{in} f_{0in}(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j; t) \partial\zeta_1 \partial\zeta_2 \dots \partial\zeta_j = Q_{in} \Psi_{in} \partial Z \quad \text{Ec. (3)}$$

Similarmente sucede para las salidas:

$$\text{Salida} = n_{out} Q_{out} f_{0out}(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j; t) \partial\zeta_1 \partial\zeta_2 \dots \partial\zeta_j = Q_{out} \Psi_{out} \partial Z \quad \text{Ec. (4)}$$

La generación neta de partículas en el intervalo de propiedades específicas dentro del reactor, consiste de dos partes:

- (1). Generación debido a cambios discretos en el cual una partícula entra o deja el sistema como resultado de un evento catastrófico (rompimiento o coalescencia de partículas).
- (2). Generación debido a cambios continuos en el cual una partícula entra o deja el sistema debido a un movimiento sistemático en las propiedades de las partículas (el movimiento o deriva de la composición de la partícula, puede ocurrir como resultado de una reacción de lixiviación).

La generación neta debido a cambios discretos, puede ser definida en términos de la velocidad promedio de nacimientos de partículas en el intervalo de interés, $V \bar{B} \partial Z$, menos la velocidad promedio de muertes de partículas en este intervalo $V \bar{D} \partial Z$, donde V es el volumen del recipiente, $\bar{B} \partial Z$ y $\bar{D} \partial Z$ son los promedios de nacimientos y muertes (número por unidad de tiempo por unidad de volumen del reactor) respectivamente.

La contribución debida a cambios continuos en las propiedades de las partículas, puede ser

representada en términos del número de flujo de cada propiedad $-\left(\frac{\partial}{\partial \zeta_j}\right) \left(\mathcal{G}_j \bar{\Psi}\right)$, $j = 1, 2, \dots, J$

donde \mathcal{G}_j es la relación del tiempo de cambio de la propiedad ζ_j para partículas en el

intervalo $\left(\vartheta_j = \frac{\partial \zeta_j}{\partial t} \right)$, lo cual corrientemente se llama velocidad de la propiedad j . Así,

la generación neta completa de partículas en el intervalo de propiedades especificado en el recipiente, viene dado por:

$$\text{Generación Neta} = V \left[\left(\bar{B} - \bar{D} \right) - \sum_{j=1}^j \frac{\partial}{\partial \zeta_j} \left(\vartheta_j \bar{\Psi} \right) \right] \partial Z \quad \text{Ec. (5)}$$

Sustituyendo las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) en la ecuación (0), el modelo de balance macroscópico general será:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(V \bar{\Psi} \right) = Q_{in} \Psi_{in} - Q_{out} \Psi_{out} + V \left[\left(\bar{B} - \bar{D} \right) - \sum_{j=1}^j \frac{\partial}{\partial \zeta_j} \left(\vartheta_j \bar{\Psi} \right) \right] \partial Z \quad \text{Ec. (6)}$$

Inicialmente, la ecuación (6) puede usarse para encontrar los cambios en la distribución de propiedades en partículas en un recipiente para cualquier sistema de procesamiento de partículas para el cual la cinética de partícula individual es conocida. Para aplicar esta ecuación, se debe proporcionar expresiones para \bar{D}, \bar{B} y $\frac{d\zeta_j}{dt}$, específicamente la relación entre $\bar{\Psi}$ y Ψ_{out} , y solucionar la ecuación diferencial resultante.

Una vez $\bar{\Psi}$ se ha obtenido de la ecuación (6), el número total de partículas por unidad de volumen del recipiente y la función de densidad de propiedades para el proceso de interés, se puede obtener mediante la integración de la ecuación (1) sobre todos los ζ 's.

Reconociendo que la integral de la función de densidad sobre todos los valores es uno,

$$\bar{n}(t) = \int_{\zeta_{jmin}}^{\zeta_{jmax}} \dots \int_{\zeta_{jmin}}^{\zeta_{jmax}} \bar{\Psi} dZ \quad \text{Ec. (7)}$$

Sustituyendo este resultado en la ecuación (1), obtenemos:

$$f_0(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j; t) = \bar{\Psi} / \int_{\zeta_{jmin}}^{\zeta_{jmax}} \dots \int_{\zeta_{jmin}}^{\zeta_{jmax}} \bar{\Psi} dZ \quad \text{Ec. (8)}$$

Si es necesario, la función de número de densidad, puede transformarse a la función de densidad de masa y las características seleccionadas de la distribución de propiedades tales como la media y la varianza.

Los términos de muerte y nacimiento \bar{D} y \bar{B} , así como la velocidad de propiedades \mathcal{G}_j , requieren solucionar la ecuación que se obtiene de hacer consideraciones fundamentales concernientes a la cinética de la partícula individual en el proceso de interés.

En algunos casos, muy particularmente, estos involucran reacciones heterogéneas, estos términos dependen directamente de la concentración de una o más especies consumibles en la fase continua. Así, en reacciones de lixiviación donde la relación al tiempo del cambio de composición de las partículas (velocidad de composición) depende de la concentración del lixivante en la fase fluido, uno debe saber como varía la composición de la fase fluido con la extensión de la reacción.

Esta información, puede obtenerse de un balance de masa de especies en la fase continua, usando la ecuación general de conservación:

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Generación}$$

Puede escribirse un balance macroscópico de masa para las especies i en la fase continua y resultar:

$$\frac{d(VCi)}{dt} = Q_{in} C_{iin} - Q_{out} C_{iOut} + r_i V \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde C_i , C_{iin} y C_{iOut} , son las concentraciones de masa de la especie i en la fase continua, en el recipiente, en la entrada y en la salida respectivamente. V es el volumen del recipiente y r_i es la velocidad de generación de la especie i en la fase continua por unidad de volumen del recipiente.

$$\text{Fase Continua (una sola fase)} \quad \text{Ec.(9)}$$

$$\text{Fase dispersa (solución + partículas)} \quad \text{Ec. (6)}$$

Para procesos Batch no hay flujo de material en entradas y salidas del recipiente de reacción $Q_{in} = Q_{out} = 0$, así el modelo general de balance macroscópico de población, se reduce a:

$$\frac{1}{V} \frac{\partial(V\bar{\Psi})}{dt} + \sum_{j=1}^J \frac{\partial}{\partial \zeta_j} (\mathcal{G}_j \bar{\Psi}) + \bar{D} - \bar{B} = 0 \quad \text{Ec.(10)}$$

La sustitución de las expresiones apropiadas para la cinética del cambio de propiedades \mathcal{G}_j y los términos de muerte y nacimiento \bar{D} y \bar{B} , en la ecuación (10), y solucionar esta ecuación diferencial parcial resultante, nos lleva a una expresión para la evolución de cualquier propiedad inicial $\bar{\Psi}_0$ con respecto al tiempo, esto en un proceso Batch.

En los casos donde las expresiones para \mathcal{G}_j , \bar{D} y \bar{B} , dependen solamente de la concentración de algún reactivo consumible en la fase fluido, un balance de masa para la especie consumible, se debe solucionar simultáneamente con el modelo de balance de población.

Para procesos Batch, como no hay flujos de entrada ni de salidas, el modelo de balance de masa se reduce a:

$$\frac{\partial}{\partial t}(VC_i) = Vr_i \quad \text{Ec. (11)}$$

2.5.3 Modelos cinéticos de disolución^[13]. Para la formulación de los modelos que a continuación se presentan, cabe aclarar que se ha utilizado para su formulación, experimentos de lixiviación con velocidades de agitación donde las partículas están siempre en suspensión, lo que excluye la transferencia de masa (difusión a través de la capa límite) de ser la etapa controlante. Estos modelos cinéticos de disolución de minerales se describen a continuación:

2.5.3.1 Modelo de núcleo sin reaccionar (que se contrae). Este es el modelo cinético más ampliamente esparcido en la descripción de la cinética de reacción entre salida y fluido de partículas densas (no porosas).

Una de las ecuaciones de este modelo, describe un “Control difusional a través de una capa de ceniza”, con partículas esféricas de tamaño constante. Este modelo está descrito por:

$$1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X) = \frac{t}{\tau} \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde X = Conversión de Au; τ = tiempo para reacción completa (min) y t = Tiempo (min). El modelo contempla entre sus características, que durante la lixiviación hay formación de una capa de “Cenizas” sobre la superficie de la partícula.

2.5.3.2 Modelo Homogéneo. De acuerdo a este modelo, la partícula sólida es un conjunto de pequeñas capas o terrones distribuidos en la fase sólida. El modelo asume dos frentes de reacción, uno controlado por la reacción química y otro por la difusión. Debido a que la reacción es más rápida cerca de la superficie que en el interior de la partícula, se supone que después de cierto tiempo, el sólido cerca de la superficie ya ha reaccionado completamente, formando una capa de producto inerte (cenizas). Conforme la reacción progresa, aparecen dos zonas: Una zona más externa, en la cual el sólido reactante ya está completamente gastado (zona de difusión) y una zona más interior donde la reacción aun tiene lugar (zona de reacción).

Bajo la asunción que la resistencia de la capa de fluido es despreciable, habrá dos casos posibles: La difusión de un reactante A en la fase fluido a través del sólido, o que la reacción química entre A y la fase sólida sea la etapa controlante.

En caso que la difusión de A sea la etapa más lenta, el modelo se regirá por la siguiente ecuación:

$$\frac{\theta_v}{\theta_v^*} = 1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X) \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde $\theta_v = K_v C_A t$ Ec. (14)

K_v ($L, mol^{-1} min^{-1}$) es la constante de velocidad de reacción basada en el volumen, θ_v^* es el tiempo adimensional para reacción completa (constante). En caso que θ_v^* sea proporcional a R_p^2 (radio de la partícula), la ecuación (13) se tornaría idéntica a la ecuación (12).

2.5.3.3 Modelo de poro uniforme. Este modelo asume que el sólido contiene poros cilíndricos completamente humedecidos, uniformes y abiertos (capilaridad). El cuerpo del sólido poroso reaccionara de una manera especialmente uniforme, su forma y tamaño físico no varía con el consumo de la fase sólida, ni tiende a un progresivo alargamiento de los poros hasta que la estructura interna colapsa.

Para poros regularmente espaciados y uniformes, sin limitaciones difusionales (control de reacción química), el modelo sigue la siguiente formula:

$$X = \frac{\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} \left[\left(1 + \frac{t}{\tau_c}\right)^2 \left(\frac{G - 1 - t / \tau_c}{G - 1}\right) - 1 \right] \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde ε_0 es la porosidad inicial de la partícula sólida y G , es un parámetro estructural (mayor que cero), el cual satisface la ecuación:

$$\frac{4}{27} \varepsilon_0 G^3 - G + 1 = 0 \quad \text{Ec. (16)}$$

La constante de tiempo τ_c , que es igual al tiempo para que el radio del poro llegue a ser dos veces el radio en $t = 0$, y es dado por la ecuación:

$$\tau_c = \frac{r_{p0} \rho_m}{r} \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde r_{p0} = Es el radio inicial del poro (cms), ρ_m es la densidad molar de la fase sólida (mol / cm^3) y r es la velocidad de reacción ($molcm^{-1}min^{-1}$).

2.5.3.4 Modelo de poro aleatorio. En este modelo, se asume que las partículas sólidas contienen elementos vacíos de geometría similar tales como capilares cilíndricos o espacios esféricos. En este caso, una expresión analítica para la conversión, en el caso de control por reacción química, es como sigue:

$$X = 1 - \exp\left[-K^* t - \psi \left(\frac{k^* t}{2}\right)^2\right] \quad \text{Ec. (18)}$$

Donde: $K^* = rS_0$ Ec. (19) $\psi = \frac{4\pi L_0(1 - \varepsilon_0)}{\int_0^2}$ Ec. (20)

Donde S_0 es el área superficial molar inicial (m^2/mol), L_0 es la longitud característica inicial de un poro por unidad de volumen (m/m^3) y \int_0^2 es el área superficial de reacción inicial por unidad de volumen (m^2/m^3). Los valores de K^* y ψ pueden obtenerse por regresión múltiple de $\ln(1-X)$ vs (t, t^2) de datos experimentales.

Para este modelo, no hay una ecuación establecida en el caso de control difusional intrapellet (dentro del poro), en caso que esto suceda, la solución deberá ser solamente presentada en formulas matemáticas complejas o simulaciones numéricas.

2.5.3.5 Modelo de grano. De acuerdo a este modelo^[14], las partículas sólidas se consideran pellets consistentes de granos individuales y compactados juntos. Cada grano reacciona individualmente de acuerdo al patrón del núcleo sin reaccionar que se contrae. El reactivo fluido difunde a través de los intersticios de los granos sólidos mientras tiene lugar la reacción.

Como resultado, el sólido reactante se agota progresivamente con un decremento gradual en la extensión de los granos sólidos a medida que avanza hacia el centro del pellet.

Cuando la difusión a través de los poros es el paso controlante, el modelo se ajusta a la siguiente ecuación, considerando partículas esféricas:

^[14] Szekely, J. Gas – solids reactions. Plenum press, 1979.

$$\frac{t^*}{\sigma^2} = 1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X) \quad \text{Ec. (21)}$$

Donde t^* y σ son dados por las siguientes ecuaciones:

$$t^* = \left(\frac{bKC_{A,g}}{\rho_m} \frac{A_g}{F_g V_g} \right) t \quad \text{Ec. (22)}$$

$$\sigma = \frac{R_p}{3} \left(\frac{3K(1 - \varepsilon)}{2D_e} \frac{A_g}{F_g V_g} \right) \quad \text{Ec. (23)}$$

Donde F_g es el factor de forma del grano, con valores de 1,2,3 para granos de forma plana, cilíndrica y esférica respectivamente. A_g y V_g son el área superficial externa (cm^2) y el volumen (cm^3) del grano; R_p es el radio del pellet (cm), ε es la porosidad del pellet (partícula) y K es la constante de velocidad de reacción ($mol/m^2.min$), $C_{A,g}$ es la concentración del fluido (mol/L), b es un factor estequiométrico de la ecuación general y ρ_m la densidad molar de las partículas sólidas (mol/Cm^3).

Según el análisis de la literatura, en reacciones de lixiviación, donde hay un reactivo líquido intentando solubilizar valores metálicos contenidos en partículas, el paso controlante es la difusión de este reactivo a través de los poros. Ajustando las ecuaciones (21) y (23) a la conversión (X) vs tiempo, se puede derivar la siguiente ecuación:

$$1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X) = \frac{6D_e}{R_p^2 \rho_m (1 - \varepsilon)} C_{A,promedio} t \quad \text{Ec. (24)}$$

Ecuación muy similar a la ecuación (12), pero en la cual se incluyen parámetros y factores de gran influencia en el proceso de lixiviación y que permiten un mayor ajuste de datos.

La concentración promedio del fluido [$C_{A, prom}$] es: $C_{A,prom} = \frac{\int_0^t C_A dt}{\tau}$ donde C_A es la concentración del reactivo en un tiempo t y τ es el tiempo que transcurre hasta que la extracción alcanza la meseta de estabilización, en un porcentaje de sólidos, temperatura y tiempo definido.

3. METODOLOGIA DE TRABAJO

En la realización de esta investigación, se propuso una metodología de trabajo con la cual se alcanzo el total de los objetivos planteados y la solución del problema descrito en la propuesta de investigación a que corresponde este trabajo. Para lograr cumplir estas metas, la metodología planteada fue la siguiente:

3.1 PLAN DE ACTIVIDADES

3.1.1 Etapa 1: Revisión y análisis bibliográfico de la literatura recopilada.

3.1.2 Etapa 2: Revisión y estudio de los resultados de los análisis y evaluaciones de caracterizaciones mineralógicas y físico químicas realizadas a las muestras y menas de interés.

Actividad 1: Revisión y estudio de los resultados de los siguientes análisis técnicos:

- Análisis mineralógico de muestras.
- Análisis de distribución granulométrica y por fracciones.
- Análisis químicos de muestras.

Actividad 2: Revisión y estudio de los resultados de clasificación y caracterización de menas:

- Clasificación de muestras en diferentes tipos de menas
- Mineralogía de cada tipo de mena
- Conformación, análisis químico y mineralógico de cada composito de menas.

3.1.3 Etapa 3: Aplicación de procedimientos de lixiviación diagnóstica y convencional (cianuración) a cada compuesto.

Actividad 1: Lixiviación convencional y diagnóstica de cada compuesto.

Actividad 2: Lixiviación convencional (cianuración) por fracciones.

3.1.4 Etapa 4: Análisis de resultados obtenidos.

Actividad 1: Análisis de los datos obtenidos en los diferentes ensayos realizados, análisis de gráficos y curvas de comportamiento de datos.

3.1.5 Etapa 5: Desarrollo de correlaciones y modelamiento.

Actividad 1: Correlaciones entre los datos obtenidos en lixiviación diagnóstica, los análisis mineralógicos y el grado de extracción de oro en los ensayos de cianuración.

Actividad 2: Comprobación de algunos modelos cinéticos preexistentes sobre procesos de disolución de minerales.

3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El desarrollo del trabajo de investigación se realizó en cinco etapas, cada una de estas etapas contempla la realización de diversas actividades según se describe a continuación:

Etapa 1. Revisión y análisis bibliográfico de la literatura recopilada. En esta etapa, se revisó el material bibliográfico disponible, con el fin de capacitarse más profundamente sobre los aspectos referentes a la metalurgia extractiva del oro, también se revisaron documentos sobre la minería del oro en las zonas mineras de interés y se tuvo entrenamiento en el manejo de equipos de laboratorios para análisis relacionados con la metalurgia del oro.

Se incluye en esta etapa, la recopilación y lectura de artículos internacionales sobre lixiviación diagnóstico, diversas tesis de grado de Maestría e Ingeniería Metalúrgica, trabajos de Grupos de Investigaciones relacionados con el tema de los minerales auríferos, material bibliográfico relacionado con la lixiviación diagnóstico, la mineralogía de procesos y análisis y estudio de minerales auríferos.

Etapa 2. Revisión y estudio de los resultados de los análisis y evaluaciones de caracterizaciones mineralógicas y físico químicas realizadas a las menas de interés.

En esta etapa se analizaron los resultados de los diferentes estudios y análisis de caracterización mineralógica y físico- química realizados a las menas de interés por el personal del Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente.

Las menas de interés corresponden a muestras de las regiones de Santa Rosa del Sur (Bolívar), Vetas y California (Santander); las muestras y minas que conforman las menas de interés se especifican mas adelante en el capítulo 4, correspondiente a la revisión y estudio de los resultados de caracterización mineralógica.

Actividad 1: Revisión y estudio de los resultados de los siguientes análisis técnicos:

- Análisis mineralógico de muestras.
- Análisis de distribución granulométrica y por fracciones.
- Análisis químicos de muestras..

Una vez que se obtuvieron las muestras de diferentes minas de las zonas de Santa Rosa del Sur (Bolívar), Vetas y California (Santander), fueron sometidas a una caracterización mineralógica consistente en dos etapas, una macroscópica y una microscópica. La caracterización macroscópica, se realizó mediante inspección visual con lupa con el fin de determinar la estructura y textura de cada tipo de mena. La caracterización microscópica fue realizada mediante análisis petrográficos de secciones pulidas y delgadas en los laboratorios y por parte del personal de INGEOMINAS - Cali.

Los análisis de distribución granulométrica y por fracciones de las muestras, fueron realizadas en el Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente de la Universidad Industrial de Santander, mediante tamizado de muestras de 200 gramos a -200 mallas Tyler. Preparando las muestras para caracterización por análisis químico.

Luego de la caracterización mineralógica y clasificación granulométrica, las muestras fueron sometidas a ensayo al fuego para determinación de oro y plata. Algunas muestras fueron enviadas a los laboratorios de ACTLABS – Canadá para su análisis químico de oro, plata y otros elementos.

Las técnicas utilizadas por los laboratorios ACTLABS sobre las muestras enviadas fueron: Espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivo (ICPOES), espectrometría de masa de plasma acoplado inductivo (ICPMS) y análisis instrumental por activación de neutrones (INAA). Mediante estas técnicas, se analizaron elementos tales como: Oro, plata, hierro, arsénico, aluminio, azufre, bario, bromo, calcio, cobre, plomo, potasio, magnesio, cobalto, cromo, zinc, mercurio, uranio, etc.

Actividad 2: Revisión y estudio de los resultados de clasificación y caracterización de menas. Conforme a los diferentes resultados provenientes de los estudios de caracterización mineralógica, química y granulométrica, se analizaron estos datos para tratar de agrupar las muestras en tipos de menas según las características comunes a cada una de ellas. Las siguientes son las actividades realizadas para obtener esta clasificación en tipos de menas:

- Clasificación de muestras en diferentes tipos de menas
- Mineralogía de cada tipo de menas
- Conformación, análisis químico y ensayo al fuego de composites

En la conformación de los tipos tecnológicos de menas, se utilizaron como criterios principales la composición mineralógica, ya que se observó que las muestras podían dividirse en diferentes grupos (muestras principalmente piriticas, muestras polisulfuradas,

muestras altas en óxidos, y muestras altas en sulfuros); el segundo criterio de clasificación fue la composición química, donde se encontró que existía una relación entre el tenor de la muestra y la mineralogía de esta, aquellas muestras con altos contenidos de óxidos presentan bajos contenidos de oro y las que tienen altos contenidos de sulfuros, presentan altos contenidos de oro, este es el caso de las muestras de Santa Rosa del Sur.

Los estudios de caracterización mineralógica de las menas ya clasificadas, en su mayoría fueron realizados mediante análisis microscópico de una serie de concentrados gravimétricos y magnéticos y los compuestos y asociaciones presentes, confirmadas mediante difracción de rayos X. Los resultados de la caracterización mineralógica de cada tipo de mena, se detalla en el capítulo 4 de este trabajo, correspondiente a la revisión y estudio de los resultados de caracterización mineralógica..

El paso siguiente fue la conformación de los compositos correspondientes a cada tipo de menas, para esto se tomó una cantidad de mineral de cada una de las muestras que pertenecían al tipo de mena y se mezclaron hasta obtener un mineral homogéneo. Para determinar la cantidad de mineral que debía ser tomada de cada muestra, se utilizó como patrón la mitad del peso de la muestra de menor tamaño (peso) para de esta manera conservar un testigo de cada muestra.

El análisis químico de los compositos que conforman o representan los tipos de menas, al igual que las muestras individuales, se analizaron con la colaboración de los laboratorios ACTLABS – Canadá, como se mencionó anteriormente.

Sobre cada composito de los diferentes tipos de menas, se realizó ensayo al fuego, para determinar los tenores de oro y plata presentes en estos. Estos ensayos fueron seguidos en los laboratorios del Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente y son reportados en la parte de la revisión y estudio de los resultados de caracterización mineralógica (capítulo 4).

Etapa 3. Aplicación de los procedimientos de lixiviación diagnóstica y convencional (cianuración). En esta etapa, los compositos de cada tipo de mena, se sometieron a la técnica de lixiviación diagnóstica y a los ensayos de lixiviación convencional (Cianuración). Estos procedimientos fueron aplicados a cada composito en general (lixiviación diagnóstica) y a las fracciones de cada composito (fracciones de diferente tamaño granulométrico) de cada tipo de mena.

Las pruebas de lixiviación diagnóstica y cianuración por tamaños de cada tipo de mena se realizaron por parte del autor en los laboratorios del Grupo de Investigación en Minerales Biohidrometalurgia y Ambiente de la UIS. Las actividades que resumen esta etapa son las siguientes:

Actividad 1: Lixiviación diagnóstica de cada tipo de mena. De acuerdo a los resultados de la caracterización mineralógica de cada tipo de mena, se procedió a diseñar las marchas de lixiviación diagnóstica que debían ser aplicadas a estos compositos tomando como base la información bibliográfica suministrada en las figuras 12 a 22 (Pruebas de lixiviación diagnóstica).

De las muestras de laboratorio de los compositos representativos de cada tipo de mena, se tomaron medidas de 1 kilogramo y se redujeron en procesos de molienda a tamaños 70 % - 75 micrones (200 Ty), estas muestras se sometieron inicialmente a pruebas de cianuración por 24 horas y luego a ataques con ácido clorhídrico (HCl), cianuración intermedia, ataque con ácido sulfúrico (H₂SO₄), cianuración intermedia, ataque con ácido nítrico (HNO₃), seguido de cianuración y luego ensayo al fuego de las colas, acorde al procedimiento descrito en la figura 22.

La aplicación de esta técnica, se realiza con el fin de conocer a que tipo de minerales está directamente asociado el oro en estas menas y cual es la ocurrencia de las partículas de oro en estos minerales.

Actividad 2: Lixiviación convencional diagnóstica por tamaños. En esta actividad, las muestras de cada composito se redujeron a diferentes tamaños de partícula. Según la bibliografía consultada^[15], los tamaños de reducción seleccionados serán los siguientes: - 150 + 106 μm (-100 +150 Ty), -106 + 75 μm (-150 +200 Ty), -75 μm + 53 μm (-200 Ty).

De las muestras de cada composito, se tomaron muestras de 1 kilogramo y se redujeron a los tamaños indicados anteriormente, de estas muestras se separaron pesos de 200 gramos para usarlos en las pruebas de lixiviación convencional por cianuración, en periodos de 24 y 48 horas, tomándose alicuotas cada cierto tiempo para analizarlas respecto a su contenido de oro y consumo de cianuro y de esta forma poder realizar seguimiento de la marcha del proceso y evaluar el comportamiento de cada tipo de mena frente a la cianuración.

Condiciones de Cianuración:

- Peso de mineral: 200 gramos.
- Porcentaje de sólidos: 33 %
- Velocidad de agitación: 700 – 1000 r.p.m.
- Concentración de cianuro: 2 – 5 Kg/ton mineral
- pH: Mayor de 10 mediante adición de cal.
- Inyección de aire mediante burbujeo.

La concentración de cianuro varía entre 2 - 5 Kg/ton. mineral, dependiendo de la presencia de sulfuros en la mena a cianurar.

Por medio de la cianuración por fracciones de cada tipo de mena, se determinaron los diferentes porcentajes de extracción de oro obtenidos a diferentes tiempos y para diferentes tamaños, de tal forma que se pudo evaluar cuáles son las fracciones granulométricas, en las cuales los porcentajes de extracción de oro son mayores.

^[15] Lorenzen, L y Annandale, G. Interrelationship between mineral liberation and leaching behaviour of refractory ores. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Stellenbosch, Sudáfrica. ICAM 1996.

Con estos datos, se pudo deducir el tamaño de partícula más conveniente al cual cada tipo de mena con una mineralogía determinada debía ser reducido para obtener máximo porcentaje de extracción o aprovechamiento de su contenido en metales preciosos.

Debido a que se comete cierto tipo de error en los cálculos de porcentajes de extracción del metal de interés (oro) cada vez que se retiran alícuotas de la solución en los diferentes ensayos, se ha considerado utilizar la siguiente fórmula de corrección de volumen en el cálculo de extracción de metales:

$$X_{m,i} = \frac{(V - \sum_{i=1}^{i-1} V_i)C_{M,i} + \sum_{i=1}^{i-1} V_i C_{M,i}}{m(C_M / 100)}$$

Donde V es el volumen inicial (ml) de la solución, V_i es el volumen de la muestra o alícuota retirada en cada tiempo, $C_{M,i}$ es la concentración del metal M en la muestra i (mg/L), m es la masa inicial de mineral en gramos (base seca) añadido al reactor y C_M es la concentración del metal M en el mineral (porcentaje de peso de base seca o sólidos secos).

Etapas 4: Análisis de resultados obtenidos. En esta etapa, se realiza el análisis e interpretación de los diferentes resultados obtenidos en las pruebas y ensayos.

Actividad 1: Representación gráfica de los datos obtenidos en ensayos y pruebas (tablas, gráficos y curvas de comportamiento de datos). Los resultados provenientes de los diferentes ensayos, pruebas y análisis realizados en las etapas anteriores, se presentan en formas de gráficas, tablas y curvas, que permiten una mejor interpretación de los datos obtenidos mediante el uso de métodos matemáticos, herramientas computacionales y software especializado (Software MATLAB). Estos datos en su mayoría hacen referencias al manejo de las principales variables de proceso tales como: Mineralogía de las menas, Tiempo, concentración de oro, concentración de reactivos, tamaño de partícula (granulometría), etc.

Etapa 5: Desarrollo de correlaciones. Esta etapa corresponde al desarrollo de las diferentes correlaciones matemáticas derivadas del ajuste de los datos obtenidos experimentalmente con una ecuación.

Actividad 1: Correlaciones entre los datos obtenidos en la lixiviación diagnóstica, los análisis mineralógicos y el grado de extracción de oro en los diferentes ensayos. Con el objetivo de desarrollar las correlaciones matemáticas que mejor describan el comportamiento de las menas auríferas en los procesos de lixiviación a que han sido sometidas y predecir los valores de extracción de oro de estos minerales, en función del tiempo, su tamaño de partícula y su mineralogía, los datos presentados en tablas y gráficos, se han analizado mediante métodos matemáticos, estadísticos, correlaciones teóricas y computacionales específicos tales como: Balance de población aplicado a lixiviación de minerales, Análisis de tendencias, regresiones lineales (mínimos cuadrados) y regresiones polinómicas, a través del software MATLAB.

El fin perseguido a través de estos métodos, fue lograr ajustar las curvas y datos obtenidos experimentalmente, a la función o correlación teórica o empírica que mejor describía su comportamiento metalúrgico y permitía conjugar los estudios de caracterización mineralógica de cada tipo de mena, los resultados de la lixiviación diagnóstica, la cianuración y los porcentajes de extracción de oro de las menas auríferas.

Actividad 2: Comprobación de modelos cinéticos preexistentes sobre este tipo de procesos. Como parte adicional y complementaria al desarrollo de las correlaciones o formulaciones matemáticas entre mineralogía y extracción de oro, en esta actividad se pretendió comparar los resultados que preveían los diferentes modelos existentes sobre disolución de minerales, con los resultados experimentales de los diferentes ensayos y pruebas aplicadas a cada tipo de mena.

Mediante esta comparación, se podría comprobar, si el comportamiento metalúrgico de las menas estudiadas en los procesos de cianuración para extracción de oro, obedecía algún

patrón cinético preestablecido por la teoría, de tal forma que este modelo cinético establecido teóricamente, ya hubiese sido formulado.

Los principales modelos de disolución de minerales existentes y que acorde a los datos existentes y las posibilidades se consideraron fueron los siguientes: Modelo de núcleo sin reaccionar, modelo de granos, modelo de poros uniformes, modelo de poros aleatorios y modelo homogéneo; donde la mayor aceptación en cuanto a comportamiento, se ha logrado mediante la utilización de los modelos de núcleo sin reaccionar y particularmente, el modelo de grano.

4. REVISION Y ESTUDIO DE LOS RESULTADOS DE CARACTERIZACION MINERALOGICA DE CADA TIPO DE MENA(COMPOSITO) DE INTERES.

En este capítulo, se procede a la revisión y estudio de los resultados de los diferentes estudios y análisis de caracterización mineralógica y físico- química realizados a las menas de interés por el personal del Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente.

Las menas de interés corresponden a muestras de las regiones de Santa Rosa del Sur (Bolívar), Vetas y California (Santander); las muestras y minas que conforman las menas de interés se especifican mas adelante.

Una vez que se obtuvieron las muestras de diferentes minas de las zonas de Santa Rosa del Sur (Bolívar), Vetas y California (Santander), estas fueron sometidas a una caracterización mineralógica consistente en dos etapas, una macroscópica y una microscópica. La caracterización macroscópica, se realizó mediante inspección visual con lupa con el fin de determinar la composición mineralógica, estructura y textura de cada tipo de mena. La caracterización microscópica fue realizada mediante análisis petrográficos de secciones pulidas y delgadas en los laboratorios y por parte del personal de INGEOMINAS - Cali.

Los análisis de distribución granulométrica y por fracciones de las muestras, fueron realizadas en el Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente de la Universidad Industrial de Santander, mediante tamizado de muestras de 200 gramos a -200 mallas Tyler. Preparando las muestras para caracterización por análisis químico.

Luego de la caracterización mineralógica y clasificación granulométrica, las muestras fueron sometidas a ensayo al fuego para determinación de oro y plata. Algunas muestras fueron enviadas a los laboratorios de ACTLABS – Canadá para su análisis químico de oro, plata y otros elementos.

Las técnicas utilizadas por los laboratorios ACTLABS sobre las muestras enviadas fueron: Espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivo (ICPOES), espectrometría de masa de plasma acoplado inductivo (ICPMS) y análisis instrumental por activación de neutrones (INAA). Mediante estas técnicas, se analizaron elementos tales como: Oro, plata, hierro, arsénico, aluminio, azufre, bario, bromo, calcio, cobre, plomo, potasio, magnesio, cobalto, cromo, zinc, mercurio, uranio, etc.

Conforme a los diferentes resultados provenientes de los estudios de caracterización mineralógica, química y granulométrica, se analizaron estos datos para tratar de agrupar las muestras en tipos de menas según las características comunes a cada una de ellas. Las siguientes son las actividades realizadas para obtener esta clasificación en tipos de menas:

- Clasificación de muestras en diferentes tipos de menas
- Mineralogía de cada tipo de menas
- Conformación, análisis químico y ensayo al fuego de composites

En la conformación de los tipos geológicos de menas, se utilizaron como criterios principales la composición mineralógica, ya que se observó que las muestras podían dividirse en diferentes grupos (muestras principalmente piriticas, muestras polisulfuradas, muestras altas en óxidos, y muestras altas en sulfuros); el segundo criterio de clasificación fue la composición química, donde se encontró que existía una relación entre el tenor de la muestra y la mineralogía de esta, aquellas muestras con altos contenidos de óxidos presentan bajos contenidos de oro y las que tienen altos contenidos de sulfuros, presentan altos contenidos de oro, este es el caso de las muestras de Santa Rosa del Sur.

Los estudios de caracterización mineralógica de las menas ya clasificadas, en su mayoría fueron realizados mediante análisis microscópico de una serie de concentrados gravimétricos y magnéticos, de esta forma se determinaron los compuestos y asociaciones presentes. Estas muestras fueron posteriormente sometidas a análisis de difracción de rayos X. Los resultados de la caracterización mineralógica de cada tipo de mena, se detallan posteriormente en este capítulo.

El paso siguiente fue la conformación de los compositos correspondientes a cada tipo de menas, para esto se tomó una cantidad de mineral de cada una de las muestras que pertenecían al tipo de mena y se mezclaron hasta obtener un mineral homogéneo. Para determinar la cantidad de mineral que debía ser tomada de cada muestra, se utilizó como patrón la mitad del peso de la muestra de menor tamaño (peso) para de esta manera conservar un testigo de cada muestra.

El análisis químico de los compositos que conforman o representan los tipos de menas, al igual que las muestras individuales, se analizaron con la colaboración de los laboratorios ACTLABS – Canadá, como se mencionó anteriormente.

Sobre cada composito de los diferentes tipos de menas, se realizó ensayo al fuego, para determinar los tenores de oro y plata presentes en estos. Estos ensayos fueron seguidos en los laboratorios del Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente.

4.1 MINERALOGÍA DE LAS MUESTRAS QUE CONFORMAN LOS DIFERENTES TIPOS DE MENAS (COMPOSITOS)

Para la conformación del composito correspondiente a cada tipo de mena, se seleccionaron diferentes muestras de minas de cada región en estudio, estas muestras fueron caracterizadas mineralógicamente y acorde a sus características se procedió a conformar los compositos de cada región (tipos de menas).

4.1.1 Conformación del composito de Vetas. En la conformación del composito de Vetas, se escogieron tres diferentes minas de la región (Mina La Elsy, mina Trompeteros y mina Providencia), cada una aportando al composito de Vetas con un cierto número de muestras. Las minas y muestras que conforman el composito se enuncian a continuación:

- Mina La Elsy: E-2 E-3 E-5 E-6 E-8 E-10

- Mina Trompeteros: TA-5 TR-7 TZ-6 TAR-8 TC-12
TC-13 TR-14 TR-15 TC-16

- Mina Providencia: P-5 P-9 L-1 L-2

4.1.1.1 Caracterización mineralógica de las muestras del composito de Vetas

Tabla 7. Descripción de la textura y de la estructura de las muestras del municipio de Vetas

No.	MUESTRA	Color	Estructura	Observaciones
Mina Trompeteros				
1	TA-5	Gris blancuzco	Maciza- taxítica	Cuarzo lechoso afectado por venas de sulfuros y cuarzo Gris
2	TR-7	Amarillo grisáceo	Maciza-granítica	Recubierta por pátinas de color pardo oscuro a claro
3	TZ-6	Gris amarillenta	Maciza-taxítica	Roca granítica y mineralizada.
4	TAR-8	Gris blancuzco	Maciza-taxítica-granítica	Recubrimientos de caolín y limonita.
5	TC-12	Amarillo grisáceo	Maciza-taxítica	Alto contenido de feldspatos tipo plagioclasa.
6	TC-13	Gris blancuzco amarillento	Maciza-masiva	Recubierta por pátinas de limonita
7	TR-14	Gris oscuro	Maciza- taxítica	Plagioclasa alterada a sericita, alta mineralización..
8	TR-15	Pardo oscuro	Maciza taxítica	Recubrimiento de limonita. Alteración hidrotermal
9	TC-16	Gris claro	Maciza-taxítica	Tonalidades verdes claras
Mina La Elsy				
10	E-2	Pardo grisáceo	Masiva-taxítica	Pátinas de limonita.
11	E-3	Gris amarillenta	Maciza-masiva	Recubierta por caolnita, sericita y limonita. Roca filoniana.
12	E-5	Gris amarillenta	Maciza-masiva	Alto contenido de cuarzo gris. Recubierto de limonita
13	E-6	Gris amarillenta	Maciza-taxítica	Alto contenido de sílice, cuarzo gris y lechoso.
14	E-8	Gris amarillento	Maciza-taxítica	Recubierta por caolinita y limonita. Evidencia de aguja Mineralizada.
15	E-10	Gris amarillento	Maciza-taxítica-granítica.	Dos fragmentos: de roca respaldo y cuarzo lechoso.
Mina Providencia				
16	L-1	Gris blancuzco	Maciza-taxítica-granítica	Alto contenido de feldspatos. Epidota? (no confirmada)
17	L-2	Blanco grisáceo	Maciza-taxítica	Patinas de color pardo claro amarillento.
18	P-5	Blanco grisáceo	Maciza-masiva-granítica	Roca recubierta por caolinita, aguja mineralizada, roca Respaldo
19	P-9	Gris amarillento	Maciza-taxítica	Aguja mineralizada y roca respaldo. Poros resultado de Alteración.

Tabla 8. Composición mineralógica macroscópica y tenores de oro y de plata de las muestras de las minas del municipio de Vetas

No.	MUESTRAS	Tenores (g/T)		Minerales primarios								Minerales secundarios				
		Au	Ag	Cuarzo	Feldespatos		Minerales metálicos				Oxidos			Arcillas		
					Plagioclasa	Ortoclasa	Pirita	Blenda	Galena	Calcopirita	Otros	Limonita	Hematita	Goetita	Caolinita	Sericita
Mina Trompeteros																
1	TA-5	4.27	17.48	+	+		+				+			+		
2	TR-7	5.74	30.25	+	+	+	+		+		+			+	+	
3	TZ-6	0.15	1.85	+	+	+	+		+		+			+	+	
4	TAR-8	1.77	13.47	+	+	+	+	+	?		+			+	+	
5	TC-12	1.8	19.19	+	+		+				+				+	
6	TC-13	1.85	54.39	+	+	+	+				+			+	+	
7	TR-14	1.63	8.11	+	+		++				+			?	+	
8	TR-15	2.24	128.22	+	?	?					+	?				
9	TC-16	5.77	11.16	+	+		+			+	+			+	+	
Mina La Elsy																
10	E-2	3.42	49.33	+	+++	+	+				+			+		
11	E-3	20.63	255.87	+	+		+	+			+			+	+	
12	E-5	5.44	45.81	++++	?	?				+	+			+		
13	E-6	1.56	13.19	+	+	+	+	?			+	?		+	+	
14	E-8	13.6	31.02	+	+	+	+			+	+			+	+	
15	E-10	7.8	58.95	+	+	+	+				+					
Mina Providencia																
16	L-1	10.6	14.64	+	+	+	+		?		Cu?	+		+	+	
17	L-2	17.99	55.93	+	+		+				+			?	?	
18	P-5	43.13	225.12	+	+		+				+			+		
19	P-9	11.32	589.68	+	+	+	+				?					

4.1.2 Conformación del composito de California. En la conformación del composito de California, se escogieron cuatro diferentes minas de la región (Mina La Machuca, mina Tiguarí, mina Sinúes – Tesoro de Morgan y mina San Celestino), cada una aportando al composito de California con un cierto número de muestras.

- Mina La Machuca: MA-1 MA-2 M-4 M-6 M-8 M-15 M-20 L-4 L-9
L-11 L-20 L-21 P-11 P-11A P-12 P-12A P-15 FL-1 FL-2
- Mina Tiguarí: R-2 R-3 R-5

- Mina Sinúes – Tesoro de Morgan: SN-1 SN-2 SN-3 SN-5 SN-6 SN-7
SN-10 SN-11 SN-12 SN-15 SN-20 SN-21 TM-1

- Mina San Celestino: SC-15 SC-16 CH-1 CH-2 CH-3 CH-4 CH-5 AT-1 AT-2

4.1.2.1 Caracterización mineralógica de las muestras del composito de California

Tabla 9. Descripción de la textura y de la estructura de las muestras del municipio de California.

No.	MUESTRA	Color	Estructura	Observaciones
Mina La Machuca				
1.	MA1	Pardo rojizo y grisáceo	Maciza, taxítica	Algunos fragmentos de composición granítica maciza, pátinas de óxidos de hierro
2.	MA2	Gris amarillenta	Taxítica-masiva	Pátinas de óxidos de hierro, fracturas rellenas de óxidos (limonitas)
3.	M4	Gris rojizo	Taxítica-granítica	Venillas de cuarzo gris oxidadas y alteradas, alteración hidrotermal, pátinas de óxidos de hierro.
4.	M6	Gris amarillento	Taxítica-masiva	Pátinas de óxidos de hierro. Roca filoniana
5.	M8	Gris amarillento	Maciza-taxítica	Recubierta por limonita. Alteración de sulfuros en pátinas de color pardo claro.
6.	M15	Gris blancuzco	Maciza-taxítica	Alto contenido de feldespatos alterados. Pátinas de color verde claro (malaquita?)
7.	M20	Rosado blancuzco	Maciza, taxítica	Pátinas de color pardo oscuro a ocre. La alteración hidrotermal produjo la oxidación de los sulfuros.
8.	L4	Amarillenta grisácea	Masiva-taxítica	Roca filoniana. Recubrimiento de óxidos de hierro.
9.	L9	Blanco grisáceo		Alteración de sulfuros. Pátinas de limonita.
10.	L11	Gris blancuzco	Masiva-taxítica	Fracturada con alto contenido de feldespato. Sulfuros diseminados.
11.	L15	Gris oscuro	Taxítica-masiva	Fanerítica, pátinas o recubrimientos producto de los feldespatos alterados; presencia de sulfuros. Alteración a sericita-limonita.
12.	L20	Gris oscuro	Masiva-maciza	Pátinas de hierro. Fragmentos con alto contenido de sulfuros de hierro.
13.	L21	Blanco grisáceo	Maciza-taxítica	Producto de alteración de minerales primarios.
14.	P11	Blanco grisáceo	Masiva-taxítica	Pátinas de color pardo oscuro. Fragmentos angulosos de feldespatos.
15.	P11A	Gris blancuzco	Masiva-maciza	Pátinas de óxidos de hierro color rojo pardo. Hábito botroidal. Tonalidades verdosas.
16.	P12	Gris claro	Masiva-taxítica	Venillas de sulfuros. Afectado por acción hidrotermal.

No.	MUESTRA	Color	Estructura	Observaciones
17.	P12A	Gris claro	Maciza-taxítica	Recubrimiento de pátinas de color pardo claro amarillento (limonita).
18.	P15	Gris claro-gris oscuro	Maciza-taxítica	Holocristalina. Roca respaldo.
19.	FL1	Blanco grisáceo	Maciza-taxítica	Pátinas de color pardo oscuro. Fragmentos angulosos de feldspatos. Afectada por procesos hidrotermales. Silicificación. Venillas de pirita de 0,5cm.
20.	FL2	Pardo oscuro	Porosa-maciza	Predomina pirita. Afectada por procesos hidrotermales.
Mina Tiguarí				
21.	R2	Pardo oscuro rojizo	Maciza	Silicificación. Algunos Fragmentos totalmente oxidados. Roca mineralizada de filón aurífero (respaldo y aguja)
22.	R3	Pardo rojizo	Taxítica-porosa.	Porosa. Afectada por procesos hidrotermales. Roca oxidada.
23.	R5	Pardo rojizo	Maciza-porosa	Oxidación. Fragmentos graníticos.
Minas Sinúes – Tesoro de Morgan				
24.	SN1	Ocre rojizo	Maciza.-masiva	Avanzado estado de oxidación.
25.	SN2	Pardo naranja	Taxítica-porosa.	Afectada por procesos hidrotermales. Aspecto brechoso. Porfirítica.
26.	SN3	Pardo oscuro	Maciza-taxítica	Pátinas de color ocre-rojizo.
27.	SN5	Pardo grisáceo	Maciza-taxítica	Afectado por procesos hidrotermales. Oxidación alta. Roca porfirítica. Pátinas de óxidos de Fe.
28.	SN6	Gris parduzco	Maciza-taxítica	Algunos fragmentos porosos. Alteración hidrotermal. Roca porfirítica.
29.	SN7	Blanco grisáceo	Maciza-taxítica	Pátinas de color ocre-rojizo. Aspecto brechoso.
30.	SN10	Pardo oscuro	Maciza	Avanzado estado de oxidación.
31.	SN11	Gris amarillento	Maciza-taxítica	Porfirítica. Afectada por procesos hidrotermales. Roca muy fracturada.
32.	SN12	Pardo claro	Maciza	Avanzado estado de oxidación. Silicificación.
33.	SN15	Pardo oscuro	Maciza-taxítica	Pátinas de color ocre rojizo.
34.	SN20	Pardo claro y oscuro	Porosa	Afectada por procesos hidrotermales.
35.	SN21	Rojo parduzco	Porosa-taxítica	Afectada por procesos hidrotermales.
36.	TM1	Gris amarillento	Taxítica-porosa.	Afectada por procesos hidrotermales. Pátinas de óxidos de hierro. Roca granítica.
Mina San Celestino				
37.	SC15	Blanco rosado	Granítica masiva, masiva.	Pátinas de color pardo oscuro a ocre.
38.	SC16	Rosado grisáceo	Maciza-taxítica	Holocristalina y porfirítica.
39.	CH1	Gris claro	Masiva-maciza	Pátinas de óxidos de hierro.
40.	CH2	Gris amarillento	Maciza-taxítica	Holocristalina. Pátinas de color pardo.
41.	CH3	Gris claro	Maciza	Pátinas de óxidos de hierro
42.	CH4	Gris amarillento	Masiva	Porfirítica.
43.	CH5	Gris parduzco	Masiva-taxítica	Porfirítica. Pátinas de óxidos.
44.	AT1	Gris claro a oscuro	Masiva-taxítica	Sulfuros de espesor de 0,5-1cm. Pátinas de color verdoso.
45.	AT2	Gris claro	Masiva	Porfirítica.

Tabla 10. Composición mineralógica macroscópica y tenores de oro y de plata de las muestras de las minas del municipio de California.

No.	MUESTRA	Tenor (g/T)		Minerales primarios								Minerales secundarios				
		Au	Ag	Cuarzo	Feldespatos		Minerales metálicos					Óxidos			Arcillas	
					Plagioclasa	Ortoclasa	Pirita	Blenda	Galena	Calcopirita	Otros	Limonita	Hematita	Goethita	Caolinita	Sericita
Mina la Machuca																
1	MA1	3.43	26.06	+	+		+		+						+	
2	MA2	2.83	33.16	+			+					?	?			?
3	M4	6.38	27.11	+	+							?	+	+	+	+
4	M6	3.07	28.68	+												
5	M8	2.19	18.80	+	+		+		+			+	+			+
6	M15	2.88	32.61	++++	+		+		+			+	+	+	+++	
7	M20	2.21	80.27	+	+							?	?	?	?	+
8	L4	1.23	36.02	+	?	?	+					?	+	?	?	+
9	L9	5.96	43.11	+	+		+		?			+	+			+
10	L11	1.11	1.29	+	+		+		?			+				+
11	L15	32.13	115.12	+	+	+	+	?	?			+	?			?
12	L20	135.75	310.1	+			+	+				+	+			
13	L21	26.51	82.94	++	+		+	?	+			+				+
14	P11	1.37	23.63	+	+		+		?			?	?			+
15	P11A	5.15	25.84	+++	+		+		+			+	+	+	+	+
16	P12	11.37	102.02	+	?	?	+		+			+			+	
17	P12A	51.25	327.64	+			+		+						+	
18	P15	32.39	2898.4	+	+		+		+		Co	+	+	+		+
19	FL1	0.66	11.08	+			+		+			+	+	+		
20	FL2	3.07	43.67	+	+		+++					+	+	+		+
Mina Tiguari																
21	R2	13.95	69.03	+			+					+	+	+	?	?
22	R3	14.52	63.96	+								+	+	+	?	?
23	R5	5.06	41.44	+	+							+	+		+	
Minas Sinúes – Tesoro de Morgan																
24	SN1	12.89	85.11	+			+					+	+	+	?	?
25	SN2	4.57	52.84	+	+		+	+			Co	+	+	+		?
26	SN3	6.77	19.23	+	++		+				?	+	+	+		+

No.	MUESTRA	Tenor (g/T)		Minerales primarios								Minerales secundarios				
		Au	Ag	Cuarzo	Feldespatos		Minerales metálicos					Óxidos			Arcillas	
					Plagioclasa	Ortoclasa	Pirita	Blenda	Galena	Calcopirita	Otros	Limonita	Hematita	Goethita	Caolinita	Sericita
27	SN5	1.84	7.40	+	+		+					+	+	+		+
28	SN6	5.05	34.20	+	?	?	+					+	+	+		+
29	SN7	4.14	14.85	+	+		+	+				+	+	+		
30	SN10	3.96	33.04	+			+					+	+	+		
31	SN11	2.97	13.77	+	+		+					+	+	+		+
32	SN12	1.99	15.00	++++								+	+	+		
33	SN15	4.73	50.26	+	++		+				?	+	+	+		
34	SN20	8.5	43.24	+								+	+	+		
35	SN21	6.72	37.51	++++								+	+	+		
36	TM1	7.73	21.52	++++	+							+	+	+		+
Mina san Celestino																
37	SC15	0.05	10.72	+	+	+						+	+	+		+
38	SC16	2.07	57.66	+	+		+				Co	+	+	+	+	+
39	CH1	9.20	1099.1	+	+		+				Co	+	+			
40	CH2	11.15	72.35	++++	+		+	+	+	+		+	+	+		+
41	CH3	13.55	122.69	+	?		+					+	+			?
42	CH4	16.27	808.64	+	+		+		+		Co	+	+			+
43	CH5	20.09	162.89	+	+		+					+	+			+
44	AT1	38.89	1376.0	+	+		+	+	+		Co	+				
45	AT2	10.99	42.50	+	+		+					+				

(+) Presente (++) Apreciable pero menos del 50% (+++) Cantidad destacable
(++++) Más del 50% (?) Posible

Fuente: Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente. Mejoramiento de los procesos de beneficio de minerales auroargentíferos de los distritos mineros de Vetas y California. UIS, 2003.

4.1.3 Conformación de los compositos de Santa Rosa del Sur (Óxidos y Sulfuros).

En la conformación de los compositos de Santa Rosa, se escogieron tres diferentes minas de la región (Mina Nueva, mina Vieja y mina Quemada), según la clasificación macroscópica realizada en los laboratorios de Ingeominas, las muestras de estas minas podían dividirse en dos grupos diferentes:

- Grupo 1: Rocas ígneas de textura granular masiva de color marrón altamente mineralizada, parcialmente alterada y con abundancia de óxidos de hierro.

- Grupo 2: Agregado granular de cuarzo y sulfuros polimetálicos, mena aurífera.

Con esta clasificación, se procedió a conformar un composito de óxidos y un composito de sulfuros por cada mina, las muestras que integraron cada composito, se detallan a continuación.

4.1.3.1 Conformación del composito de Santa Rosa del Sur (Oxidos).

Tabla 11. Muestras que conforman los diferentes composites del composito de santa Rosa del Sur (Oxidos).

TIPO DE MENA	CARACTERÍSTICAS	MUESTRAS	
		Número	Nombre
Mina Nueva			
<i>Composito 1</i>	Menas oxidadas y con arcillas Tenor menor a 6 g/ton. de mineral	8	FEO-MS1
		13	FEO-SR1
		15	FEO-SH1-15
		18	FEO-SH3
		19	FEO-SR2
		20	FEO-MS3
Mina Vieja			
<i>Composito 3</i>	Menas oxidadas y con arcillas Tenor menor a 6 g/ton. de mineral	37	FEO-Mcebo1
		38	FEO-Mcebo2
		39	FEO-JG1
		40	FEO-JG2
		43	FEO-JJ1
		44	FEO-JJ2
		45	FEO-JJ3
		356	FEO-JJ356
		357	FEO-JJ357
		351	FEO-AR351
		352	FEO-AR352
		353	FEO-AR353
		Mina Quemada	
<i>Composito 5</i>	Menas oxidadas y con arcillas Tenor menor a 6 g/ton. de mineral	32-2	FEO-MC1
		34	FEO-AR1
		36	FEO-AR3
		360	FEO-HI-360

Tabla 12. Caracterización mineralógica macroscópica de muestras del composito de Santa Rosa del Sur (Oxidos).

No.	Código	Oxidos	Sulfuros	Feldespatos	Arcillas	Tenor Au g/t	Tenor Ag g/t
Mina Nueva – Composito 1							
8	FEO-MS1	Fe	No	Plagioclasa Ortoclasa	Caolinita Sericitita	4.17	4.83
13	FEO-SR1	Fe	No	Plag.- Ortoc.	Caolinita Sericitita	1.43	0.45
15	FEO-SH1-15	Fe	No	Plagioclasa	No	4.64	21.34
18	FEO-SH3	Fe, Mn	No	Plag.- Ortoc.	Caolinita Sericitita	1.70	1.80
19	FEO-SR2	Fe	No	Plag.- Ortoc.	No	2.36	1.04
20	FEO-MS3	Fe	Si	Alterados	Caolinita Sericitita	3.14	3.52
23	FEO-BO2	Fe	No	Alterado	No	4.00	24.25
24	FEO-AF1	Fe	No	No	Caolinita Sericitita	2.49	5.25
Mina Vieja – composito 3							
37	FEO-MCebo-1	Hematita? Mn	No	Plag.- Ortoc.	Si	7.78	Trazas
38	FEO-MCebo-2	Goethita?	Diseminado Alterados	Plag.- Ortoc.	Caolinita? Sericitita?	7.92	Trazas
39	FEO-JG-1	Fe, Mn	No	Plag.- Ortoc.	Caolinita? Sericitita?	121.07	29.86
40	FEO-JG-2	Hematita? Fe, Mn	Alterados	Alterados	Caolinita? Sericitita?	85.92	18.33
43	FEO-JJ-1	Fe, Mn	No	No	Caolinita? Sericitita?	3.67	5.34
44	FEO-JJ-2	Hematita? Fe, Mn	En proceso de oxidación	Alterados	No	17.40	4.09
45	P-JJ-1	Fe, Mn	No	Alterados	Caolinita? Sericitita?	-	-
351	FEO-AR-351	Fe Hematita ?	No	Alterados	Sericita ? Caolinita ?	14	18.25
352	FEO-AR-352	Mn Hematita ?	No	Alterados	Caolinita ? Sericitita ?	13.47	8.01
353	FEO-AR-353	Hematita ? Goethita ?	No	Alterados	Caolinita ? Sericitita ?	17.97	5.00
354	FEO-AR-354	Hematita ? Mn	No	Alterados	Caolinita ? Sericitita ?	4.77	4.84
355	FEO-AR-355	Hematita ? Goethita ?	No	Alterados	Caolinita ? Sericitita ?	1.48	Trazas
356	FEO-JJ-356	Fe	No	Totalmente Alterados	Caolinita ? Sericitita ?	3.93	6.06
357	FEO-JJ-357	Hematita ? Goethita ?	No	Alterados	Caolinita ? Sericitita ?	3.44	4.05

No.	Código	Oxidos	Sulfuros	Feldespatos	Arcillas	Tenor Au g/t	Tenor Ag g/t
Mina Quemada – Composito 5							
32-2	FEO-MC-1	Hematita?	No	Plagioclasa Ortoclasa	Caolinita?	1.385	5.10
34	FEO-AR-1	Fe y Mn	Pirita	Plagioclasa Ortoclasa	Caolinita? Sericita?	6.39	Trazas
36	FEO-AR-3	Fe y Mn	Pirita alterada	Plagioclasa Ortoclasa	Caolinita? Sericita?	3.15	8.33
360	FEO-HI-360	Limolita, Goethita ? Hematita?	No	Totalmente alterados.	Caolinita ? Sericita ?	45.99	27.25

4.1.3.1.1 Caracterización mineralógica microscópica de los composites de Santa Rosa del Sur (Oxidos).

- COMPOSITO 1:

TIPOS DE MINERALES

% MENA

tr Oro - electrum
3 Pirita
tr Arsenopirita
tr Calcopirita
tr Galena
tr Esfalerita
tr= traza

% GANGA

40 Cuarzo
15 Mica (Moscovita)
tr Circón
tr Rutilo
tr Titanita

% ALTERACION Y OXIDOS

40 Hematita - Goethita
Tr Magnetita

- ASOCIACIONES:

Pirita - Arsenopirita a veces se encuentran asociadas.
Pirita - Hematita – Goethita con textura relictica
Cuarzo - sericita

- **TEXTURA:** Agregado de fragmentos angulares de tamaño variable entre 30 y 200 µm tamaño medio 90 µm.

Oro: Tipo electrum, libre, asociado a pirita y Oxidos de hierro. De tamaño menor a 100 µm

Pirita: Fragmentos angulares de tamaño variable entre 50 y 180 µ, ocasionalmente presenta textura microcristalina y frecuentemente presenta bordes oxidados a hematita presentando textura relictica

Arsenopirita, Calcopirita, Galena y esfalerita: De escasa ocurrencia, en fragmentos monominerales.

Cuarzo: Fragmentos angulares monominerales a veces elongados, de tamaño variable entre 50 y 200 μm . Frecuentemente asociados con Mica microcristalina (Sericita)

Hematita - Goethita: Agregado policristalino con textura relictica, oolitica y bandeada.

– El oro es de tipo electrum se encuentra libre y asociado con pirita y óxidos de hierro como hematita y goethita, tiene la característica de ser de grano fino, pues no se observaron partículas mayores a 100 μm

- Los análisis de oro por fracciones indican bajo contenido de oro en la fracción fina (1.65 g/t) y el contenido de oro en la fracción de livianos (0.66 g/t) se atribuye a su asociación con cuarzo

- COMPOSITO 3:

TIPOS DE MINERALES

% MENA	% GANGA	% ALTERACION Y OXIDOS
tr Oro Nativo	55 Cuarzo	20 Hematita - Goethita
1 Pirita	20 Mica (Muscovita - illita)	tr Magnetita
	tr Circón	tr Ilmenita
	tr Titanita	4 Rutilo
	tr feldespato	
	tr Clórita	

tr=trazas

- ASOCIACIONES:

Pirita - Hematita –Goethita con textura relictica

Cuarzo - sericita.

- **TEXTURA:** Agregado de fragmentos angulares de tamaño variable entre 40 y 250 μm tamaño medio 100 μm .

Oro: Nativo. Libre y asociado a Oxidos de hierro tamaño de oro menor a 70 μm (7 granos)

Pirita: Fragmentos angulares y subhedrales de tamaño menor a 100 μm , presenta textura masiva.

Cuarzo: Fragmentos angulares monominerales a veces elongados, de tamaño variable entre 50 y 200 μm . Frecuentemente asociados con Mica microcristalina (Sericita)

Hematita - Goethita: Agregado policristalino con textura relictica, oolitica y bandeada.

– El oro es nativo, se encuentra libre o incluido y asociado con óxidos de hierro como hematita y goethita. El oro asociado a hematita goethita suele ser de grano fino. El oro libre es de mayor tamaño sin sobrepasar los 150 μm . Se evidencia no hay oro asociado con ganga de cuarzo y mica.

- **COMPOSITO 5:**

TIPOS DE MINERALES

% MENA	% GANGA	% ALTERACION Y OXIDOS
tr Oro - electrum	50 Cuarzo	10 Hematita- Goethita
tr Pirita	39 Mica (Muscovita - illita)	tr Magnetita
	tr Circón	tr Ilmenita
	tr Titanita	1 Rutilo
	tr turmalina	

tr = trazas

- **ASOCIACIONES:**

Pirita- Hematita –Goethita con textura relictica
Cuarzo- sericita.

- **TEXTURA:** Agregado de fragmentos angulares de tamaño variable entre 50 y 220 µm tamaño medio 90 µm.

Oro: Tipo electrum, libre y asociado a Oxidos de hierro. Tamaño de oro menor a 100 µm.

Cuarzo: Fragmentos angulares monominerales a veces elongados, de tamaño variable entre 50 y 250 µm. Frecuentemente ligados con mica microcristalina (Sericita) y hematita- goethita

Pirita: Fragmentos angulares anhedrales de tamaño menor a 200 µm, presenta textura masiva

Hematita - Goethita: Agregado policristalino con textura relictica, masiva, oolitica y bandeada.

– El oro es de tipo electrum se encuentra libre, asociado con óxidos de hierro como hematita y goethita. El oro asociado a hematita- goethita suele ser de grano fino. El oro libre es de mayor tamaño sin sobrepasar los 350 µm. NO se observo oro asociado con pirita.

4.1.3.2 Conformación del composito de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).

Tabla 13. Muestras que conforman los diferentes compositos de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).

TIPO DE MENA	CARACTERÍSTICAS	MUESTRAS	
		Número	Nombre
Mina Nueva			
Composito 2	Menas sulfuradas Tenor mayor a 6 g/ton. de mineral	7	FEO-RP1
		14	FEO-RP2
		16	FEO-SH2
		17	T2001-FEO1
		25	FEO-BO3
		26	FEO-MS4
Mina Vieja			
Composito 4	Menas sulfuradas Tenor mayor a 6 g/ton. de mineral	16	FEO-JM1
		29	FEO-LT1
		30	FEO-LT2
		32-1	FEO-LT3
		47	FEO-AR1
		364	FEO-JP364
		365	FEO-JP365
		366	FEO-JP366
		367	FEO-JP367
		368	FEO-JCA368
		369	FEO-JCA369
Mina Quemada			
Composito 6	Menas sulfuradas Tenor mayor a 6 g/ton. de mineral	362	FEO-MA-362
		358	FEO-HII-358

Tabla 14. Caracterización mineralógica macroscópica de muestras del composito de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).

No.	Código	Oxidos	Sulfuros	Feldespatos	Arcillas	Tenor Au g/t	Tenor Ag g/t
Mina Nueva – Composito 2							
7	FEO-RP1	Fe	Pirita	Plag.- Ortoc.	Caolinita Sericita	8.00	39.74
14	FEO-RP2	Fe	Pirita	Plag.- Ortoc.	Caolinita Sericita	19.00	73.24
16	FEO-SH2	Fe	Si	Si	Caolinita Sericita	8.00	18.33
17	T2001-FEO1	Fe	Pirita	Plagioclasa	No	17.17	54.81
25	FEO-BO3	Fe	Pirita Calcopirita	Plagioclasa	Caolinita Sericita	6.95	23.55
26	FEO-MS4	Fe, Mn	Calcopirita Pirita	Plag.- Ortoc.	Caolinita?	10.00	37.50
Mina Vieja – composito 4							
16	FEO-JM1	Fe, Mn	Pirita	En proceso de alteraciòn	Sericita? Caolín?	145.0	32.74
29	FEO-LT-1	Hematita?	Pirita Galena	Plagioclasa	Caolinita? Sericita?	14.5	44.65
30	FEO-LT-2	Fe	Pirita diseminada	Plagioclasa	Caolinita? Sericita?	2.55	4.44
32-1	FEO-LT-3	Fe	Pirita	Plagioclasa	Caolinita? Sericita?	4.45	23.51
47	FEO-AR-1	Fe	Pirita	Plagioclasa alterada	Sericita?	67.20	63.66
364	FEO-JP-364	Limonita ?	Pirita diseminada	Totalmente alterados	Caolinita ? Sericita ?	24.5	76.47
365	FEO-JP-365	Goethita? Hematita? Mn	Pirita disem. Otros sulfuros alterados	Totalmente alterados	Caolinita ? Sericita ?	17.45	50.49
366	FEO-JP-366	Limolita ? Goethita ? Hematita ? Mn	Si	Totalmente alterados	Caolinita ? Sericita ?	8.07	6.55
367	FEO-JP-367	Limolita ? Goethita ? Hematita ? Mn	Pirita diseminada	Totalmente alterados (plagioclasa)	Caolinita ? Sericita ?	3.47	5.18
368	FEO-JCA-368	Limolita, Goethita ? Hematita ? Mn	Pirita (diseminada y venillas)	Totalmente alterados.	Caolinita ? Sericita ?	6.00	14.25
369	FEO- JCA-369	Mn	Si	Totalmente alterados.	Caolinita ? Sericita ?	48.33	10.64

No.	Código	Oxidos	Sulfuros	Feldespatos	Arcillas	Tenor Au g/t	Tenor Ag g/t
Mina Quemada – Composito 6							
358	FEO-HII-358	Limolita Goethita ? Hematita ?	Sulfuros de hierro en proceso de oxidación (Galena ?)	Poca cantidad, totalmente alterados.	Caolinita ? Sericita ?	7.62	11.75
362	FEO-MA-362	Limolita Goethita ? Hematita ?	Si	Totalmente alterados.	Caolinita ? Sericita ?	5.97	2.52

4.1.3.2.1 Caracterización mineralógica microscópica de los compositos de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).

- COMPOSITO 2:

TIPOS DE MINERALES

% MENA

tr Oro - electrum
6 Pirita
tr Arsenopirita
tr Calcopirita
tr Galena
tr Esfalerita
tr = trazas

% GANGA

65 Cuarzo
18 Mica (Moscovita)
1 Circón
tr Rutilo
tr Titanita

% ALTERACION Y OXIDOS

10 Hematita - Goethita
tr Magnetita
tr calcosita - covelina

- ASOCIACIONES:

Pirita - Arsenopirita a veces se encuentran asociadas.
Arsenopirita - esfalerita
Pirita - Hematita - Goethita con textura relictica
Cuarzo - sericita.
Alteración de calcopirita a calcosita - covelina

- **TEXTURA:** Agregado de fragmentos angulares de tamaño variable entre 30 y 200 µm tamaño medio 90 µm.

Oro: Tipo electrum, libre, asociado a Oxidos de hierro y a pirita. Tamaño de oro menor a 200 µm y oro muy fino incluido en óxidos de hierro.

Pirita: Fragmentos angulares y euhedrales de tamaño variable entre 50 y 200 µ, ocasionalmente

presenta textura microcristalina y frecuentemente presenta bordes oxidados a hematita presentando textura relictica.

Arsenoprita, Calcopirita, Galena y esfalerita: De escasa ocurrencia, en fragmentos monominerales. Calcopirita exsuelta en esfalerita y ocasionalmente alterada a calcosita - covelina

Cuarzo: Fragmentos angulares monominerales a veces elongados, de tamaño variable entre 50 y 200 μm . Frecuentemente asociados con mica microcristalina (Sericitita)

Hematita - Goethita: Agregado policristalino con textura relictica, oolitica y bandeada.

- El oro es de tipo electrum se encuentra libre, asociado con óxidos de hierro como hematita y goethita y en menor proporción con pirita. El oro asociado a hematita - goethita suele ser de grano fino. El oro libre es de mayor tamaño sin sobrepasar los 200 μm

- COMPOSITO 4:

TIPOS DE MINERALES

% MENA	% GANGA	% ALTERACION Y OXIDOS
tr Oro - electrum	40 Cuarzo	8 Hematita- Goethita
40 Pirita	10 Mica (Muscovita - illita)	tr Magnetita
tr Esfalerita	1 Circón	tr Ilmenita
tr Galena	tr Titanita	1 Rutilo
	tr Clórita	
	tr turmalina	

tr = trazas

- ASOCIACIONES:

Pirita - Hematita –Goethita con textura relictica
Cuarzo – sericitita.

- **TEXTURA:** Agregado de fragmentos angulares de tamaño variable entre 40 y 300 μm tamaño medio 110 μm

Oro: Tipo electrum, libre y asociado a Oxidos de hierro. Tamaño de oro menor a 100 μm

Pirita: Fragmentos angulares euhedrales y subhedrales de tamaño menor a 300 μm , presenta textura masiva rara vez framboidal.

Esfalerita: Fragmentos angulares con exsolución de calcopirita y local remplazamiento anular de galena en bordes.

Galena Granos Subhedrales libres o reemplazando esfalerita.

Cuarzo: Fragmentos angulares monominerales a veces elongados, de tamaño variable entre 50 y 350 µm. Frecuentemente ligados con mica microcristalina (Sericita) y hematita – goethita.

Hematita - Goethita: Agregado policristalino con textura relictica, masiva, oolítica y bandeada.

- El oro es de tipo electrum se encuentra libre y asociado con óxidos de hierro como hematita y goethita. El oro asociado a hematita - goethita suele ser de grano fino. El oro libre es de mayor tamaño sin sobrepasar los 100 µm. NO se observo oro asociado con pirita

4.2 MINERALOGIA DE LOS COMPOSITOS DE CADA TIPO DE MENA

4.2.1 Mineralogía del composito de Vetas. En la caracterización del composito de Vetas, solo en una de las muestras se encontró oro. El tenor promedio de este composito es 5,09 g/t de oro y de 60,58 g/t de plata. En este caso, el valor de la mediana es mucho menor que el promedio. Por ejemplo, el valor de 1,70 de la mediana indica que la mitad de los datos obtenidos de las muestras estuvo por debajo de este valor.

La mayoría de las muestras está conformada de la siguiente manera: Entre los minerales de mena se encontró pirita, calcopirita, esfalerita y galena, los minerales de alteración que se determinaron fueron sericita, moscovita, hematita - goethita y calcita, y entre los minerales de ganga se encontraron cuarzo, biotita y plagioclasa, en las siguientes proporciones:

- Minerales de mena:
 - Pirita (12%)
 - Esfalerita y galena (1%)

- Minerales de alteración:
 - Sericita (20.5 %)
 - Hematita y goethita (1%)

- Minerales de ganga:
 - Cuarzo (51.4%)
 - Biotita (9.5%)
 - Plagioclasa (5.5%)

En cuanto a la textura, el composito presenta un cuarzo donde predomina la textura masiva y en algunos casos la textura de peine masivo y brechado. Los sulfuros se presentan en agregados policristalinos con textura hipidiomórfica y con un tamaño que varía entre 5 y 710 μm con un promedio de 69.7 μm . Un resumen de esta caracterización se presenta a continuación en la tabla 15.

Tabla 15. Composición mineralógica del composito de Vetas

MUESTRA	MENA				GANGA			ALTERACION			
	Py	Es	Cp	Ga	Q	Bt	Pg	Mu	Sr	H-G	Cc
RANGO	1 - 30	0 - 3	0 - <1	0 - 3	10 - 80	0 - 37	0 - 25	0 - 4	3 - 60	0 - <1	0 - 5
PROMEDIO	11.9	0.5	0	0.3	51.4	9.2	5.5	0.4	20.3	0	0.5

- Convenciones: Py: pirita, Es: Esfalerita, Cp: Calcopirita, Ga: Galena, Q: Cuarzo, Bt: biotita, Pg: Plagioclasa, Mu: Muscovita, Sr: Sericita, H-G Hematita - Goetita, Cc: Calcita

4.2.2 Mineralogía del composito de California. Respecto a la caracterización del composito de California, en ninguna de las muestras de secciones delgadas pulidas del composito se encontró oro. El tenor promedio de este composito es de 11,21 g/t de oro y de 172,17 g/t de plata. Como el valor de la mediana (4,73) es mucho menor que el promedio, se concluye, que los datos presentan una alta tendencia a los valores bajos. El valor de 4,73 de la mediana, indica que la mitad de los datos obtenidos de las muestras estuvieron por debajo de este valor.

La mayoría de las muestras está conformada de la siguiente manera: Entre los minerales de mena predomina la pirita, aunque aparece algo de calcopirita y esfalerita, el mineral de alteración corresponde a sericita, y en la ganga se encontró cuarzo, en las siguientes proporciones:

- Minerales de mena:
 - Pirita (8.5%)
 - Esfalerita y calcopirita (1%)
- Minerales de alteración:
 - Sericita (28.5 %)
- Minerales de ganga:
 - Cuarzo (61.5%)

La textura predominante en el composito de California, en el caso del cuarzo es la brechada tipo relleno y en algunos casos la anhedral tipo Buck “grosso” y mosaico; la pirita y la esfalerita se presenta en forma de agregados policristalinos con textura hipidiomórfica. El tamaño de los sulfuros varía entre 5 y 1400 μm con un promedio de 80,3 μm . La caracterización promedio del composito, se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. Composición mineralógica del composito de California.

MUESTRA	MENA			GANGA	ALTERACIÓN
	Pirita	Esfalerita	Calcopirita	Cuarzo	Sericita
RANGO	3 – 15	0 – 1	0 - <1	47 – 82	10 – 40
PROMEDIO	8.3	0.5	0	61.5	28.2

4.2.3 Mineralogía de los composito de Santa Rosa del Sur (Oxidos y Sulfuros)

Un resumen de la caracterización mineralógica de los compositos de Santa Rosa del Sur, puede apreciarse en la tabla 17.

Tabla 17. Análisis mineralógico microscópico de los composito de Santa Rosa del Sur

Tipo de mineral	Mineral	I	II	III	IV	V	
MENA	Oro (electrum, nativo)	tr	tr	tr	tr	tr	
	Pirita	3	6	1	40	tr	
	Arsenopirita	tr	tr	-	tr	-	
	Galena	tr	tr	-	tr	-	
Subtotal mena		3	6	1	40	tr	
GANGA	Cuarzo	40	65	55	40	50	
	Mica (Muscovita-illita)	15	18	20	10	39	
	Circón	tr	1	tr	1	tr	
Subtotal ganga		55	83	75	50	89	
ALTERACIÓN Y OXIDOS		Hematita-Goethita	40	10	20	8	10
		Magnetita	tr	tr	tr	tr	tr
		Ilmenita	-	-	tr	tr	tr
Subtotal alteración y óxidos.		40	10	24	9	10	

4.2.3.1 Mineralogía del composito de óxidos de Santa Rosa del Sur. La mayoría de muestras que integran este composito (composito 1, 3 y 5) están conformadas de la siguiente manera: Entre los minerales de mena se encontraron bajos porcentajes de pirita, con el oro está poco asociado a esta mena, los minerales de alteración determinados fueron principalmente minerales alterados como óxidos de hierro (hematita y goethita) y rutilo, entre los minerales de ganga se encontraron cuarzo, mica (muscovita, illita).

Estos minerales se encontraron en las siguientes proporciones:

- Minerales de mena:
 - Oro es de tipo electrum y nativo, oro asociado con pirita y minerales de alteración. Poca asociación a cuarzo o mica.

- Minerales de alteración:
 - Hematita y goethita (22 - 25 %)

- Minerales de ganga:
 - Cuarzo (50%)
 - Mica (muscovita, illita): 20 -22%

Las principales asociaciones que se presenta en este composito son:

- Pirita - Esfalerita
- Calcopirita - Esfalerita
- Galena - Esfalerita
- Pirita - Galena
- Calcopirita - Galena

En cuanto a la textura de este composito, se presenta una roca ígnea de textura fanerítica, principalmente con granos de cuarzo y feldespato equigranulares, que son parcialmente elongados. Normalmente con intensa alteración fílica.

4.2.3.2 Mineralogía del composito de sulfuros Santa Rosa del Sur. La mayoría de muestras que integran este composito (composito 2, 4 y 6) están conformados de la siguiente manera: Entre los minerales de mena se encontró pirita, presente en porcentajes representativos y mayores a los del composito de óxidos, también se encontró galena, esfalerita y calcopirita, los minerales de alteración los forman bajos porcentajes de hematita y goethita y entre los minerales de ganga se determinaron cuarzo y mica, junto con rutilo.

La proporción en que se encontraron estos minerales fue la siguiente:

- Minerales de mena:
 - Oro es de tipo electrum y se encuentra libre y asociado a óxidos de hierro y en menor proporción a pirita. Oro asociado a cuarzo es muy bajo.
 - Pirita (23%)
- Minerales de alteración:
 - Hematita y goethita (10%)
- Minerales de ganga:
 - Cuarzo (50%)
 - Mica (15%)

las principales asociaciones minerales que presenta este composito son:

- Cristalización primaria de cuarzo, feldespato y biotita, con Posterior sericitización, piritización y silicificación por alteración fílica.
- Recristalización de hematita - goethita a partir de pirita.
- Recristalización de pirita y rutilo y posterior remplazamiento de pirita por hematita y goethita.

Respecto a la textura de este composito, se presenta una textura granular de cuarzo y pirita principalmente. Gran variedad de texturas de remplazamiento, exsolución, fracturamiento y relleno.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

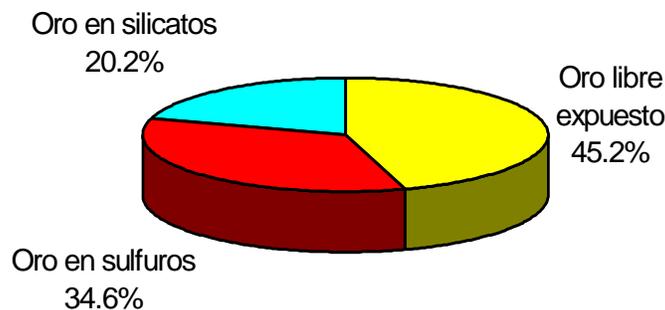
5.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta primera parte del capítulo de resultados experimentales, se muestran los resultados de las diferentes pruebas y ensayo realizados a las menas (compositos) de interés para el estudio (Composito de Vetás, Composito de California, Composito de Oxidos de Santa Rosa del Sur y Composito de Sulfuros de Santa Rosa del Sur). Estos resultados consisten principalmente de ensayos de lixiviación diagnostica, consumo de cianuro y extracción de oro.

5.1.1 Resultados de las pruebas de lixiviación diagnostica aplicada a cada tipo de mena.

5.1.1.1 Lixiviación diagnostica del composito de Vetás.

COMPOSITO DE VETAS



5.1.1.2 Lixiviación diagnóstica del composito de California.

COMPOSITO DE CALIFORNIA



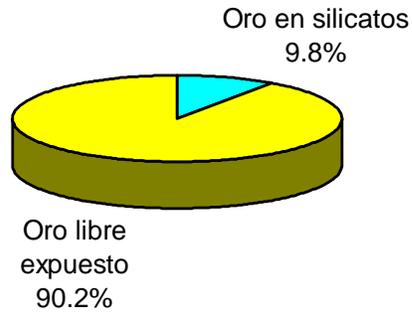
5.1.1.3 Lixiviación diagnóstica del composito de Santa Rosa del Sur (Oxidos).

COMPOSITO DE SANTA ROSA DEL SUR (OXIDOS)



5.1.1.4 Lixiviación diagnóstica del composito de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).

COMPOSITO DE SANTA ROSA DEL SUR (SULFUROS)



5.1.2 Resultados de las pruebas de cianuración aplicadas a cada tipo de mena.

5.1.2.1 Cianuración del composito de Vetas.

Tabla 18. Consumo de cianuro vs tiempo para diferentes granulometrías.

Composito de Vetas.

Consumo de Cianuro (Kg/ton. Mineral)			
Tiempo (Horas)	-60 +100 Ty	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0	0
1	0.6	0.3	0.4
2	0.9	0.5	0.7
3	1	1	1.3
4	0.9	1.3	1.4
5	1.1	1.4	1.3
8	1.6	1.8	1.8
12	1.8	2	2.1
16	2	2.6	2.8
20	2.2	3.4	3
24	2.4	4.8	3.2

Gráfico 23. Curva de consumo de cianuro vs tiempo para diferentes granulometrías.
Composito de Vetas

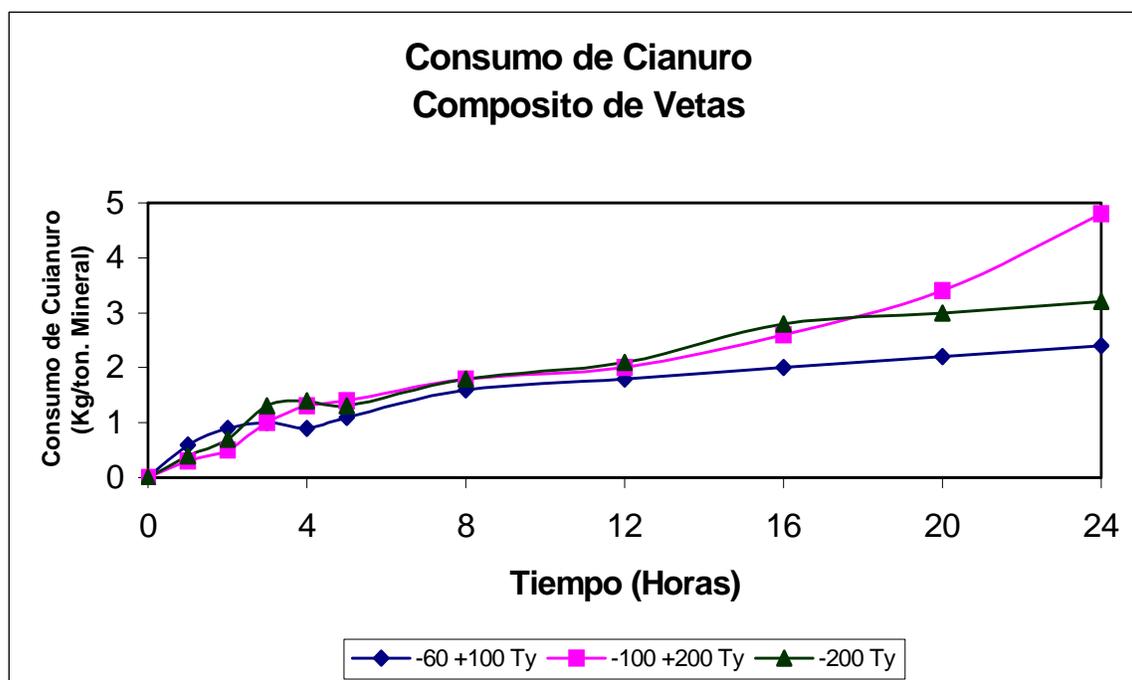
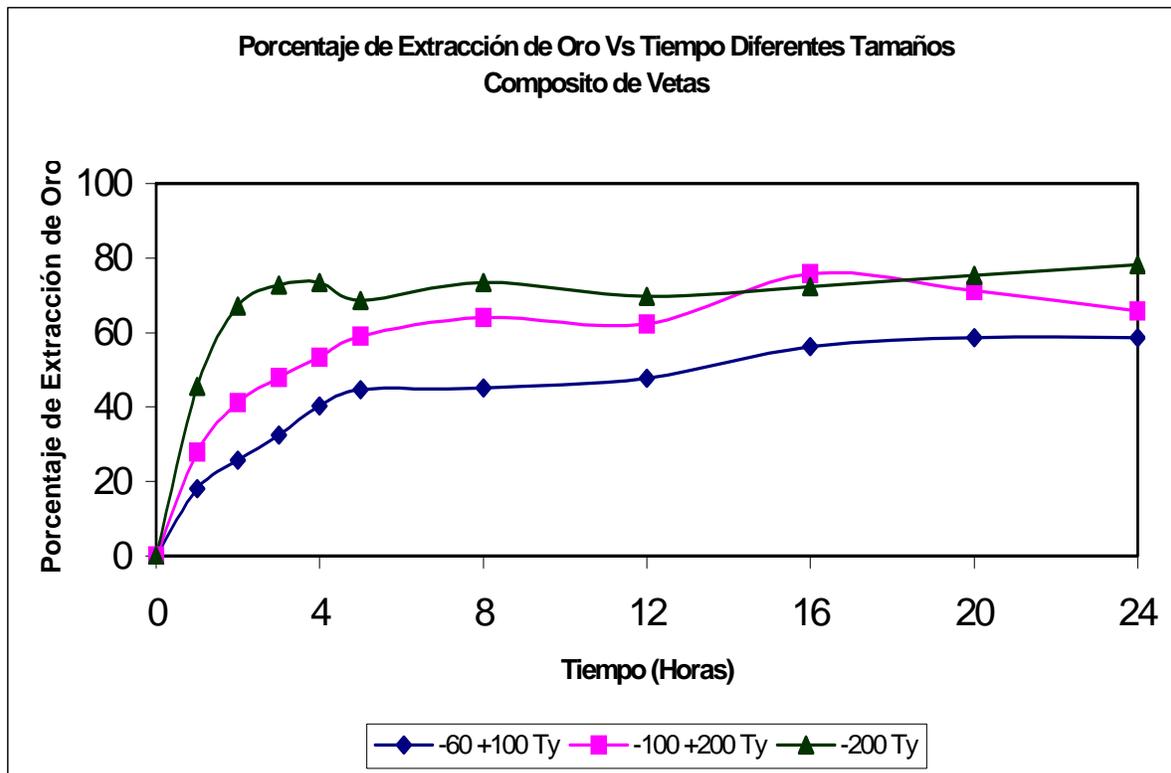


Tabla 19. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías. Composito de Vetas.

Porcentaje de Extracción de Oro (%)			
Tiempo (Horas)	-60 +100 Ty	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0	0
1	18.1	27.8	45.5
2	25.6	41.2	67.2
3	32.5	47.9	72.8
4	40.3	53.4	73.4
5	44.6	59.1	68.6
8	45.1	64	73.5
12	47.8	62.3	69.7
16	56.2	75.8	72.3
20	58.6	71.3	75.4
24	58.6	65.7	78.3

Gráfico 24. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías. Composito de Vetas



5.1.2.2 Cianuración del composito de California.

Tabla 20. Consumo de cianuro vs tiempo para diferentes granulometrías.
Composito de California.

Cianuro Libre (ppm)			
Tiempo (Horas)	-60 +100 Ty	-100 +200 Ty	-200 ty
0	5000	5000	5000
1	261.85	282.85	250.85
2	235.17	240.4	235.17
3	235.17	250.85	271.75
4	235.17	256.07	261.3
5	235.17	250.85	256.07
8	240.4	256.07	235.17
12	266.53	245.62	324.01
16	261.3	240.4	303.11
20	256.07	256.07	250.85
24	256.07	271.75	250.85

Gráfico 25. Curva de cianuro libre vs tiempo para diferentes granulometrías.
Composito de California.

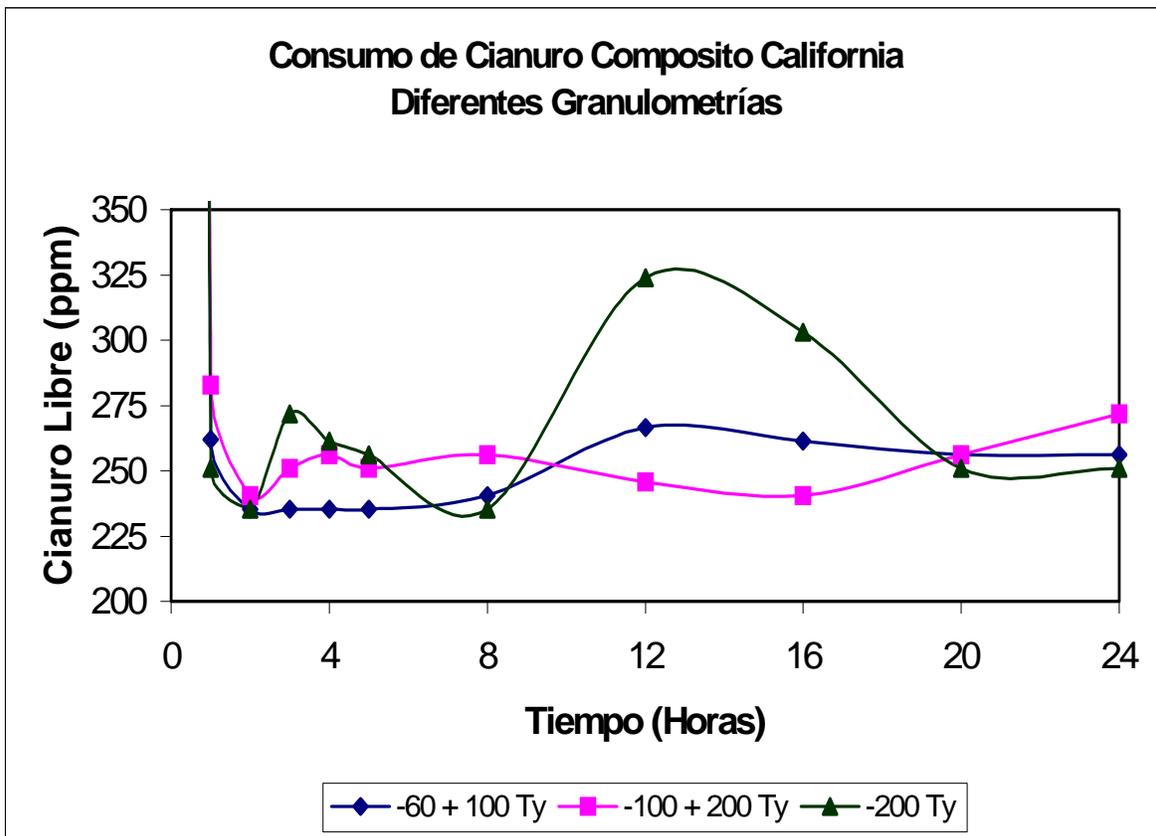
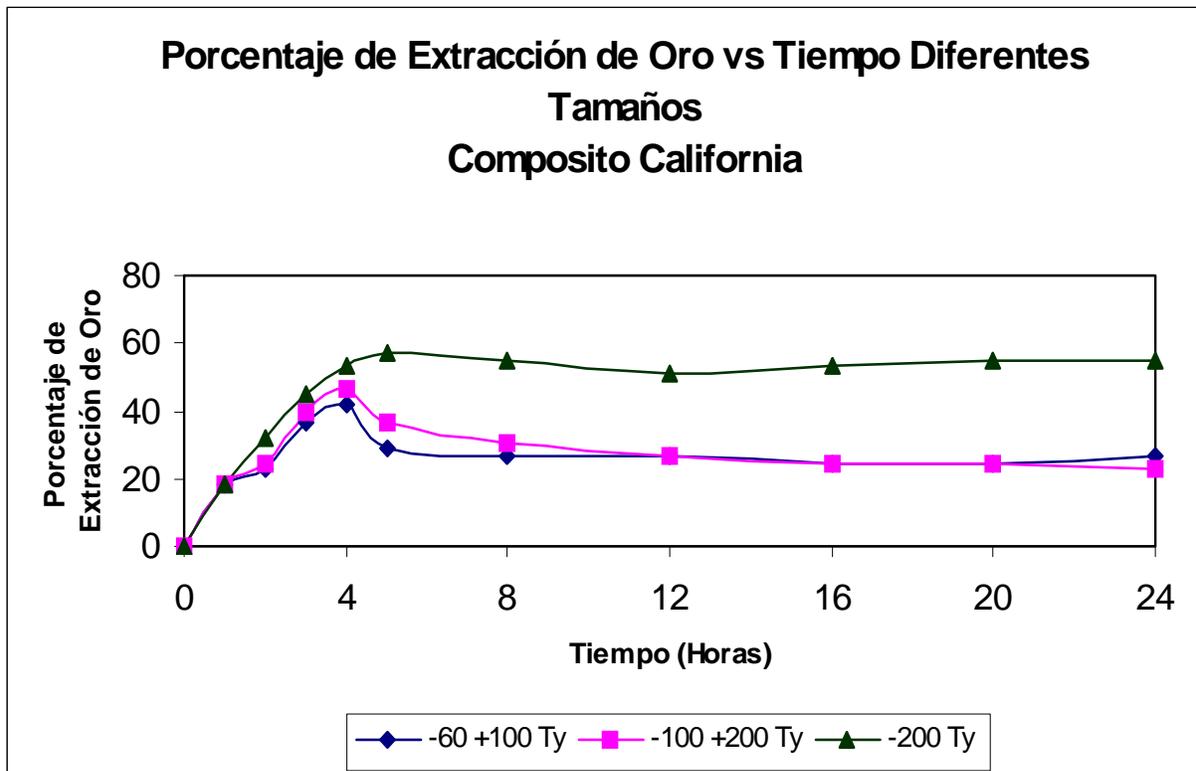


Tabla 21. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías. Composito de California.

Porcentaje de Extracción de oro (%)			
Tiempo (Horas)	-60 +100 Ty	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0	0
1	18.18	18.18	18.18
2	22.72	24.24	32.3
3	36.4	39.4	45.2
4	42.2	46.7	53.03
5	28.8	36.3	56.81
8	26.51	30.3	55
12	26.51	26.51	50.8
16	24.24	24.24	53.03
20	24.24	24.24	55
24	26.51	22.72	55

Gráfico 26. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías. Composito de California.



5.1.2.2.1 Cianuración del compuesto Sinúes -Tiguarí (California).

Tabla 22. Consumo de cianuro vs tiempo. compuesto Sinúes – Tiguarí (California).

Cianuro Libre (ppm) – d80: -200 Ty		
Tiempo (Horas)	Muestra 1	Muestra 2
0	1000	1000
4	418.29	372.39
6	476.18	490.97
8	497.05	486.09
12	504.35	505.39
16	506.96	498.09
24	497.56	496

Gráfico 27. Curva de consumo de cianuro libre vs tiempo.
Composito Sinúes - Tiguarí (California).

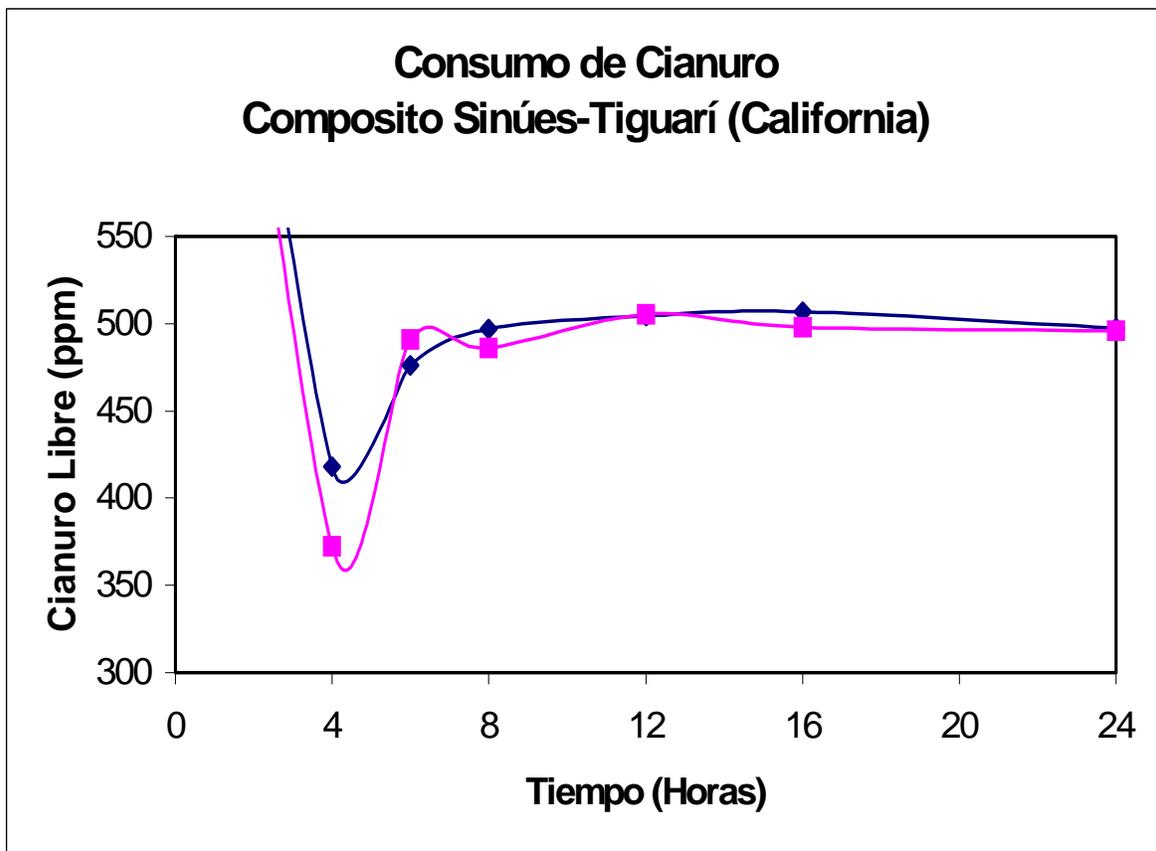
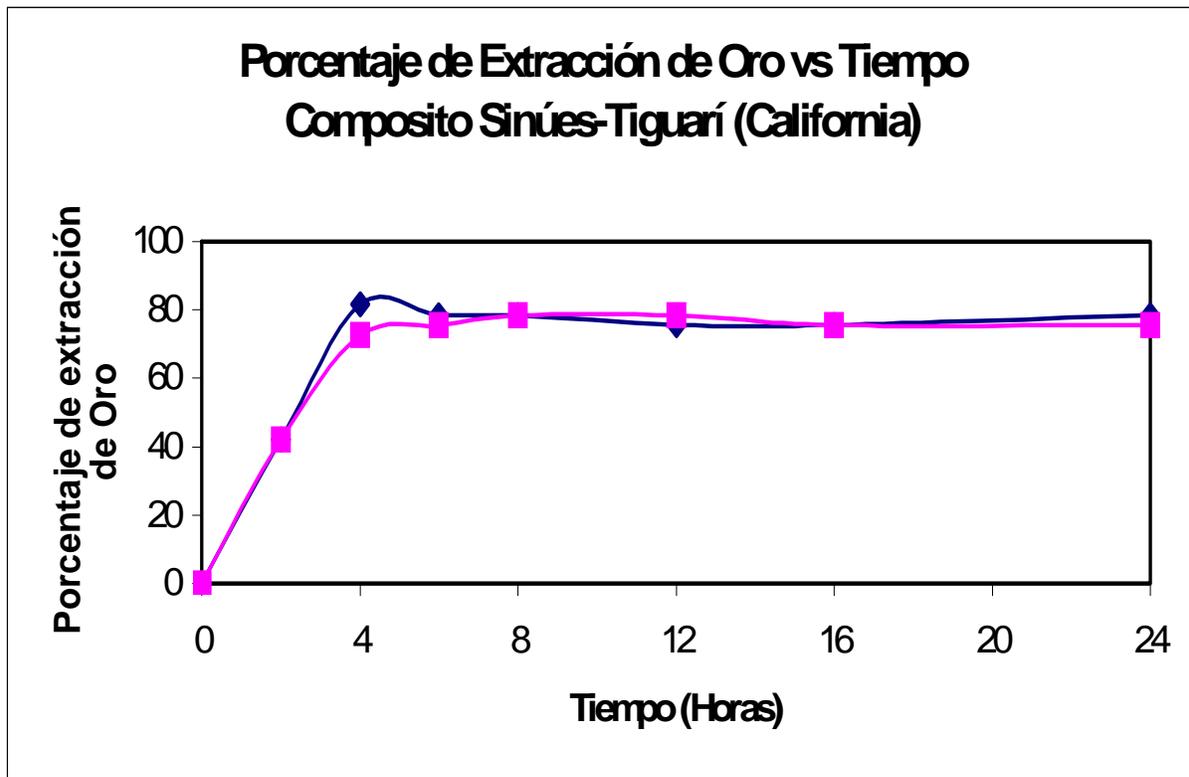


Tabla 23. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo. Composito Sinúes – Tiguarí.

Porcentaje de extracción de oro (%) – d80: -200 Ty		
Tiempo (Horas)	Muestra 1	Muestra 2
0	0	0
2	42.18	42.18
4	81.81	72.72
6	78.5	75.6
8	78.5	78.5
12	75.6	78.5
16	75.6	75.6
24	78.5	75.6

Gráfico 28. Porcentaje de extracción de oro. Composito Sinúes – Tiguarí (California).



5.1.2.2.2 Cianuración del compuesto Machuca – San Celestino (California)

Tabla 24. Consumo de cianuro vs tiempo.

Composito Machuca – San Celestino (California).

Cianuro libre (ppm) – d80: -200 Ty		
Tiempo (Horas)	Muestra 1	Muestra 2
0	1000	1000
2	158	177
4	453.76	455.84
6	467.84	463.15
8	476.18	475.14
12	477.75	469.4
16	474.62	470.45
24	444.89	448.02

Gráfico 29. Cianuro libre vs tiempo.

Composito Machuca – San Celestino (California).

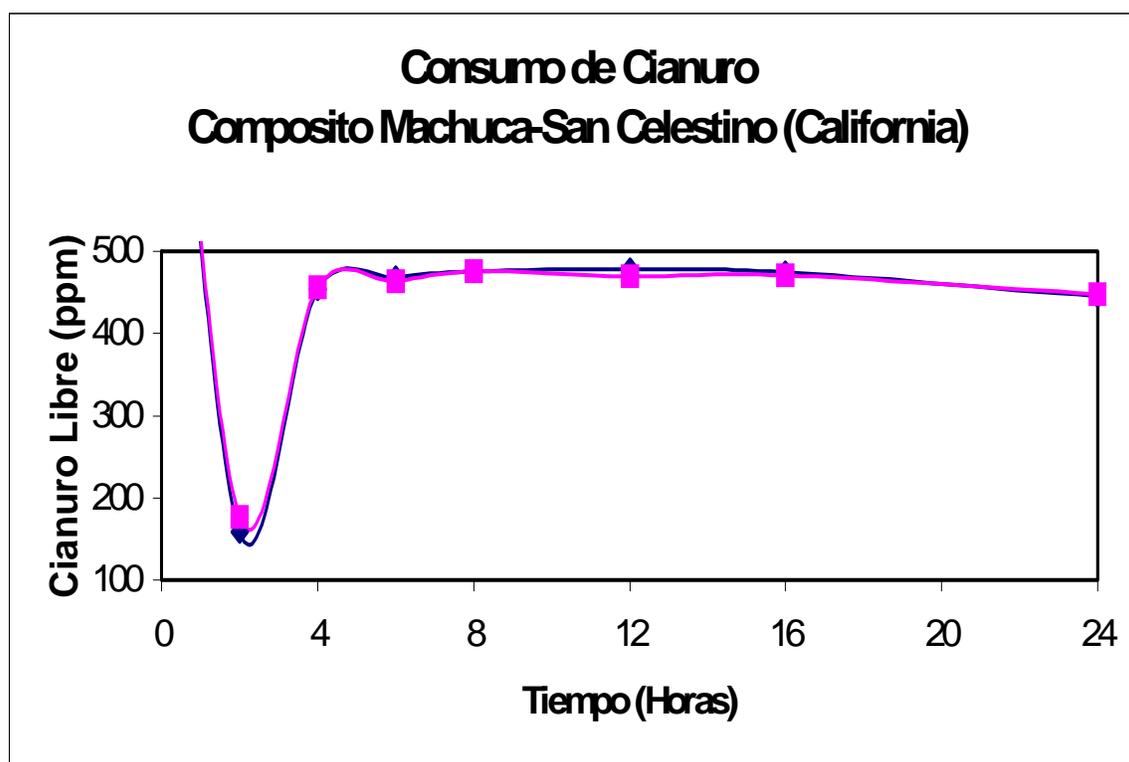
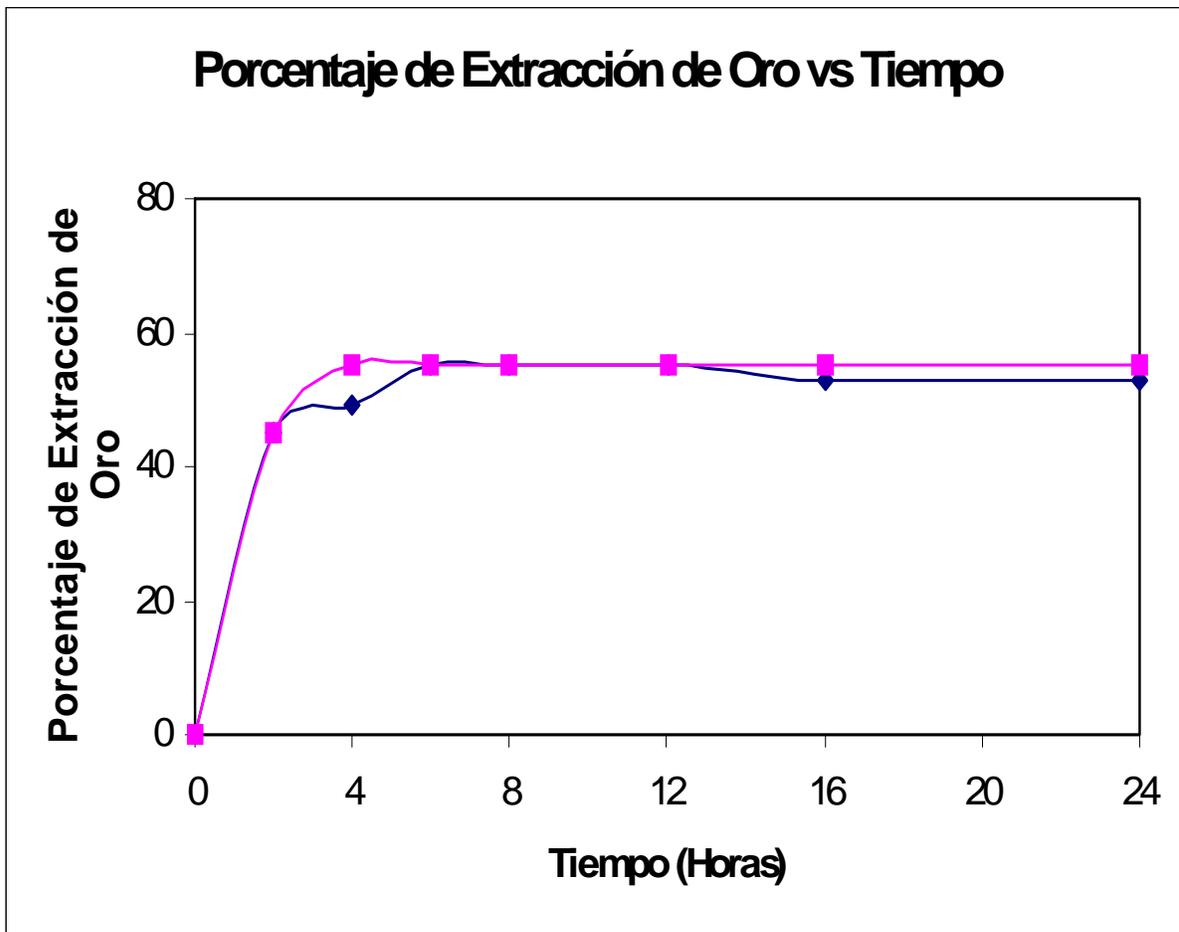


Tabla 25. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Composito Machuca – San Celestino (California).

Porcentaje de extracción de oro (%) – d80: -200 Ty		
Tiempo (Horas)	Muestra 1	Muestra 2
0	0	0
2	45.2	45.2
4	49.07	55
6	55	55
8	55	55
12	55	55
16	53	55
24	53	55

Gráfico 30. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Composito Machuca – San Celestino (California).

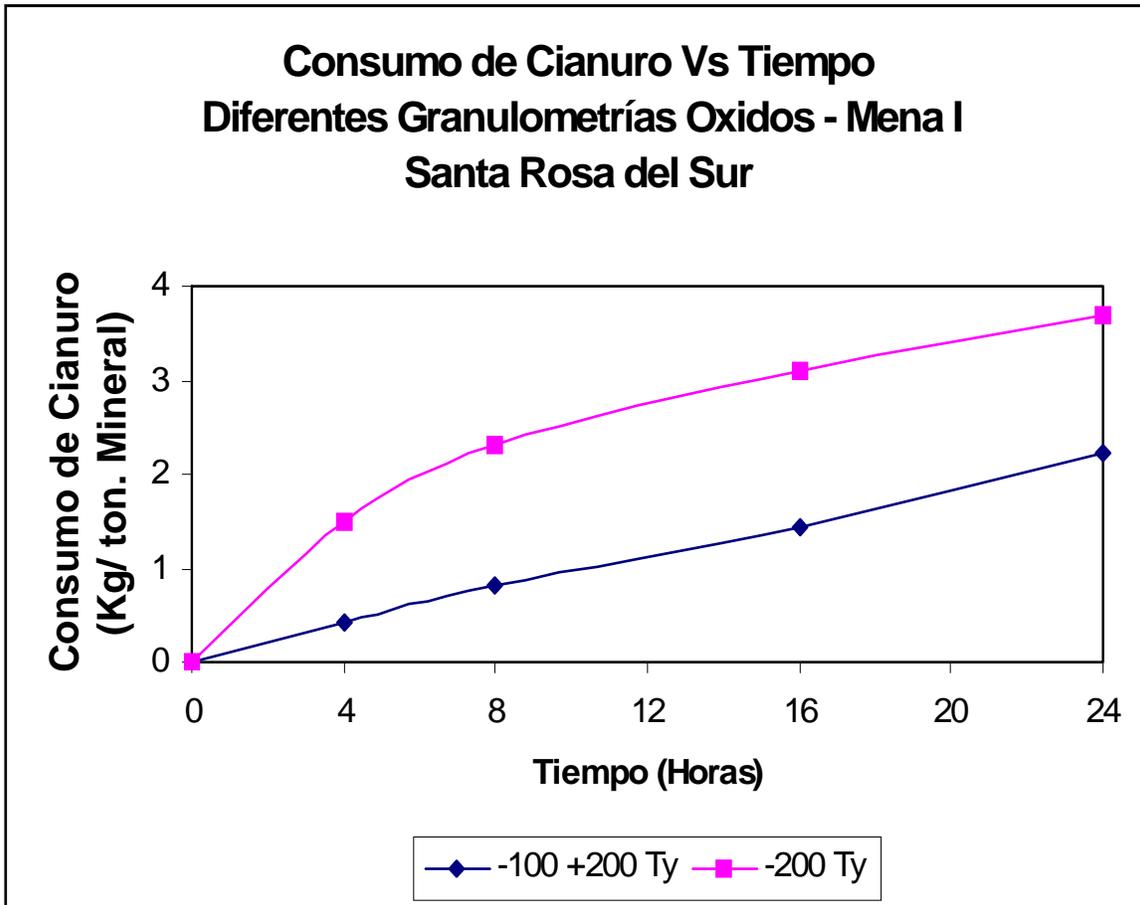


5.1.2.3 Cianuración del compuesto de Santa Rosa del Sur (Oxidos).

Tabla 26. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Oxidos – Composito I.

Consumo de Cianuro (Kg/ton.Mineral)		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	0.42	1.494
8	0.83	2.304
16	1.45	3.085
24	2.23	3.696

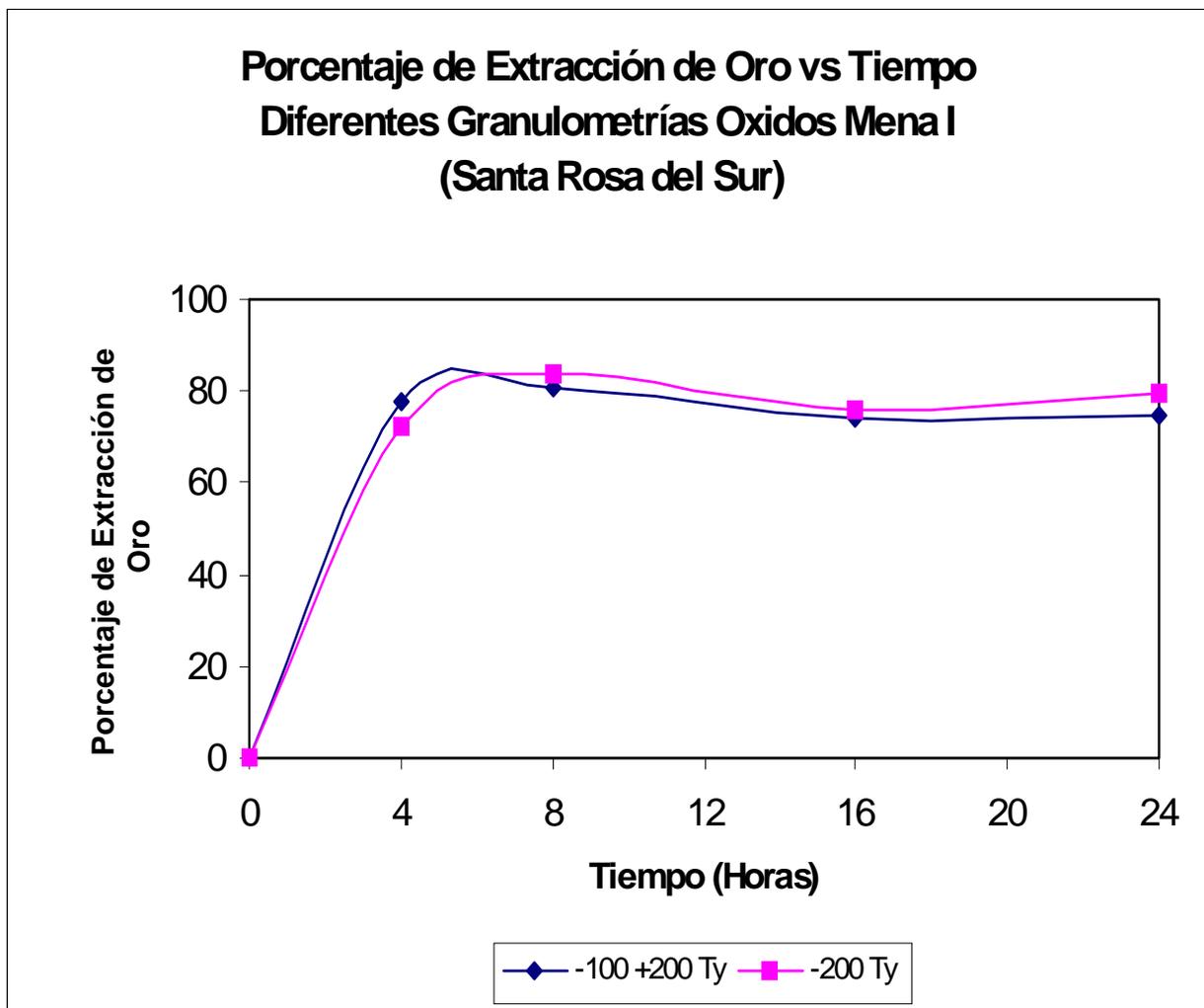
Gráfico 31. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito I – Oxidos.



**Tabla 27. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito I – Oxidos.**

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	77.62	72.55
8	80.48	83.91
16	73.81	75.72
24	74.96	79.3

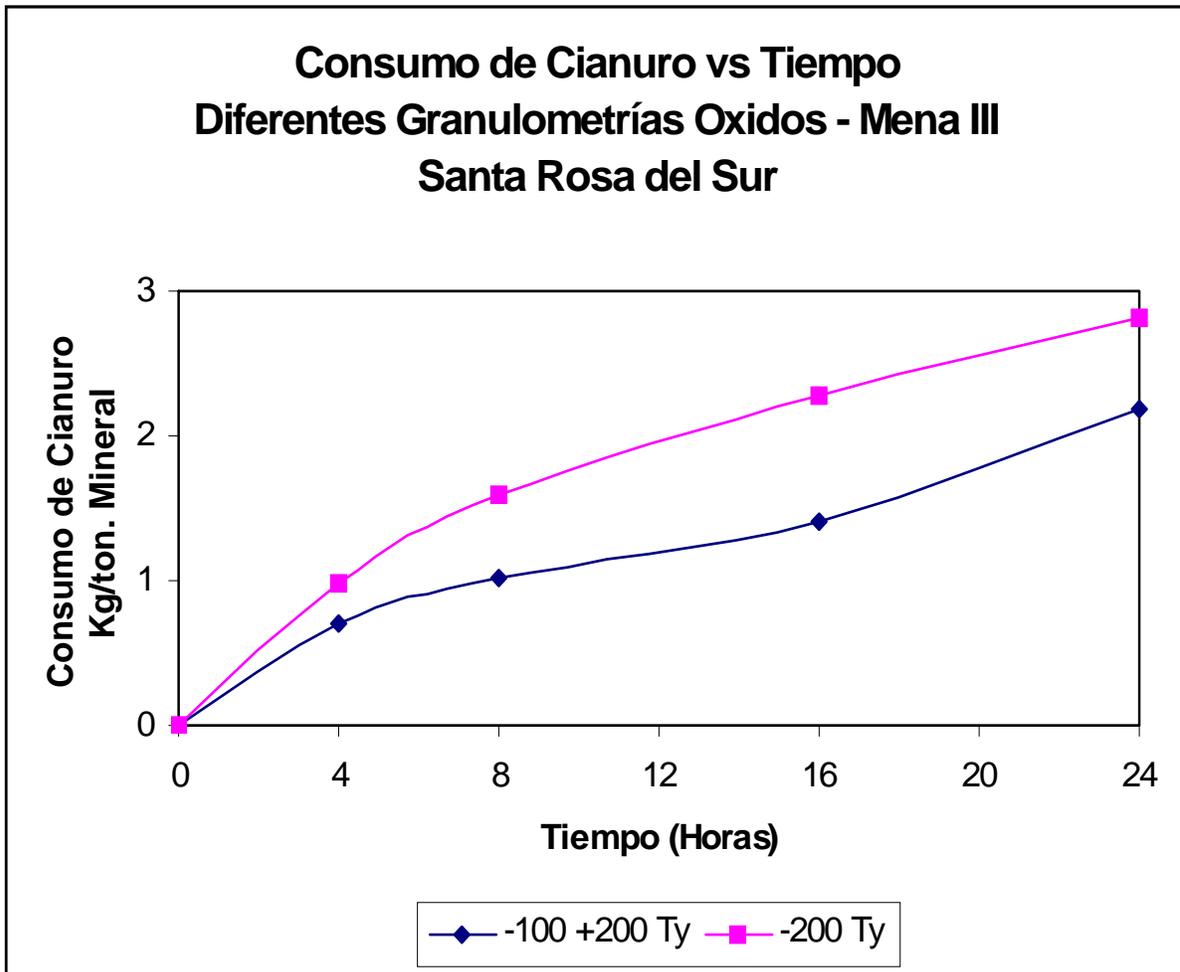
**Gráfico 32. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito I – Oxidos.**



**Tabla 28. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito III – Oxidos.**

Consumo de Cianuro – Kg/ton,Mineral		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	0.7	0.99
8	1.01	1.59
16	1.41	2.28
24	2.19	2.82

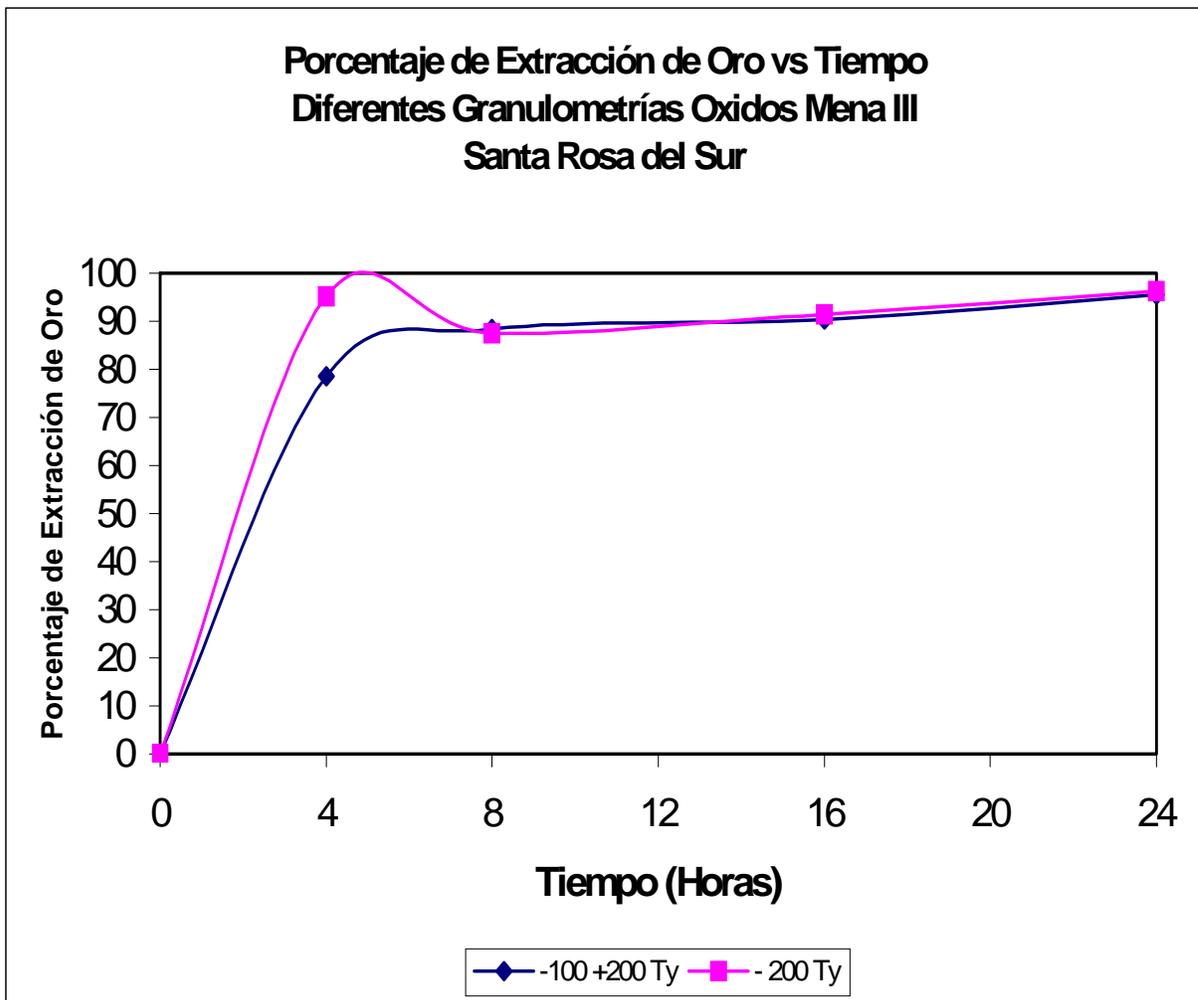
**Gráfico 33. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito III – Oxidos.**



**Tabla 29. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito III – Oxidos.**

Porcentaje de Extracción de Oro (%)		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	78.55	95.13
8	88.38	87.46
16	90.33	91.51
24	95.57	96.23

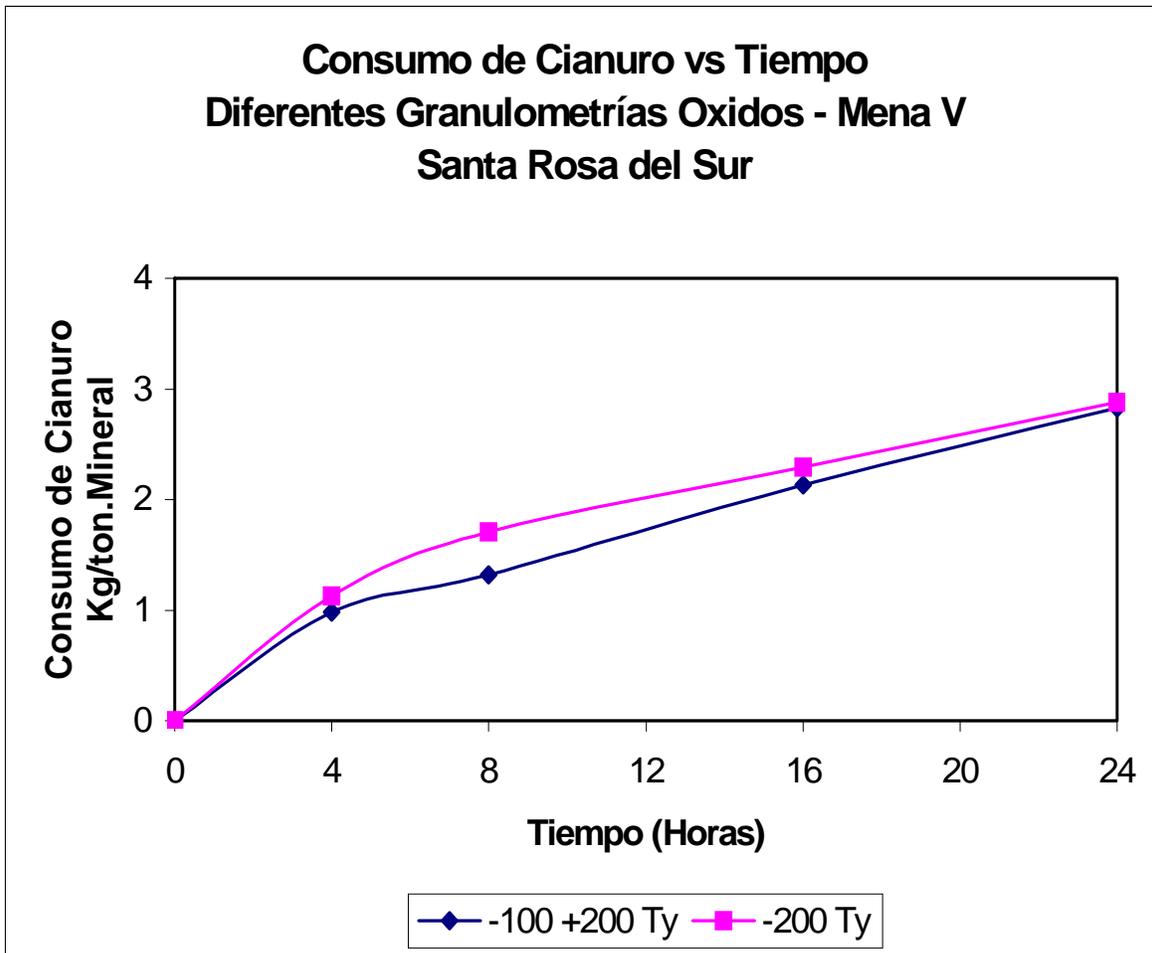
**Gráfico 34. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito III – Oxidos.**



**Tabla 30. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito V – Oxidos.**

Consumo de Cianuro – Kg/ton. Mineral		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	0.98	1.13
8	1.32	1.71
16	2.13	2.29
24	2.83	2.88

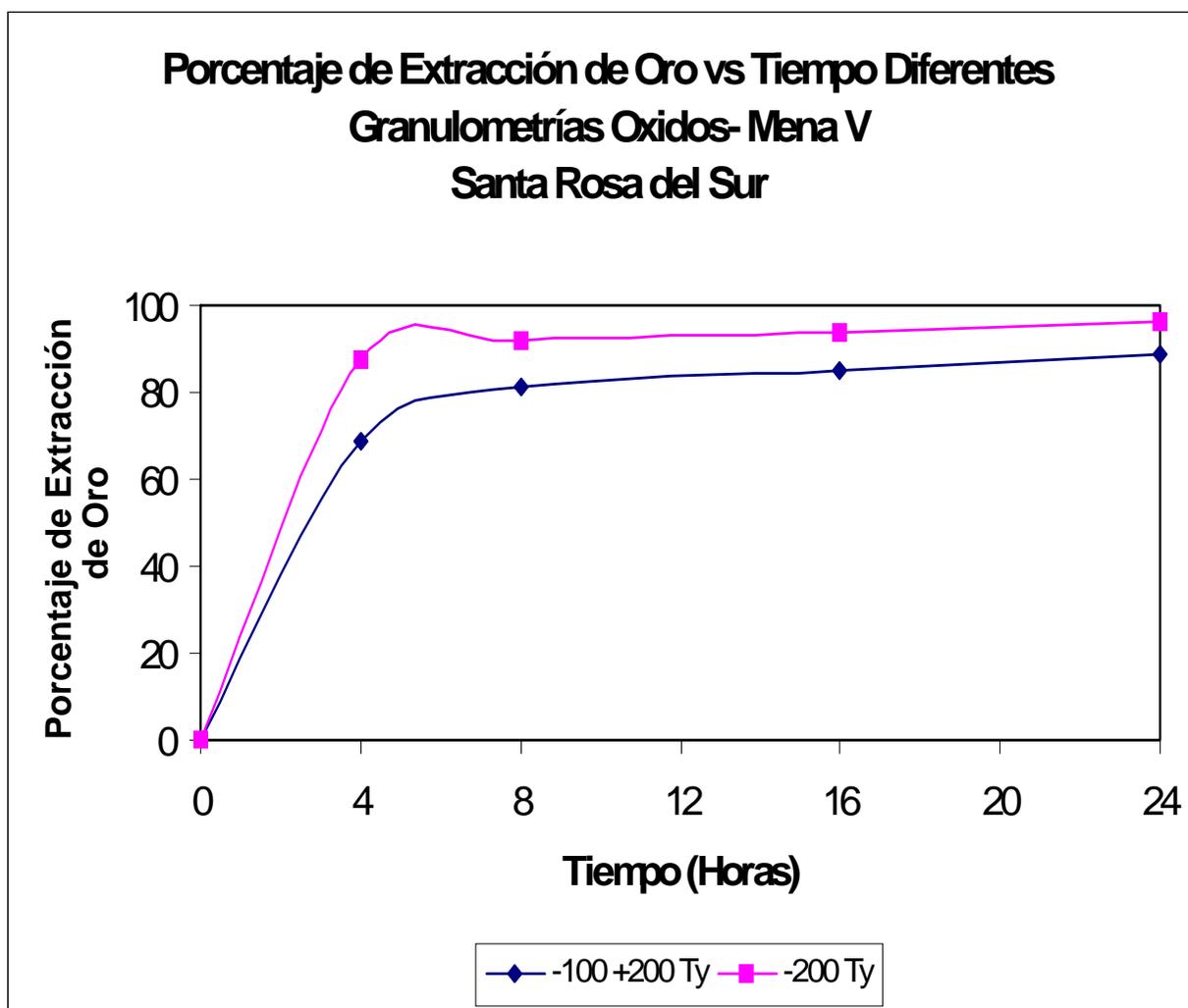
**Gráfico 35. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito V – Oxidos.**



**Tabla 31. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito V – Oxidos.**

Porcentaje de Extracción de Oro (%)		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	68.69	87.67
8	81.17	91.65
16	84.71	93.64
24	88.48	96.42

**Gráfico 36. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito V – Oxidos.**

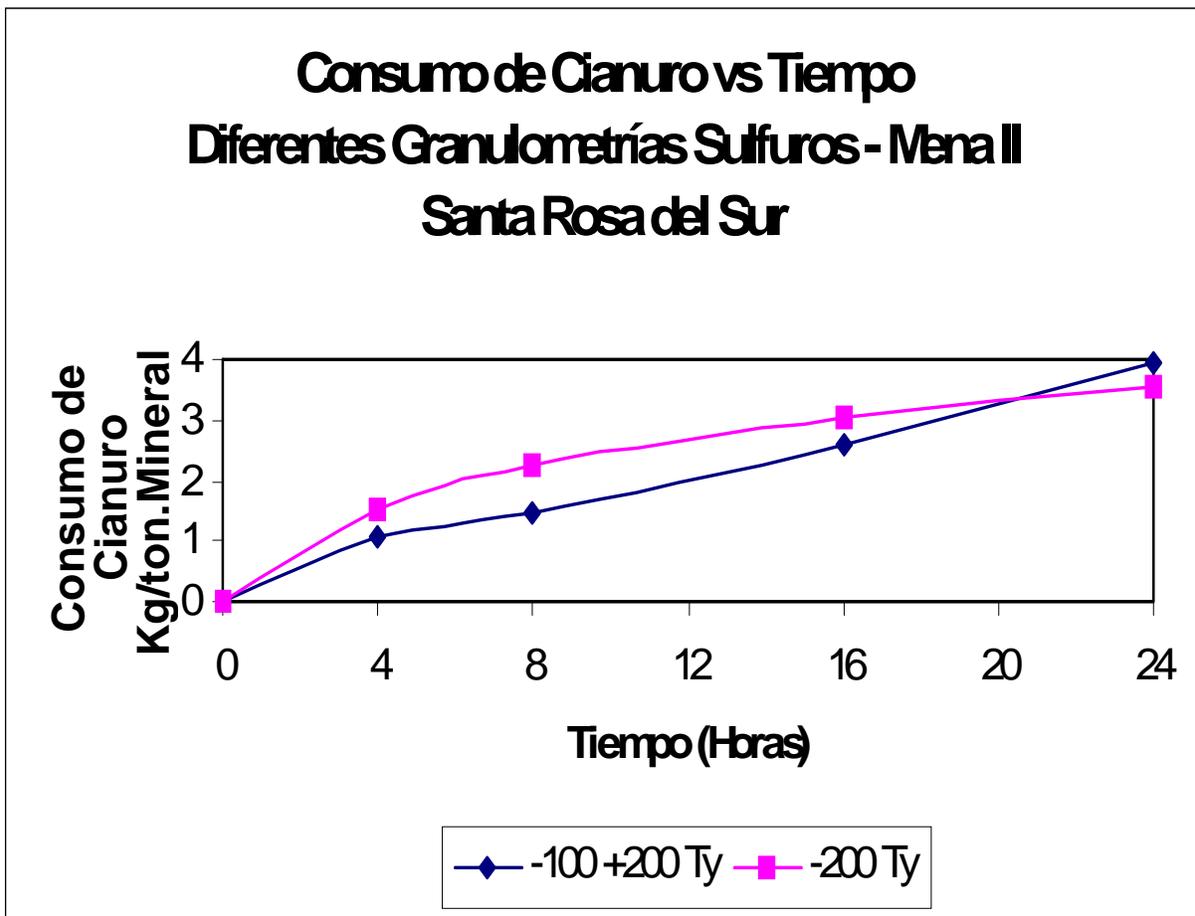


5.1.2.4 Cianuración del composito de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).

Tabla 32. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito II – Sulfuros.

Consumo de Cianuro – Kg/ Ton. Mineral		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	1.09	1.51
8	1.45	2.26
16	2.6	3.06
24	3.94	3.54

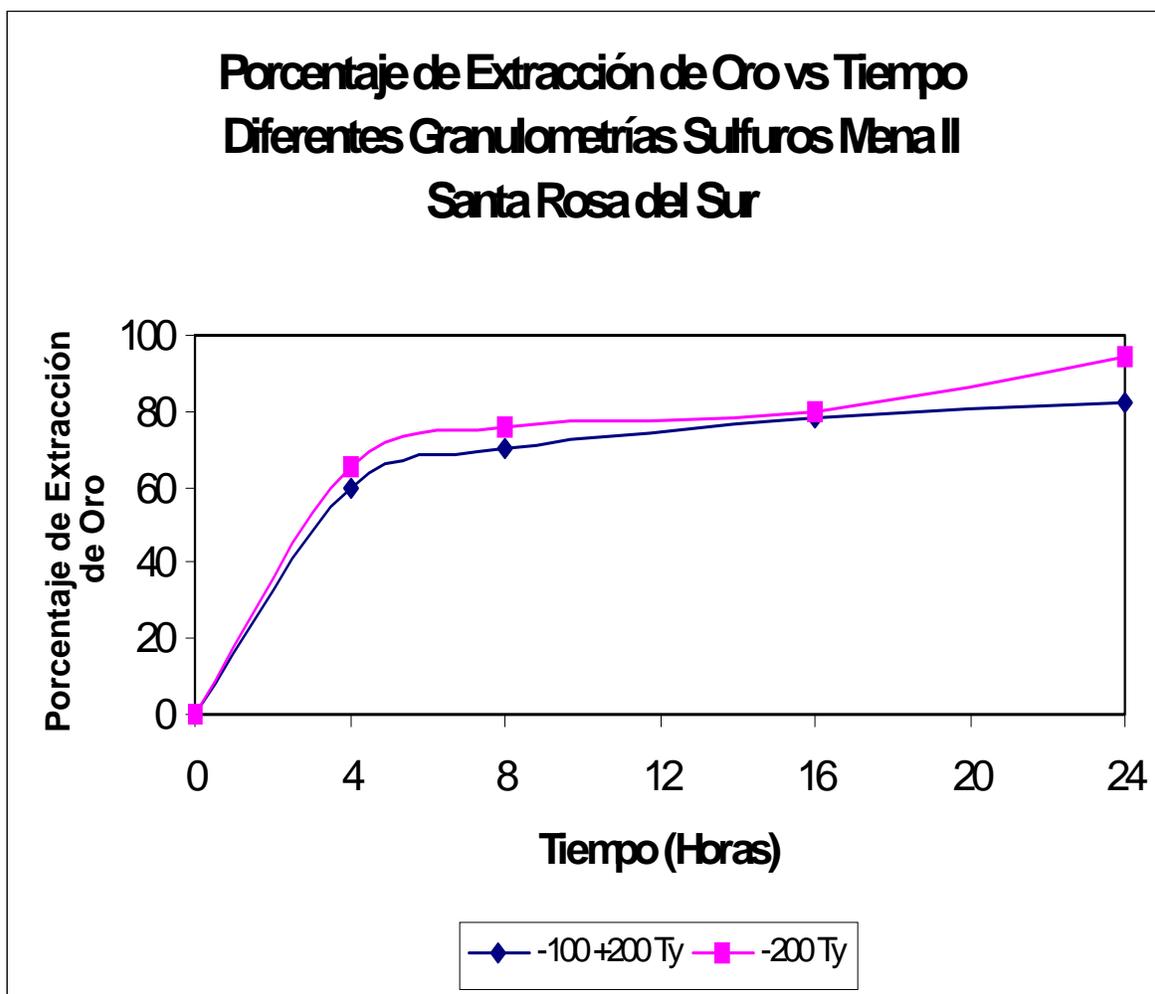
Gráfico 37. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito II – Sulfuros.



**Tabla 33. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito II – Sulfuros.**

Porcentaje de Extracción de Oro		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	59.9	65.36
8	70.42	76.11
16	78.09	79.98
24	82.44	94.55

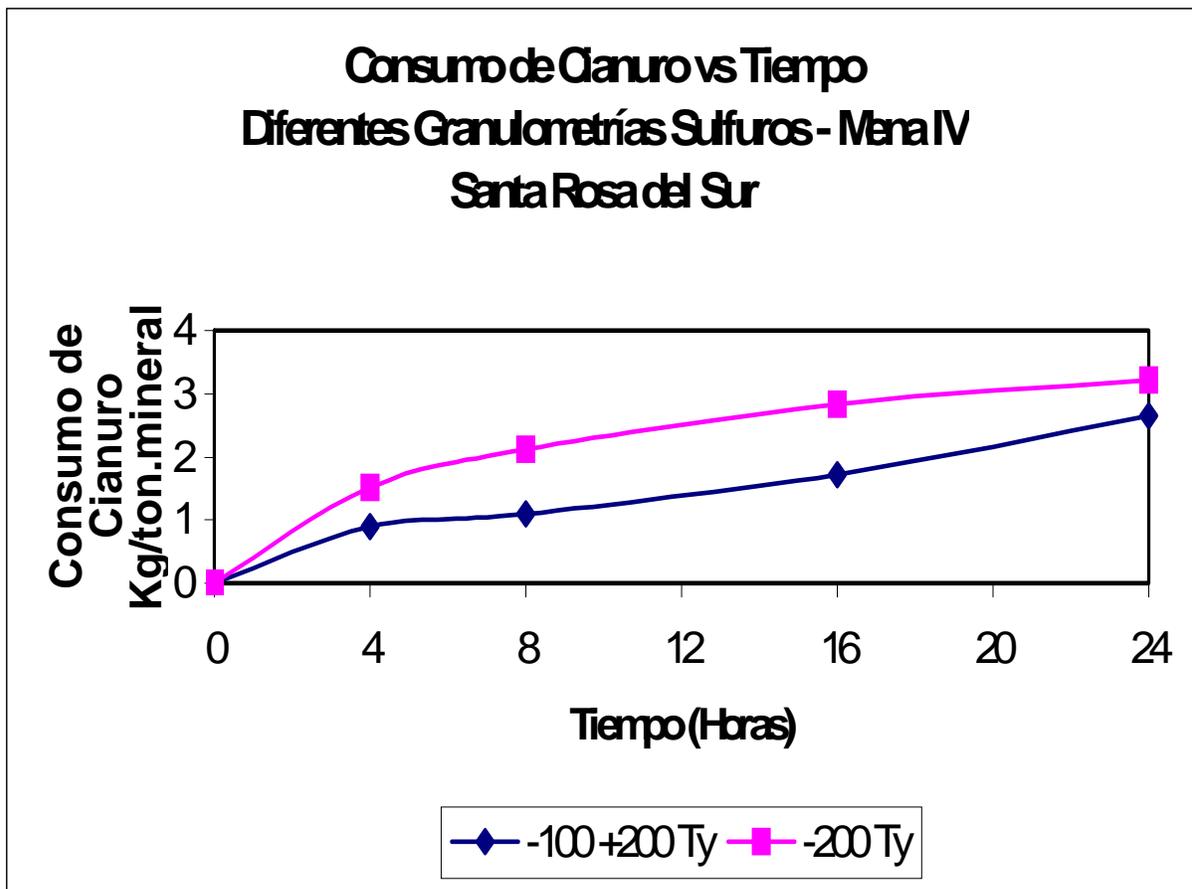
**Gráfico 38. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito II – Sulfuros.**



**Tabla 34. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito IV – Sulfuros.**

Consumo de Cianuro – Kg/ton.Mineral		
Tiempo (Horas)	-100 +200Ty	-200 Ty
0	0	0
4	0.9	1.52
8	1.09	2.12
16	1.71	2.84
24	2.64	3.21

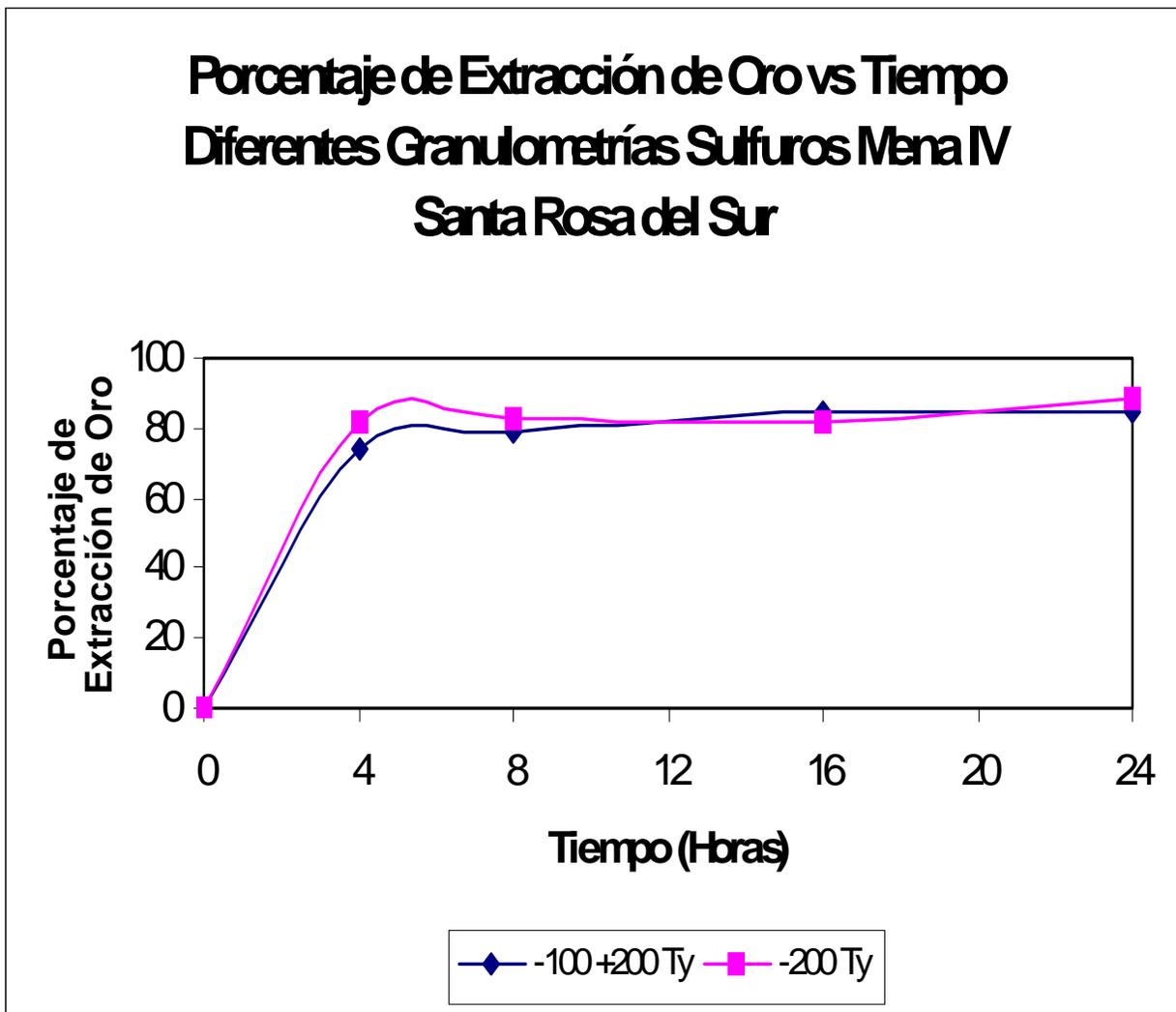
**Gráfico 39. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito IV – Sulfuros.**



**Tabla 35. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito IV – Sulfuros.**

Porcentaje de Extracción de Oro (%)		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	73.8	81.47
8	78.8	82.51
16	84.23	81.34
24	84.68	88.62

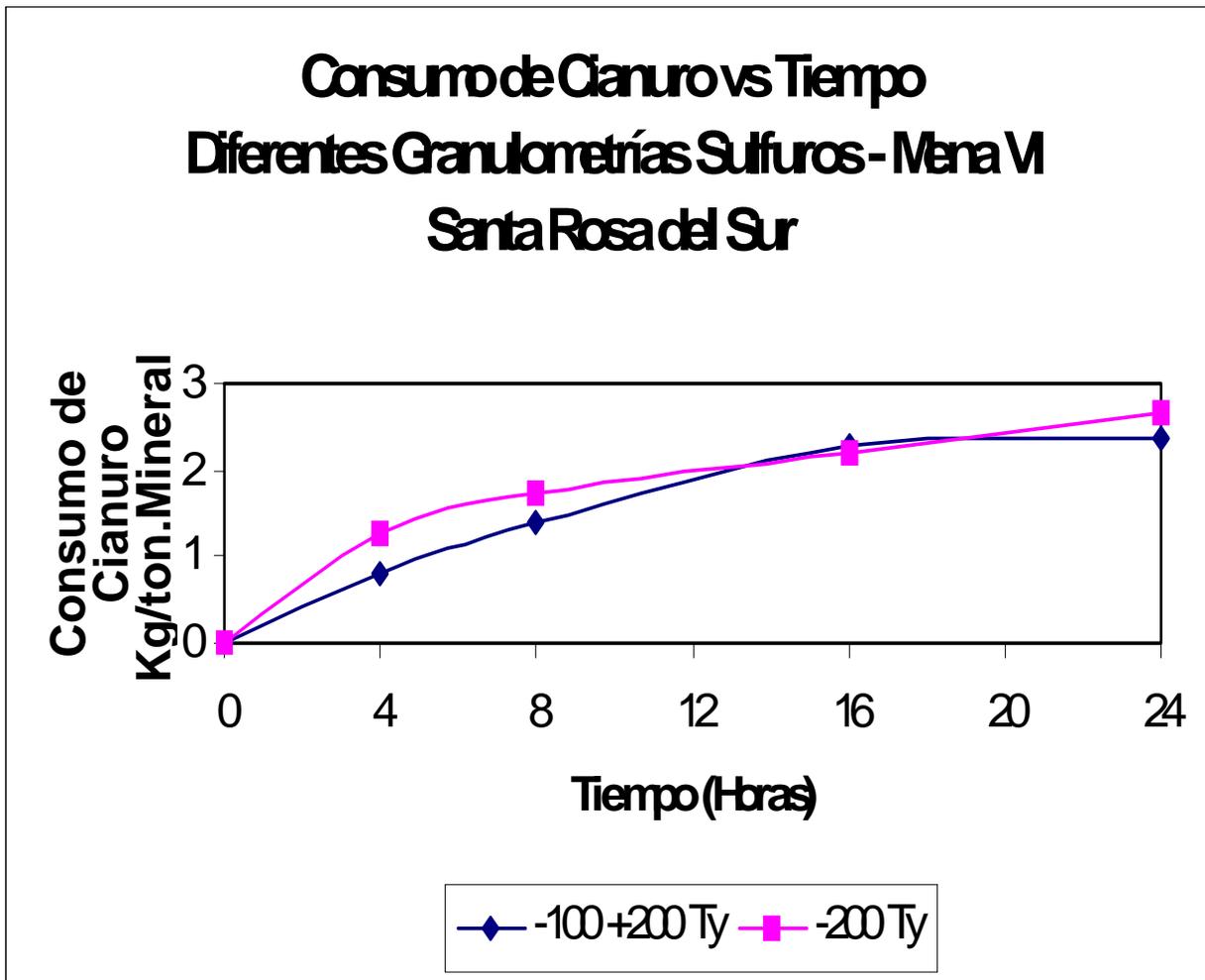
**Gráfico 40. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito IV – Sulfuros.**



**Tabla 36. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito VI – Sulfuros.**

Consumo de Cianuro – Kg / ton. Mineral		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	0.8	1.28
8	1.39	1.73
16	2.3	2.21
24	2.38	2.65

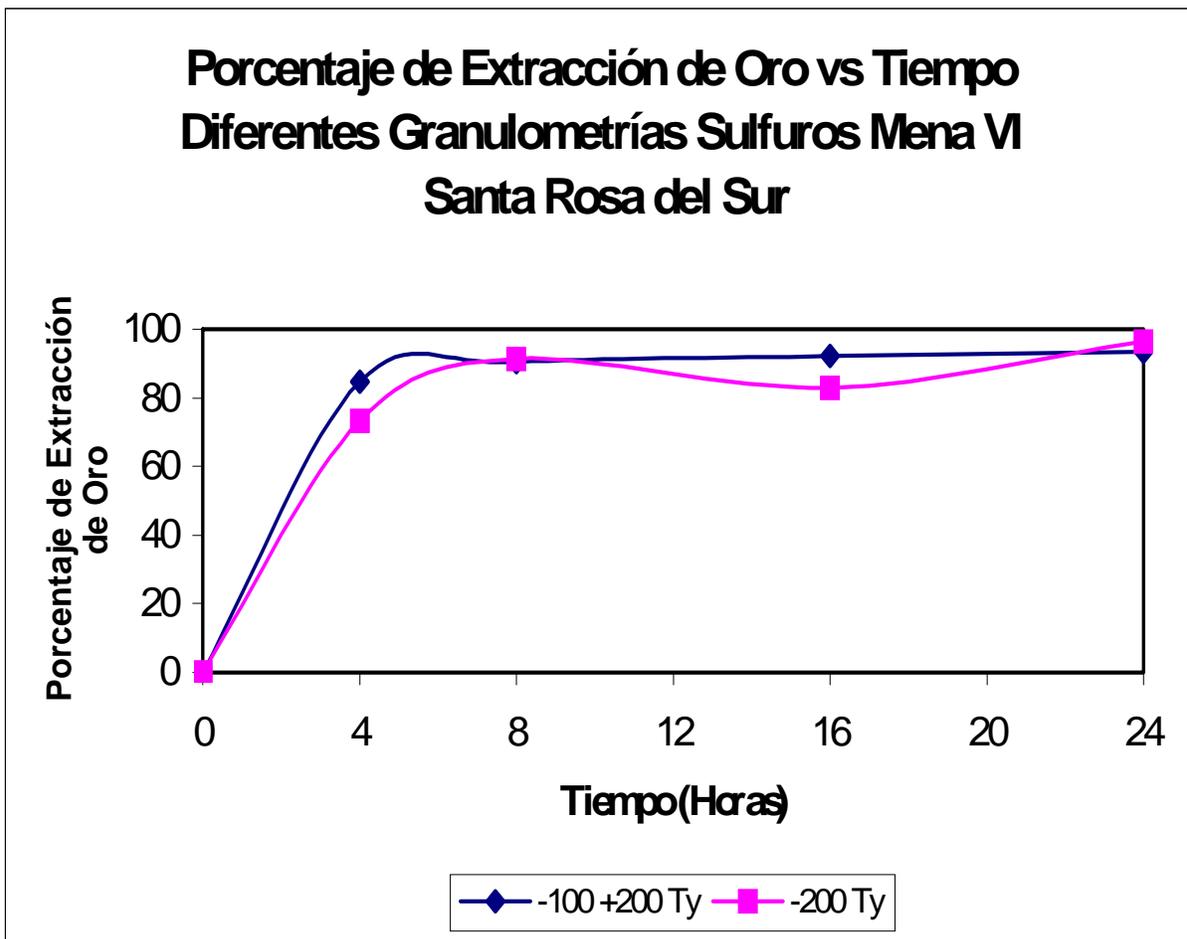
**Gráfico 41. Consumo de cianuro vs tiempo. Diferentes granulometrías.
Composito VI – Sulfuros.**



**Tabla 37. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito VI – Sulfuros.**

Porcentaje de Extracción de Oro (%)		
Tiempo (Horas)	-100 +200 Ty	-200 Ty
0	0	0
4	84.57	73.13
8	90.49	91.44
16	92.05	82.86
24	93.54	96.36

**Gráfico 42. Porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Diferentes granulometrías. Composito VI – Sulfuros.**



5.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.2.1 Análisis de la mineralogía de las muestras de los diferentes compositos. El análisis mineralógico de las diferentes muestras individuales a partir de las cuales se conformó cada tipo de mena o composito, es supremamente importante debido a que establece los diferentes minerales presentes en estas muestras, cuales constituyen ganga, cuales constituyen mena y la presencia de minerales de alteración en caso de existir, las posibles asociaciones que estos minerales presentan, su morfología y textura característica, de forma tal que al obtenerse los aspectos comunes de cada muestra en cuanto a mineralogía, se haya podido proponer la conformación de un composito o tipo de mena que reúna y represente a todas y cada una de las muestras que lo conforman.

En la conformación de los tipos geológicos de mena, los criterios utilizados fueron la composición mineralógica de las muestras, agrupadas esencialmente en grupos de muestras piriticas, polisulfuradas, altas en óxidos y muestras altas en sulfuros; otro de los criterios consistió en la relación entre la mineralogía y el tenor de oro de la muestra, al observarse inicialmente que muestras con alto porcentaje de óxidos presentaba tenor de oro menor a aquellas muestras con altos contenidos de sulfuros.

Para conformar cada tipo geológico de mena, pese a que en unas se utilizaron mas muestras de determinadas minas que en otras, debe aclararse tal como se expresó en la metodología experimental, que el porcentaje en peso de cada muestra dentro del composito es similar, lo cual nos permite asegurar que cada muestra tiene la misma influencia en cuanto a características dentro de la conformación del tipo de mena.

5.2.1.1 Análisis de la mineralogía de las muestras del composito de Vetas. Analizando las muestras correspondiente al composito de Vetas (tabla 7), puede notarse que en su mayoría las muestras presentan una estructura maciza taxítica y masiva y se complementan con las observaciones que hacen referencia a la presencia de venas de sulfuros y evidencias de pirita en ellas; también se pone de manifiesto en estas observaciones la existencia de

gran cantidad de minerales arcillosos como caolinitas, y algunos silicatos tipo plagioclasas y feldespatos, en conjunto con la existencia de minerales de ganga como cuarzo y granito.

Estas afirmaciones, también se ven reflejadas en la tabla 8, donde el signo más (+) enfrente de cada muestra hace referencia a la abundancia del mineral en estudio, encontrándose en la mayoría de las muestras presencia abundante de minerales como plagioclasa y cuarzo; por otra parte entre los minerales metálicos se encontró abundante pirita y se determinó calcopirita y galena solo en algunas de las muestras, lo cual nos indica el carácter sulfurado (esencialmente pirita) de las muestras que conforman el composito de Vetas; otro aspecto es la abundante presencia de minerales de alteración como sericita y óxidos de hierro como la limonita, sumados a la presencia de arcillas tipo caolín.

5.2.1.2 Análisis de la mineralogía de las muestras del composito de California. En cuanto a la mineralogía de muestras del composito de California, si se analiza la información consignada en la tabla 9, puede notarse que en su mayoría las muestras presentan una estructura maciza - taxítica o maciza – masiva, al complementar esta información con las observaciones, se encuentra presencia de patinas de óxidos de hierro y alteraciones de sulfuros, altos contenidos de feldespatos alterados y venas de sulfuros; también ponen de manifiesto las observaciones, la existencia de gran cantidad de minerales de alteración tipo óxidos de hierro como limonita, goethita y hematita, hay evidencia de presencia de minerales arcillosos y minerales tipo sericita y feldespatos, estos junto a la existencia de minerales de ganga, esencialmente cuarzo.

La tabla 10 exhibe la abundancia de los diversos minerales presentes en las muestras en estudio, encontrándose en la mayoría de ellas presencia abundante de minerales como plagioclasas y cuarzo por un lado, y por otra parte entre los minerales metálicos, abundante pirita, calcopirita y galena en cada una de las muestras, lo cual nos indica el carácter polisulfurado de las muestras que conforman el composito de California; otro aspecto es la abundante presencia de minerales oxidados u óxidos de hierro como la limonita, hematita y goethita, la presencia de arcillas tipo caolín y sericita es más reducida en las muestras de

California que en el caso de las muestras de Vetas, pero la mayor parte de la ganga para estas muestras es cuarzo, el cual pudo ser identificado en cada una de las muestras.

5.2.1.3 Análisis de la mineralogía de las muestras de los compositos de Santa Rosa del Sur (Oxidos y sulfuros). Sobre las diferentes muestras que conforman los composito de Santa Rosa del Sur, la mayor distinción se presentó al identificarse dos grupos diferentes de muestras, aquellas compuestas en su mayoría por minerales parcialmente alterados y abundantes óxidos de hierro y arcillas, y otras muestras compuestas por sulfuros polimetálicos y cuarzo. En el composito de Santa Rosa del Sur, se encontró que aquellas muestras correspondientes al grupo de minerales oxidados y arcillas presentan un tenor de oro menor a aquellas muestras correspondientes a los sulfuros polimetálicos.

5.2.1.3.1 Análisis de la mineralogía de las muestras del composito de óxidos de Santa Rosa del Sur. Al analizar la información mineralógica de las muestras del composito de Santa Rosa del Sur (Oxidos), es evidente que la mayoría de muestras corresponde a roca ígnea altamente mineralizada de aspecto marrón y textura granular, según se consigna en la caracterización mineralógica de estas muestras (tabla 12).

En la caracterización mineralógica de las muestras correspondiente al composito de Santa Rosa del Sur – Oxidos (tabla 12), puede notarse que en su mayoría las muestras están compuestas esencialmente de óxidos de hierro y manganeso (hematita y goethita), con abundancia de feldespatos (ortoclasa y plagioclasa) casi en cada una de las muestras, así como la presencia de minerales arcillosos entre ellos caolinita y sericita, la presencia de sulfuros en estas muestras fue prácticamente nula salvo en algunas muestras donde se determinó presencia escasa de pirita.

En cuanto a la caracterización mineralógica de los compositos que conforman el composito de Santa Rosa del Sur – Oxidos (numeral 4.1.3.1.1), puede extraerse de esta información que el oro presente en las muestras de este composito corresponde a oro libre o tipo electrum de tamaño muy fino y asociado a pirita cuando este mineral se encuentra presente,

preferencialmente a los óxidos de hierro como hematita y goethita, lo cual refleja el carácter de minerales alterados y oxidados que conforman este composito. Aunque hay abundante presencia de minerales arcillosos (sericita y caolinita), en los estudios de microscopía para determinar la mineralogía de estos composites, no se evidenció asociación del oro a estos minerales (arcillas); sin embargo la preocupación es respecto a los inconvenientes que estos minerales arcillosos puedan causar durante el proceso de cianuración de este composito debido al efecto preg - robbing (atrapamiento) de las arcillas sobre las partículas finas de oro.

5.2.1.3.2 Análisis de la mineralogía de las muestras del composito de sulfuros de Santa Rosa del Sur. Sobre el composito de sulfuros, un análisis de la información mineralógica de las muestras del composito de Santa Rosa del Sur (Sulfuros), evidencia que la mayoría de muestras corresponde a un agregado granular de cuarzo y sulfuros polimetálicos, de aspecto marrón y mineralizado.

En la caracterización mineralógica de las muestras de este composito (Santa Rosa del Sur – Sulfuros) consignada en las tablas 13 y 14, puede notarse que en su mayoría las muestras presentan tenor de oro mayor a las muestras del composito de óxidos y están compuestas esencialmente de sulfuros metálicos (pirita, calcopirita y galena), con presencia aunque no en abundancia de óxidos de hierro (limonita, hematita y goethita) en algunas de las muestras; la presencia de minerales arcillosos entre ellos caolinita y sericita, es más bien escasa a nula salvo en algunas excepciones, pero si se observo la presencia de feldespatos (plagioclasa) totalmente alterados en estas muestras.

En cuanto a la caracterización mineralógica de los composites que conforman el composito de Santa Rosa del Sur – Sulfuros (numeral 4.1.3.2.1), puede extractarse de esta información que el oro presente en las muestras de este composito corresponde a oro libre o tipo electrum de tamaño muy fino y asociado a los óxidos de hierro como hematita y goethita y más bien poca o nula asociación a pirita a pesar de ser un composito sulfurado, lo cual posiblemente facilite su aprovechamiento. Aunque hay abundante presencia de cuarzo y pirita, no se evidenció asociación del oro a estos minerales, lo cual muy posiblemente

redunde en la facilidad de extracción del oro de este tipo de composito durante el proceso de cianuración, si el oro hubiese estado asociado a los sulfuros, muy posiblemente se presentarían dificultades durante su extracción y los minerales del composito tenderían a altos consumos de cianuro durante su tratamiento.

5.2.2 Análisis de la mineralogía de cada composito (tipo de mena).

5.2.2.1 Análisis de la mineralogía del composito de Vetas. Un análisis de la información mineralógica del composito de Vetas, revela que esta mena está compuesta esencialmente de pirita en porcentajes de 12 %, acompañada de esfalerita y galena como minerales de mena, hay presencia de minerales de alteración (sericita, goethita y hematita), que en conjunto con los minerales de mena suman alrededor de 34 % del composito. La ganga está compuesta principalmente de cuarzo (SiO_2), plagioclasa (feldespatos de sodio y calcio) y biotita (grupo de las micas).

En la mayor parte de muestras de este composito no se encontró partículas de oro, la pirita se encuentra zonificada como cristales euhedrales y subhedrales y rellenando fracturas, con textura hipidiomórfica.

Debido a que el tamaño promedio de las partículas de sulfuros sobre los que se encuentra asociado el oro, principalmente pirita es relativamente bajo ($69.7 \mu\text{m}$) y que las partículas de oro en ellos son muy finas, se prevé que el mineral debe ser sometido a conminución fina para luego tratar este oro mediante procesos de cianuración, muy posiblemente y debido a su finura, no todo el oro presente y asociado a los sulfuros y minerales de alteración se encuentre liberado luego de los procesos de conminución, este hecho hace pensar que no todo el porcentaje de oro pueda ser extraído de los minerales a los que se encuentra asociado.

Un factor a tener en cuenta en el procesamiento mediante cianuración de este tipo de minerales es la presencia de minerales cianicidas y consumidores de oxígeno; como ya se

había mencionado, la mena es esencialmente piritica (FeS_2), con presencia de algunos otros sulfuros como esfalerita (ZnS) y galena (PbS), este tipo de minerales tiende a reducir la concentración del ion cianuro en la solución y retardar la cinética de extracción del oro. Hay que anotar que debido a la mineralización y alteración de este tipo de mena, muy posiblemente se tenga influencia de las arcillas como adsorbedores de oro de la solución rica.

Comparando el composito de Vetas con el composito de California, puede decirse que el composito de Vetas es netamente piritico pero con mayor abundancia de minerales de alteración (muscovita, sericita, hematita, goethita y calcita), lo cual le confiere mayor grado de mineralización con respecto al composito de California. Aunque ambos composito poseen como mineral de ganga el cuarzo, este tipo de minerales es más variado en el composito de Vetas, conformado por cuarzo, plagioclasa y biotita, lo cual permite suponer que el composito de Vetas tendrá mejor comportamiento respecto a la extracción de oro en cianuración que el esperado para el composito de California.

5.2.2.2 Análisis de la mineralogía del composito de California. El análisis de la información mineralógica del composito de California, muestra que esta mena está compuesta esencialmente de minerales polisulfurados (pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), esfalerita (ZnS) y galena (PbS)) en porcentajes de 10 % como principales minerales de mena, hay presencia de minerales de alteración (sericita), que en conjunto con los minerales de mena suman alrededor de 40 % del composito; el mineral de ganga de este composito es principalmente cuarzo (SiO_2).

En la mayoría de muestras de este composito no se encontró partículas de oro, la pirita y la esfalerita se encuentran en forma de agregados policristalinos con textura hipidiomorfica y el cuarzo que aparece rellenando fracturas presenta textura brechada y en algunos casos anhedral tipo Buck grueso y mosaico.

El tamaño promedio de las partículas de polisulfuros sobre los que se encuentra asociado el oro, es relativamente bajo (80.3 μm) y las partículas de oro en ellos son muy finas, por tanto, se considera que el mineral debe ser sometido a conminución fina para luego tratar este oro mediante procesos de cianuración, muy posiblemente y debido a su finura, no todo el oro presente y asociado a los sulfuros vaya a ser liberado por los procesos de conminución, este hecho hace pensar que no todo el porcentaje de oro pueda ser extraído de los minerales a los que se encuentra asociado.

Al igual que en el caso del composito de Vetas, la presencia de minerales cianicidas y consumidores de oxígeno en este composito es un factor a tener en cuenta en el procesamiento mediante cianuración de este tipo de minerales; como ya se había mencionado, la presencia de alta cantidad de sulfuros metálicos en esta mena tiende a reducir la concentración del ion cianuro en la solución y retardar la cinética de extracción del oro. Sobre esta mena y debido a la baja mineralización y alteración que presenta, muy posiblemente no se tenga influencia de minerales arcillosos como adsorbedores de oro de la solución rica.

Comparando el composito de California con el composito de Vetas, puede decirse que el composito de California es la mezcla de varios sulfuros metálicos con poca presencia de minerales de alteración (esencialmente sericita), lo cual le confiere bajo grado de mineralización con respecto al composito de Vetas. Aunque ambos composito poseen como mineral de ganga el cuarzo, en el composito de California no se reporta ninguna otra asociación entre los minerales de ganga, lo cual permite suponer que el composito de California tendrá un comportamiento relativamente bajo a medio respecto a la extracción de oro en los procesos de cianuración.

5.2.2.3 Análisis de la mineralogía del composito de Santa Rosa del Sur (Oxidos). Este tipo de mena, conformada por los compositos 1, 3 y 5 de las muestras de Santa Rosa del Sur, muestra en los estudios de caracterización mineralógica que le fueron realizados, que entre los principales constituyentes de los minerales de mena, está compuesta

esencialmente por oro tipo electrum y nativo, con porcentajes de pirita (FeS_2) muy bajos y el oro poco asociado a este mineral; hay fuerte presencia de minerales de alteración, entre ellos óxidos de hierro (hematita y goethita) y rutilo, que en conjunto con los minerales de mena suman alrededor de 30 % del composito; el mineral de ganga de este composito está principalmente constituido de cuarzo (SiO_2) alrededor de 50 % y mica (muscovita e illita) en porcentajes cercanos a 20 %.

En la mayoría de muestras de este composito, se observó asociación de partículas de oro los minerales de alteración y muy baja asociación a pirita, no se presentó evidencia de partículas de oro asociadas a cuarzo o a mica; la textura característica de este composito corresponde a una textura fanerítica, con granos de cuarzo y feldespato equigranulares parcialmente alargados y con intensa alteración fílica.

En este composito, las partículas de oro asociadas a los minerales de alteración y mena son muy finas, por tanto se considera que el mineral debe ser sometido a conminución fina para luego tratar este oro mediante procesos de cianuración, las muestras de esta mena presentan alto estado de mineralización y exhiben un proceso avanzado de alteración, por lo cual se considera que este composito debe tener una respuesta favorable a los procesos de recuperación de oro, debido que su liberación podría ser mayor y además porque la mena presenta mayor porosidad, beneficiando el contacto entre el cianuro y las partículas de oro.

Un posible obstáculo o desventaja que podría presentarse en el procesamiento, es que debido a la alta mineralización de esta mena y su estado de alteración, las arcillas afectan negativamente la sedimentación, que se presente el efecto preg – robbing sobre el oro de la solución rica o los óxidos metálicos recubran las partículas de oro, produciendo un efecto refractario al proceso de cianuración de estos minerales.

5.2.2.4 Análisis de la mineralogía del composito de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).

Este tipo de mena, conformada por los compositos 2, 4 y 6 de las muestras de Santa Rosa del Sur, muestra en los estudios de caracterización mineralógica que le fueron realizados,

que entre los principales constituyentes de los minerales de mena, está compuesta esencialmente por oro tipo electrum y se encuentra libre y asociado a óxidos de hierro y en menor proporción a pirita (FeS_2) presente en un 23 %, galena, esfalerita y calcopirita; la presencia de minerales de alteración es mucho menor que en el composito de óxidos pero se presentan algunos minerales de alteración, entre ellos óxidos de hierro (hematita y goethita) que en conjunto con los minerales de mena suman alrededor de 35 % del composito; el mineral de ganga de este composito está principalmente constituido de cuarzo (SiO_2) alrededor de 50 % y mica en porcentajes cercanos a 15 %, siendo menor el porcentaje de arcillas en esta mena.

En la mayoría de muestras de este composito, se observó asociación de partículas de oro a los minerales de alteración y en menor manera a la pirita, no se presentó evidencia de partículas de oro asociadas a cuarzo o a mica; la textura característica de este composito corresponde a una textura granular del cuarzo y la pirita, con gran variedad de texturas de remplazamiento, exsolución, fracturamiento y relleno.

Las partículas de oro en este composito están asociadas a los minerales de alteración y mena y son de tamaño muy fino, por lo que se considera que el mineral debe ser sometido a conminución fina para luego tratar este oro mediante procesos de cianuración, las muestras de esta mena presentan mayor cantidad de minerales de mena que las muestras del composito de óxidos, pero su estado de mineralización y proceso de alteración no es tan avanzado como el de este (composito óxidos), por lo cual se considera que este composito (sulfuros), aun cuando debe tener una respuesta favorable a los procesos de recuperación de oro, esta respuesta podría no ser tan buena como la esperada para el composito de óxidos, debido a que presentará menor porosidad y menor grado de contacto entre el cianuro y las partículas de oro, además que el grado de liberación al estar las partículas de oro más asociadas a los sulfuros muy posiblemente sea menor.

Para este composito (Sulfuros), la presencia de minerales cianicidas (sulfuro de hierro, cobre, plomo, zinc. Etc.) y consumidores de oxígeno es un factor a tener en cuenta en el procesamiento mediante cianuración de este tipo de minerales. Tal como se mencionó

anteriormente, la presencia de estos sulfuros metálicos en la mena tiende a reducir la concentración del ion cianuro en la solución y retardar la cinética de extracción del oro.

Sin embargo, debido a que ambos composito (Sulfuros y Oxidos) presentan muy buena mineralización y alteración, es muy probable que la presencia de sulfuros metálicos en el composito de sulfuros no tenga tanta influencia como se esperaría que pudiese tenerla sobre el proceso de extracción de oro de estos minerales.

5.2.3 Análisis de resultados de las pruebas de lixiviación diagnostica. Con el objetivo de corroborar la información de los estudios mineralógicos sobre la determinación de la forma en que el oro se encuentra asociado a los diversos minerales presentes en cada composito, se procedió a realizar las pruebas de lixiviación diagnostica.

5.2.3.1 Análisis de la lixiviación diagnostica del composito de Vetas. En la mena correspondiente al composito de Vetas, la mayor proporción de oro presente se encuentra como oro libre expuesto, seguido de la proporción de oro asociado a silicatos, tal como se observa en la gráfica correspondiente (numeral 5.1.1.1); la otra fracción de oro presente en este composito corresponde al oro asociado a los sulfuros, principalmente piritita, con presencia de esfalerita y galena, aunque la característica de este mineral es ser esencialmente piritico.

Aun cuando se esperaba encontrar oro asociado en gran medida a los minerales de alteración (sericita, goethita y hematita), los resultados de la lixiviación diagnostica hacen concluir que el posible oro asociado a estos minerales pudo ser liberado mediante los procesos de conminución, lo cual muestra un alto grado de liberación para las partículas del metal precioso asociado a los óxidos de hierro, no sucediendo así para el oro asociado a los silicatos.

La mineralogía de este composito señala que hay una gran presencia de minerales de ganga (cuarzo, plagioclasa y biotita) a los cuales podría estar asociado el oro, sin embargo las

pruebas de lixiviación diagnóstica no indican claramente con cual de estos minerales se presenta la mayor asociación, lo que se puede extraer de esta información es el hecho que será muy difícil recuperar mediante cianuración convencional este porcentaje de oro asociado a silicatos.

Debido a que este tipo de mena de Vetas, presenta mayor mineralización y alteración que el composito de California, es probable que parte del oro que se reporta como asociado a los silicatos haya sido atrapado por las arcillas presentes entre los minerales de ganga de este composito o que las partículas de oro hayan sido recubiertas por capas de estos minerales.

5.2.3.2 Análisis de la lixiviación diagnóstica del composito de California. En la mena correspondiente al composito de California, la mayor proporción de oro presente se encuentra como oro libre o expuesto, pero su proporción es muy cercana a la proporción de oro asociado a silicatos, lo que evidencia la gran influencia del oro asociado a los silicatos en el procesamiento de este tipo de mena, estos porcentajes, se observan en la gráfica correspondiente (numeral 5.1.1.2); la otra fracción de oro presente en este composito corresponde al oro asociado a los sulfuros metálicos presentes en esta mena, principalmente pirita, calcopirita, esfalerita y galena, siendo el composito catalogado como mineral polisulfurado.

En este composito, la expectativa de encontrar oro asociado en gran medida a los minerales de alteración (esencialmente sericita) es muy baja, debido en gran parte a la poca mineralización y alteración de esta mena. Por otra parte, los resultados de la lixiviación diagnóstica hacen concluir que el posible oro asociado a estos minerales pudo ser liberado mediante los procesos de conminución con lo cual se llega a pensar que la asociación de oro a estos minerales de alteración es muy baja.

La mineralogía de este composito señala que hay una gran presencia de minerales de ganga (esencialmente cuarzo) al cual podría estar asociado el oro, en las pruebas de lixiviación diagnóstica, se indican claramente que a este silicato se presenta un gran porcentaje de la

asociación del metal precioso, con lo cual se puede afirmar que el composito presentará solamente extracción mediante cianuración hasta cierto porcentaje (oro libre y polisulfuros), para luego estancarse y no permitir incremento en el porcentaje de extracción de oro mediante cianuración convencional del porcentaje de oro asociado a silicatos.

Este tipo de mena de California, presenta menor mineralización y alteración que el composito de Vetas, no hay mucha presencia en el de minerales de alteración o arcillas, prácticamente toda la ganga está compuesta por cuarzo, por tanto es muy probable que no haya influencia de arcillas u óxidos en el procesamiento de este composito y que el oro que se reporta como asociado a los silicatos no pueda ser extraído de estos minerales.

5.2.3.3 Análisis de la lixiviación diagnostica del composito de óxidos de Santa Rosa del Sur (Composito de Oxidos). Para el composito de óxidos de la mena de Santa Rosa del Sur, la mayor proporción de oro presente se encuentra como oro libre expuesto, siendo esta proporción bastante superior al oro asociado a silicatos, mostrando que hay pocas asociaciones del oro a los diferentes minerales de mena que aparecen en este composito y que las partículas de oro se encuentran expuestas a la acción del reactivo cianuro durante el tratamiento de estas menas en la lixiviación diagnostica y que pueden conseguir el grado de liberación requerido para ser tratadas metalúrgicamente, solamente con someter las muestras del composito a los procesos de conminución requeridos. Los porcentajes de asociación de oro a diferentes minerales, puede observarse en la gráfica correspondiente (numeral 5.1.1.3).

En esta mena, los principales minerales que podían contener oro, identificados como minerales de mena corresponden al oro nativo y electrum y porcentajes muy bajos de pirita, complementado con poca evidencia de asociación entre el oro y este mineral. El resultado de la lixiviación diagnostica concuerda plenamente con los análisis de mineralogía del composito, puesto que se determino una asociación de oro a la pirita completamente nula.

Los minerales de alteración (óxidos de hierro) y rutilo de este tipo de mena, tampoco mostraron evidencia que las partículas de oro estuviesen asociadas a ellos, sino que se encontraban ligadas físicamente con estos minerales, más que químicamente.

La asociación de partículas de oro con los minerales de ganga (cuarzo, mica, illita, etc.), resultó ser bastante baja, sin embargo se nota su influencia en la lixiviación diagnóstica donde se determinó oro asociado a silicatos y muy posiblemente a los minerales illita y mica.

Puede resumirse el análisis diciendo que este tipo de menas tendrá un comportamiento bastante bueno al ser sometida a los procesos de cianuración, siempre que se consiga un alto grado de liberación de las partículas de oro mediante conminución fina y de forma que se determine un tiempo apropiado de procesamiento para obtener el máximo posible de extracción de oro y restar la posible acción de las arcillas y minerales de ganga en el atrapamiento de oro, debido a tiempos prolongados de procesamiento y por efecto del alto grado de mineralización y alteración que presenta este tipo de mena.

5.2.3.4 Análisis de la lixiviación diagnóstica del composito de sulfuros de Santa Rosa del Sur (Composito de Sulfuros). En el composito de sulfuros de la mena de Santa Rosa del Sur, al igual que en el composito de óxidos, la mayor proporción de oro presente se encuentra como oro libre expuesto, siendo esta proporción bastante superior al oro asociado a silicatos, mostrando que hay pocas asociaciones del oro a los diferentes minerales de mena que aparecen en este composito y que corresponden a minerales sulfurados tipo pirita, galena, calcopirita y esfalerita. Los porcentajes de asociación de oro a los diferentes minerales de mena, puede observarse en la gráfica correspondiente (numeral 5.1.1.4).

En la lixiviación diagnóstica de este tipo de mena, se determinó que las partículas de oro se encuentran expuestas a la acción del reactivo cianuro durante el tratamiento de estas menas y que pueden conseguir el grado de liberación requerido para ser tratadas

metalúrgicamente, solamente con someter las muestras del composito a procesos de conminución y ajustando el tamaño de partícula mineral a los requeridos.

En esta mena, los principales minerales que podían contener oro, identificados como minerales de mena corresponden al oro nativo y electrum, presencia de pirita, esfalerita, galena y calcopirita, pero con poca evidencia de asociación entre el oro y estos minerales.

El resultado de la lixiviación diagnóstica concuerda plenamente con los análisis de mineralogía del composito, puesto que se determinó una asociación de oro a los sulfuros y a pirita completamente nula. Los minerales de alteración (óxidos de hierro) de este tipo de mena, tampoco mostraron evidencia que las partículas de oro estuviesen asociadas a ellos, sino que se encontraban ligadas físicamente con estos minerales, más que químicamente.

La asociación de partículas de oro con los minerales de ganga (cuarzo y mica), resultó ser bastante baja aun que superior al composito de óxidos, sin embargo se nota su influencia en la lixiviación diagnóstica donde se determinó oro asociado a silicatos.

El análisis de la lixiviación diagnóstica, puede afirmar que este tipo de menas al ser sometida a los procesos de cianuración, tendrá un comportamiento bastante bueno, siempre que se consiga un alto grado de liberación de las partículas de oro mediante conminución fina y de forma que se determine un tiempo apropiado de procesamiento para obtener el máximo posible de extracción de oro y restar la posible acción de los minerales cianicidas presentes (sulfuros) que bien podrían aumentar el consumo de reactivos y disminuir la cinética de extracción de oro de este tipo de menas.

5.2.4 Análisis de resultados de las pruebas de cianuración de cada tipo de mena. El análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de cianuración aplicadas a cada tipo de mena metalúrgica tratada en este estudio, se hace teniendo en cuenta los siguientes postulados:

- Los minerales de oro pueden clasificarse según el grado de lixiviabilidad respecto al oro disuelto de ellos, tal como se muestra en la tabla 38.

Tabla 38. Clasificación minerales de oro según grado de lixiviabilidad

Porcentaje de Disolución	Clasificación Según Grado de Lixiviabilidad
< 65 %	Difícilmente Lixiviable
65 – 85 %	Medianamente Lixiviable
> 85 %	Altamente Lixiviables

Fuente: Albert, T. General online heap leach testwork. Kappes, Casiday and Associates. USA.

Según el método propuesto por Kautzman y Miltzarek [10] para determinar la granulometría óptima de un mineral de oro sometido a lixiviación, esta granulometría corresponderá a aquel tamaño que reporte mayores disoluciones de oro luego de un periodo de 48 horas.

Tomando en cuenta estos fundamentos y el marco teórico, puede entonces analizarse que:

- En la mayoría de composito de menas analizadas, se encontró que la mayor disolución de oro en periodos de 24 horas, se presenta en la granulometría correspondiente a – 200 mallas Tyler (75 μm); este comportamiento se evidencia en las gráficas correspondientes a porcentajes de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías de los diferentes composito (numeral 5.1.2).

Aunque estas afirmaciones son validas y parecen ser muy lógicas, también debe notarse que en algunas muestras (Composites de Santa Rosa del Sur), se observa que granulometrías por encima de este tamaño (>75 μm), también reportan altas disoluciones de oro comparables a las máximas obtenidas en granulometría menor y en tiempos igualmente comparables, pero sin llegar en ningún momento a sobrepasar la extracción obtenida en el tamaño de 75 μm ; este hecho puede confirmarse gráficamente en las figuras 32, 34, 36, 38, 40 y 42.

- Al analizarse las curvas de porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes compositos y en diferentes granulometrías (Curva Cinética a diferentes tamaños de partícula) de todos los compositos, puede decirse que un tiempo empleado de 24 horas para tratar estas menas mediante cianuración es bastante apropiado, debido a que tiempos mayores o prolongados no reportan aumento en el porcentaje de extracción de oro de estos compositos y por el contrario si reportan aumento en consumo de cianuro y aun disminución en el porcentaje de extracción de oro, posiblemente debido al efecto de atrapamiento de las partículas del metal por arcillas, recubrimiento de óxidos metálicos o material carbonaceo.
- Teóricamente, una curva normal de cianuración de disolución de oro vs tiempo, a unas condiciones de temperatura, presión y concentración de cianuro dadas y constante, debe presentar un aumento en el porcentaje de disolución a medida que aumenta el tiempo, hasta llegar a cierto límite que no puede ser superior al 100 % y a menos que se presenten precipitaciones. Sin embargo, en todas las pruebas de lixiviación vs tiempo de los diferentes compositos de menas, se encontró que la curva de disolución presenta aumento y disminución en el porcentaje de extracción de oro con el tiempo, llegando en algunos casos a estabilizarse a tal punto que no aumenta sino que disminuye. Este tipo de comportamiento, es muy frecuentemente asociado a la presencia de arcillas y materiales carbonaceos, que en algunos casos trabajan como intercambiadores iónicos y son capaces de absorber el oro presente en la solución cianurada rica en este metal.

En general, se considera que el compuesto de oro $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ que se encuentra en la solución rica y proveniente de la reacción de disolución: $\text{Au}^+ + 2\text{CN}^- = \text{Au}(\text{CN})_2^-$, es balanceado iónicamente por una carga positiva correspondiente a los cationes inorgánicos de arcillas, óxidos y carbono, atrapándolo o neutralizando de forma que no pueda reaccionar nuevamente.

- Cuando se analizan las curvas de consumo de cianuro o cianuro libre vs tiempo, se ha notado que aun cuando se ha alcanzado el mayor porcentaje de extracción de oro en un tiempo dado y que este porcentaje no aumenta al pasar el tiempo, si lo hace el consumo

de cianuro, este es caso del composito de Vetas (gráfica 23 y 25) y composito de California (gráficas 25 y 26), ambos compositos como se puede observar en su descripción mineralógica, corresponden a menas altamente sulfuradas, por tanto es muy posible que aun cuando ya el reactivo cianuro no logra solubilizar el oro asociado a estos minerales, si sufre el ataque de los minerales cianicidas, esencialmente sulfuros, que conllevan a su agotamiento y consumo.

Este tipo de comportamiento también se observa en los compositos correspondientes a las menas de Santa Rosa del Sur, en estos compositos, el máximo porcentaje de oro extraible se solubiliza muy rápida y fácilmente, sin embargo se observa en las curvas de consumo de cianuro que estas aumentan significativamente a medida que avanza el tiempo, sin variar el porcentaje de extracción de oro, reforzando la idea basada en que una vez se ha extraído el máximo porcentaje de oro posible de estas menas, el aumento en el consumo de cianuro corresponde a la presencia de minerales cianicidas en los composito de la mena que se este tratando.

En algunos otros casos, se observo que el consumo de cianuro se estabiliza (gráficas 25, 27 y 29), llegando a mantenerse en un valor constante, en la misma forma en que se estabiliza y se mantiene constante el porcentaje de extracción de oro con el tiempo, esto sucede especialmente en el composito de California, composito Sinúes – Tiguarí y Composito Machuca – San Celestino, la explicación a este comportamiento se ha basado en el alto contenido de sílice como mineral de ganga de estos compositos y la baja alteración de esta mena, que presenta poca porosidad y mucha asociación de oro a sulfuros y silicatos (Lixiviación diagnostica de composito de California), de forma tal que posiblemente en tamaños mayores a 200 mallas Tyler (- 100 + 200 Ty, - 60 +100 Ty), la influencia de los minerales sulfurados como cianicidas sea muy baja, debido su bajo grado de liberación.

En cuanto a los compositos de Santa Rosa del Sur, estos han presentado un excelente comportamiento en cianuración, a pesar de la presencia de muchos óxidos, arcillas, minerales de alteración y sulfuros, que hacían pensar que los compositos tendría un comportamiento problema o complejo en cianuración, la lixiviación diagnostica determinó

poca asociación del oro a estos minerales, hecho que se confirma plenamente en las curvas de porcentaje de extracción de oro vs tiempo a diferentes granulometrías (gráficas 32,34, 36, 38, 40 y 42), donde se observa que en tiempos muy cortos de 4 a 8 horas, ya se han obtenido porcentaje significativos de extracción de oro.

A diferencia de los compositos de Santa Rosa del Sur, los composito de California y Vetas han tenido un comportamiento en cianuración, plenamente esperado y acorde con la información mineralógica de estos y la información que se ha obtenido de las pruebas de lixiviación diagnostica, donde se esperaba influencia de los sulfuros en la cinética de la cianuración, alto consumo de cianuro y una lenta disolución de las partículas de oro asociadas a estos minerales.

Cuando se analizan los resultados del composito Sinúes – Tiguará presentados en la tabla 23 y gráfica 28, el cual forma parte del composito de California, se nota que el porcentaje de extracción de oro es alto (78.5 %), este comportamiento se esperaba en las pruebas de cianuración del composito de California, sin embargo, el composito de California ha sorprendido un poco debido a su bajo porcentaje de extracción de oro, a la alta asociación de oro a minerales de ganga (Cuarzo) y sulfuros, poca presencia de minerales de alteración y estancamiento en la cianuración, tal parece que el comportamiento del composito Machuca – San Celestino (tabla 25 y gráfica 30), ha tenido mayor influencia mineralógica en la conformación del composito global de la mena de California, afectando negativamente el comportamiento de esta mena en el proceso de cianuración.

De acuerdo al planteamiento presentado en la tabla 38, puede decirse que los compositos de menas analizadas (Vetas, California, Santa Rosa – Oxidos y Santa Rosa – Sulfuros), corresponden a minerales completamente diferentes y que pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Presencia de menas altamente lixiviables y de un excelente comportamiento en los procesos de cianuración como es el caso de los composito de Santa Rosa – Oxidos y Santa Rosa – Sulfuros (Porcentajes de extracción de oro mayor a 85 %).

- Presencia de minerales medianamente lixiviables, caso del composito de Vetas, el cual presenta un comportamiento aceptable al ser sometido a cianuración y alto consumo de cianuro por efecto de minerales cianicidas (Porcentajes de extracción de oro entre 65 y 85 %).
- Minerales que caen en el rango entre los medianamente lixiviables y difícilmente lixiviables, caso este del composito de California (Porcentajes de extracción de oro entre menores a 65 % en algunos casos y entre 65 y 85 % en otros casos).

6. DESARROLLO DE CORRELACIONES Y MODELAMIENTO

Tal como se planteó en la etapa V de la metodología, en esta parte del estudio se pretende desarrollar las correlaciones matemáticas que mejor describan el comportamiento de los diferentes compositos de menas auríferas (Vetas, California, Santa Rosa – Oxidos y Santa Rosa – Sulfuros) al ser sometidas al proceso de lixiviación mediante cianuración y lograr predecir de esta forma los valores de extracción de oro de estos minerales, en función del tiempo, tamaño de partícula y composición mineralógica.

Los datos presentados en tablas y gráficos en el capítulo anterior, se han analizado mediante métodos matemáticos y estadísticos, que proporcionan correlaciones teóricas y ajuste de estos datos a las ecuaciones matemáticas que mejor coeficiente de correlación generen, produciendo coeficientes de correlación bastante altos y en algunos casos ajustes con residuo cero. Estos ajustes, se han logrado mediante la utilización de la herramienta informática MATLAB, aplicando a los datos regresiones polinómicas y mínimos cuadrados.

De la revisión bibliográfica realizada en el marco teórico, se ha tomado que las variables que mayor influencia presentan sobre el proceso de cianuración de minerales auríferos son la granulometría o tamaño de partícula del mineral, tiempo de procesamiento, presión, temperatura, velocidad de agitación y concentración del reactivo (concentración del cianuro), además de la composición mineralógica del mineral. Con el fin de poder imprimir un carácter práctico a este trabajo, algunas de estas variables se han fijado a valores corrientemente utilizados en la industria minera, tales como:

- Velocidad de agitación: 700 – 1000 r.p.m., de forma que esta variable no presente influencia sobre el proceso.

- Concentración de cianuro: 2 – 5 Kg/ton mineral, tal como se utiliza en la industria minera.
- Temperatura ambiente.
- Presión ambiente, a través de la inyección de aire mediante burbujeo.
- pH: Mayor a 10 mediante adición de cal para evitar formación de ácido cianhídrico.

De forma que pudiese variarse el tiempo de procesamiento y la granulometría de las menas, puesto que los compositos de menas, ya habían sido caracterizadas mineralógicamente con anterioridad.

Con estos parámetros y variables fijadas, se procedió entonces a realizar las pruebas de cianuración a los compositos de cada tipo de mena, variando el tiempo de procesamiento para un tamaño dado de partículas (granulometría), de forma que se obtuviese como variable respuesta el porcentaje de extracción de oro de estos minerales a estas condiciones y tal como se describe en la metodología de este estudio (Capítulo 3, etapa III, actividad 2).

Los datos obtenidos en estas pruebas (% extracción de oro vs tiempo, para una granulometría específica), podían entonces ser ajustados mediante la utilización del software. El tipo de ecuaciones que normalmente rige estas correlaciones o ajustes son las siguientes:

- Ajuste lineal: $Y = b + m X$
- Ajuste logarítmico: $Y = b + m \ln X$
- Ajuste de potencia: $Y = b X^m$ o $\ln Y = \ln b + m \ln X$
- Ajuste exponencial: $Y = b e^{mX}$ o $\ln Y = \ln b + m X$

Otro tipo de ecuaciones que permite ajustar los datos obtenidos produciendo generalmente un coeficiente de correlación muy cercano a la unidad y un residuo muy pequeño, corresponde al ajuste polinómico tipo “Spline”, que se realiza mediante un polinomio de grado N, y tiene por ecuación: $Y = a X^n + b X^{n-1} + \dots + d X + C$, sin embargo, este tipo de correlación o ajuste, no suministra ninguna información sobre a que variable (granulometría, concentración de reactivo o tiempo) corresponde cada una de las potencias del polinomio, razón por la cual no es utilizado en este estudio.

6.1 DESARROLLO DE CORRELACIONES SOBRE CADA CURVA DE CIANURACIÓN

A continuación se presentan las tablas y gráficas de los datos teóricos y experimentales obtenidos en las diferentes pruebas de cianuración a diferentes tiempos y tamaño de partícula específico, así como los coeficientes de correlación para estos datos y las correlaciones que resultaron del ajuste de estos datos, presentadas en forma de ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de las curvas cinéticas de cianuración de las diferentes muestras que fueron estudiadas.

En estas correlaciones, el termino **T**, designa el tiempo de procesamiento en horas como variable independiente y el termino **Au**, designa el porcentaje de extracción de oro que se ha obtenido del mineral que se está tratando en el tiempo de procesamiento especificado y al tamaño de partícula mineral que se indique, de forma que **Au**, representa la variable respuesta en estas correlaciones.

Tabla 39. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del Composito de Vetas.

Porcentaje de Extracción de Oro (%)						
Tiempo (Horas)	Experimental - 60 + 100 Ty	Teórico - 60 + 100 Ty	Experimental - 100 + 200 Ty	Teórico - 100 + 200 Ty	Experimental - 200 Ty	Teórico - 200 Ty
0	0	0	0	0	0	0
1	18.1	19.04	27.8	32.91	45.5	57.73
2	25.6	28.02	41.2	41.98	67.2	62.26
3	32.5	33.27	47.9	47.28	72.8	64.89
4	40.3	36.99	53.4	51.05	73.4	66.77
5	44.6	39.88	59.1	53.96	68.6	68.23
8	45.1	45.97	64	60.11	73.5	71.29
12	47.8	51.22	62.3	65.41	69.7	73.94
16	56.2	54.94	75.8	69.18	72.3	75.82
20	58.6	57.83	71.3	72.1	75.4	77.27
24	58.6	60.19	65.7	74.48	78.3	78.46
Coefficiente de Correlación	0.98		0.94		0.75	
Ecuación de Correlación	Au: 19.05 + 12.95 Ln T		Au: 32.91 + 13.08 Ln T		Au: 57.73 + 6.52 Ln T	

Figura 43. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del Composito de Vetas

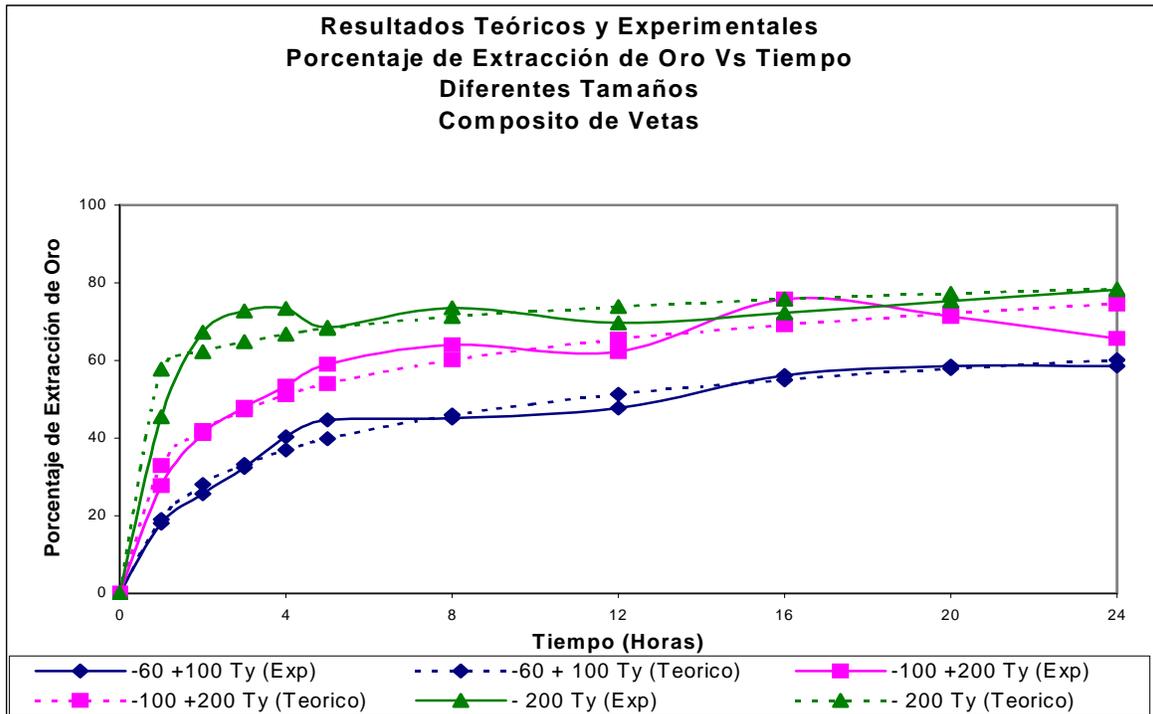


Tabla 40. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del composito de California.

Porcentaje de Extracción de Oro (%)						
Tiempo (Horas)	Experimental - 60 + 100 Ty	Teórico - 60 + 100 Ty	Experimental - 100 + 200 Ty	Teórico - 100 + 200 Ty	Experimental - 200 Ty	Teórico - 200 Ty
0	0	0	0	0	0	0
1	18.18	29.06	18.18	32.87	18.18	29.79
2	22.72	28.9	24.24	32.45	32.3	36.47
3	36.4	28.73	39.4	32.02	45.2	40.38
4	42.2	28.56	46.7	31.6	53.03	43.15
5	28.8	28.39	36.3	31.18	56.81	45.3
8	26.51	27.88	30.3	29.91	55	49.84
12	26.51	27.2	26.51	28.22	50.8	53.75
16	24.24	26.53	24.24	26.53	53.03	56.52
20	24.24	25.85	24.24	24.84	55	58.67
24	26.51	25.17	22.72	23.15	55	60.43
Coefficiente de Correlación	-0.198		-0.388		0.807	
Ecuación de Correlación	Au: 29.23 + 0.169 T		Au: 33.29 + 0.4224 T		Au: 29.8 + 9.64 Ln T	

Figura 44. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del composito de California.

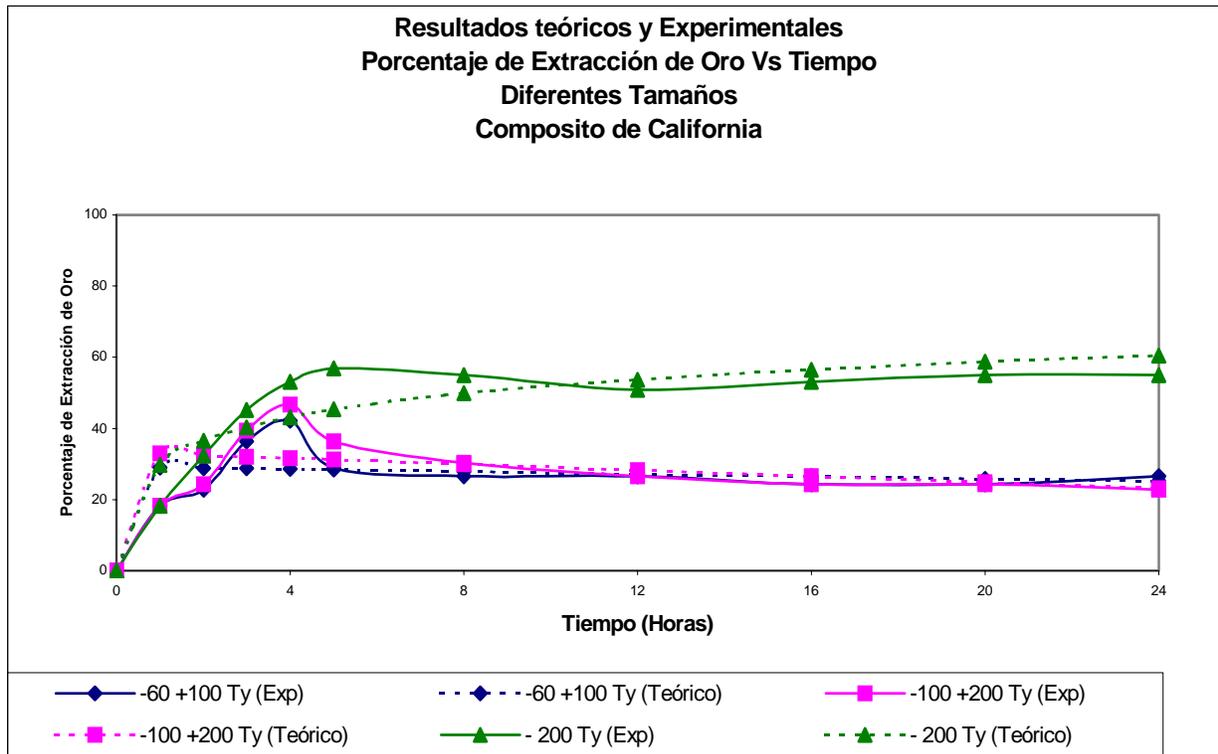


Tabla 41. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
 Composito Sinúes – Tiguarí (California).

Porcentaje de extracción de oro vs tiempo (%) – D ₈₀ : - 200 Ty				
Tiempo (Horas)	Experimental Muestra 1	Teórico Muestra 1	Experimental Muestra 2	Teórico Muestra 2
0	0	0	0	0
2	42.18	56.02	42.18	55.91
4	81.81	63.42	72.72	63.71
6	78.5	68.19	75.6	68.27
8	78.5	71.79	78.5	71.51
12	75.6	77.19	78.5	76.07
16	75.6	81.27	75.6	79.31
24	78.5	87.39	75.6	83.8
Coefficiente de Correlación	0.649		0.737	
Ecuación de Correlación	Au: 49.49 (T) ^ 0.17		Au: 48.11 + 11.25 Ln T	

Figura 45. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo.
 Composito Sinúes – Tiguarí (California).

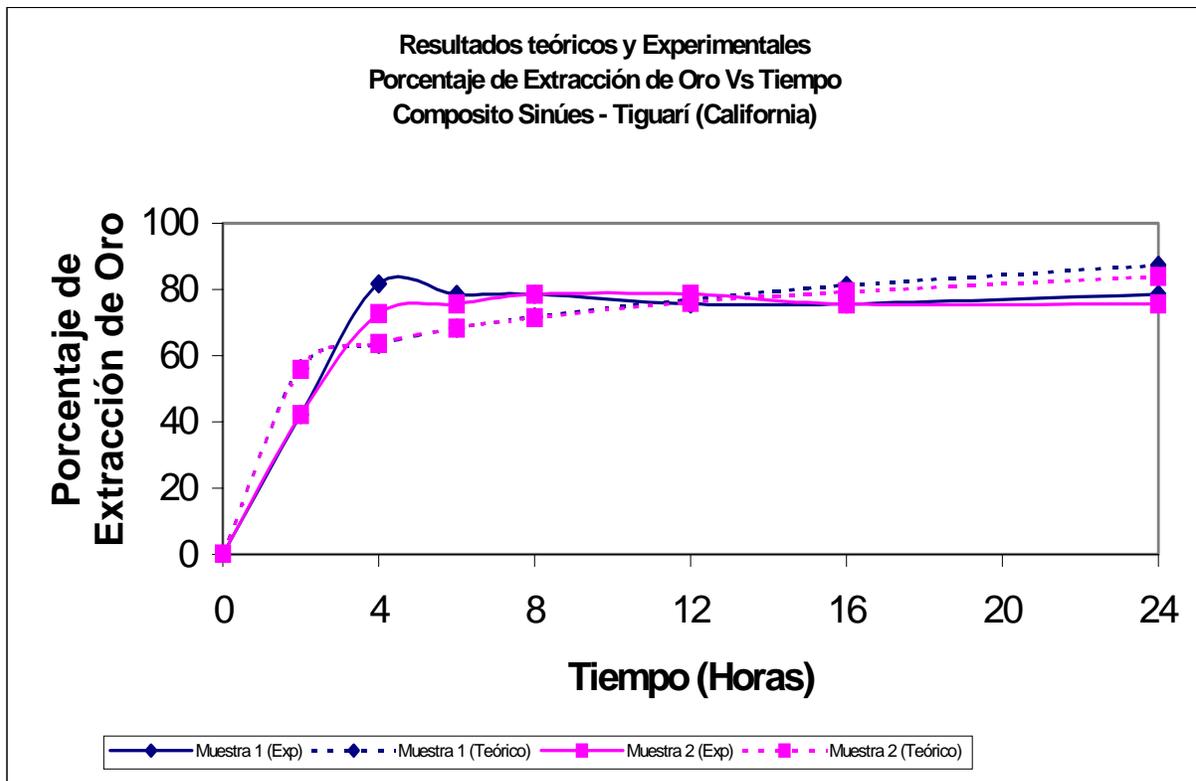


Tabla 42. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
Composito Machuca – San Celestino (California).

Porcentaje de extracción de oro vs tiempo (%) – D_{80} : - 200 Ty				
Tiempo (Horas)	Experimental Muestra 1	Teórico Muestra 1	Experimental Muestra 2	Teórico Muestra 2
0	0	0	0	0
2	45.2	47.74	45.2	49.4
4	49.07	49.89	55	51.53
6	55	51.19	55	52.78
8	55	52.14	55	53.67
12	55	53.5	55	54.92
16	53	54.49	55	55.81
24	53	55.91	55	57.05
Coefficiente de Correlación	0.726		0.706	
Ecuación de Correlación	Au: 45.68 (T) ^ 0.0635		Au: 47.26 + 3.08 Ln T	

Figura 46. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo.
Composito Machuca – San Celestino (California).

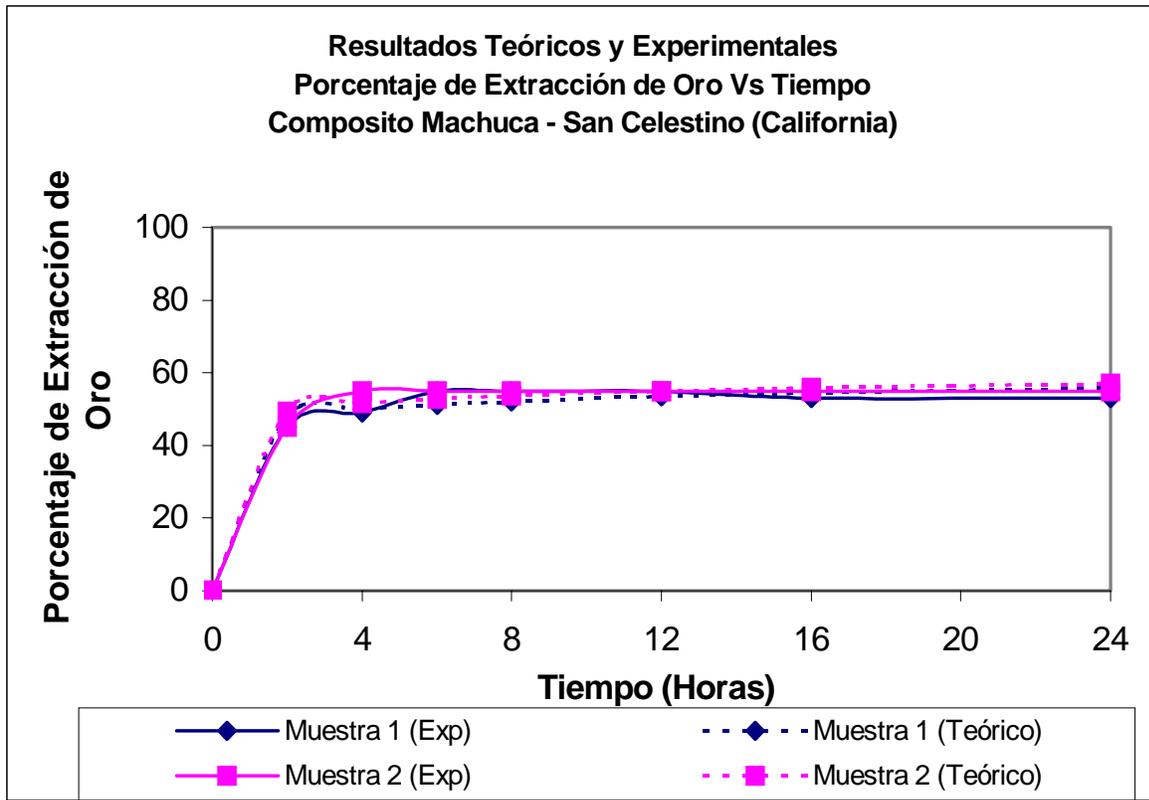


Tabla 43. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto de Oxidos de Santa Rosa del Sur.

Porcentaje de extracción de oro vs tiempo (%)				
Tiempo (Horas)	Experimental - 100 + 200 Ty	Teórico - 100 + 200 Ty	Experimental - 200 Ty	Teórico -200 Ty
0	0	0	0	0
2	63.25	63.33	84.56	84.67
4	68.69	70.6	87.67	87.87
8	81.17	77.88	91.65	91.07
12	81.9	82.13	92.35	92.94
16	84.71	85.15	93.64	94.27
20	86.39	87.5	95.2	95.31
24	88.48	89.4	96.42	96.14
Coefficiente de Correlación	0.964		0.996	
Ecuación de Correlación	Au: 56.06 + 10.51 Ln T		Au: 81.38 + 4.60 Ln T	

Figura 47. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto de Oxidos de Santa Rosa del Sur.

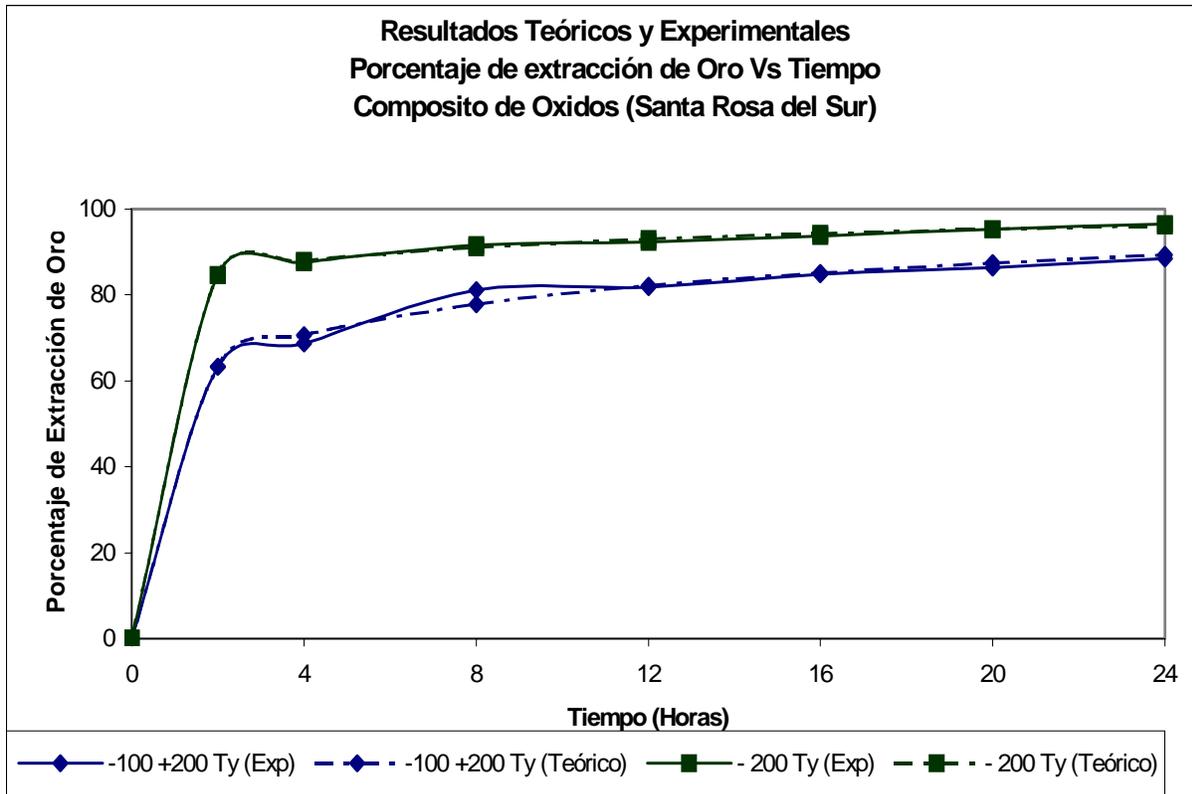


Tabla 44. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto I (óxidos) de Santa Rosa del Sur.

Porcentaje de extracción de oro vs tiempo (%)				
Tiempo (Horas)	Experimental - 100 + 200 Ty	Teórico - 100 + 200 Ty	Experimental - 200 Ty	Teórico -200 Ty
0	0	0	0	0
4	77.62	78.79	72.55	75.71
8	80.48	77.84	83.91	77.17
16	73.81	75.98	75.72	78.65
24	74.96	74.15	79.3	79.53
Coefficiente de Correlación	-0.697		0.346	
Ecuación de Correlación	Au: 79.75 (e) ^ (-0.00303 T)		Au: 72.88 (T) ^ 0.274	

Figura 48. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto I (óxidos) de Santa Rosa del Sur.

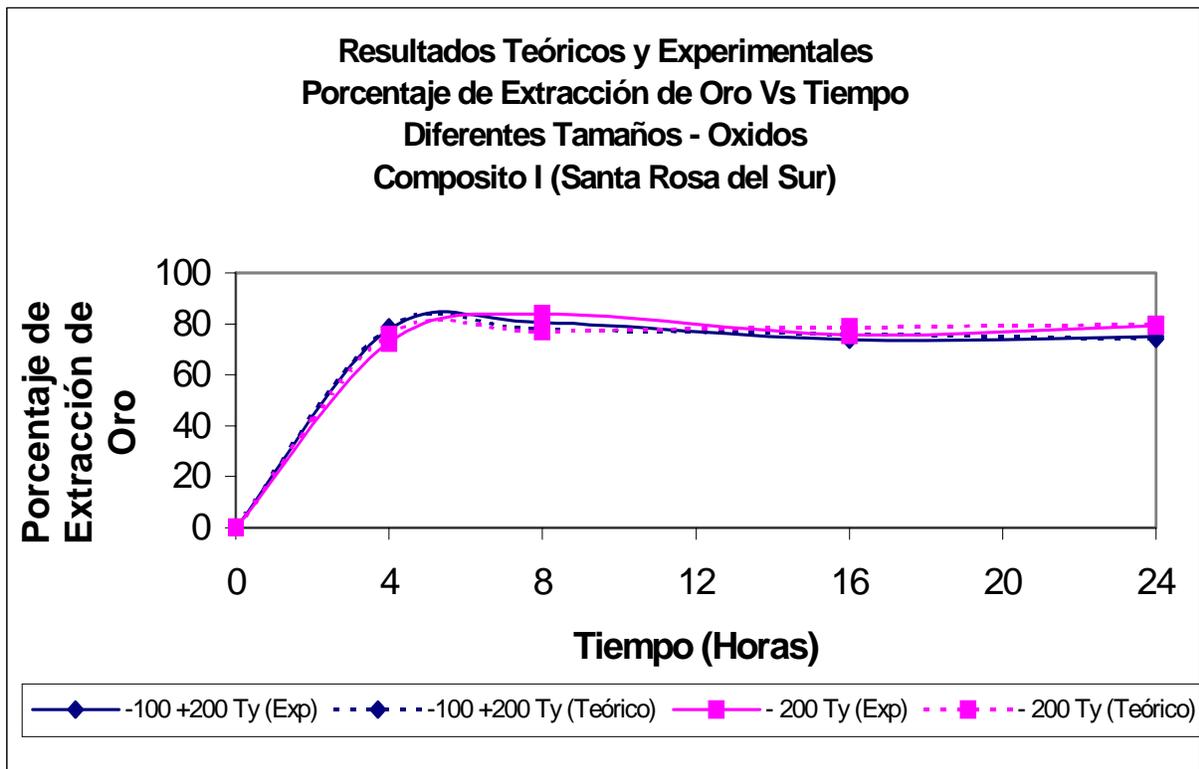


Tabla 45. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto III (óxidos) de Santa Rosa del Sur.

Porcentaje de extracción de oro vs tiempo (%)				
Tiempo (Horas)	Experimental - 100 + 200 Ty	Teórico - 100 + 200 Ty	Experimental - 200 Ty	Teórico -200 Ty
0	0	0	0	0
4	78.55	79.77	95.13	91.07
8	88.38	85.81	87.46	91.74
16	90.33	91.85	91.51	93.08
24	95.57	95.38	96.23	94.42
Coefficiente de Correlación	0.965		0.375	
Ecuación de Correlación	Au: 67.70 + 8.70 Ln T		Au: 90.40 + 0.167 T	

Figura 49. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto III (óxidos) de Santa Rosa del Sur.

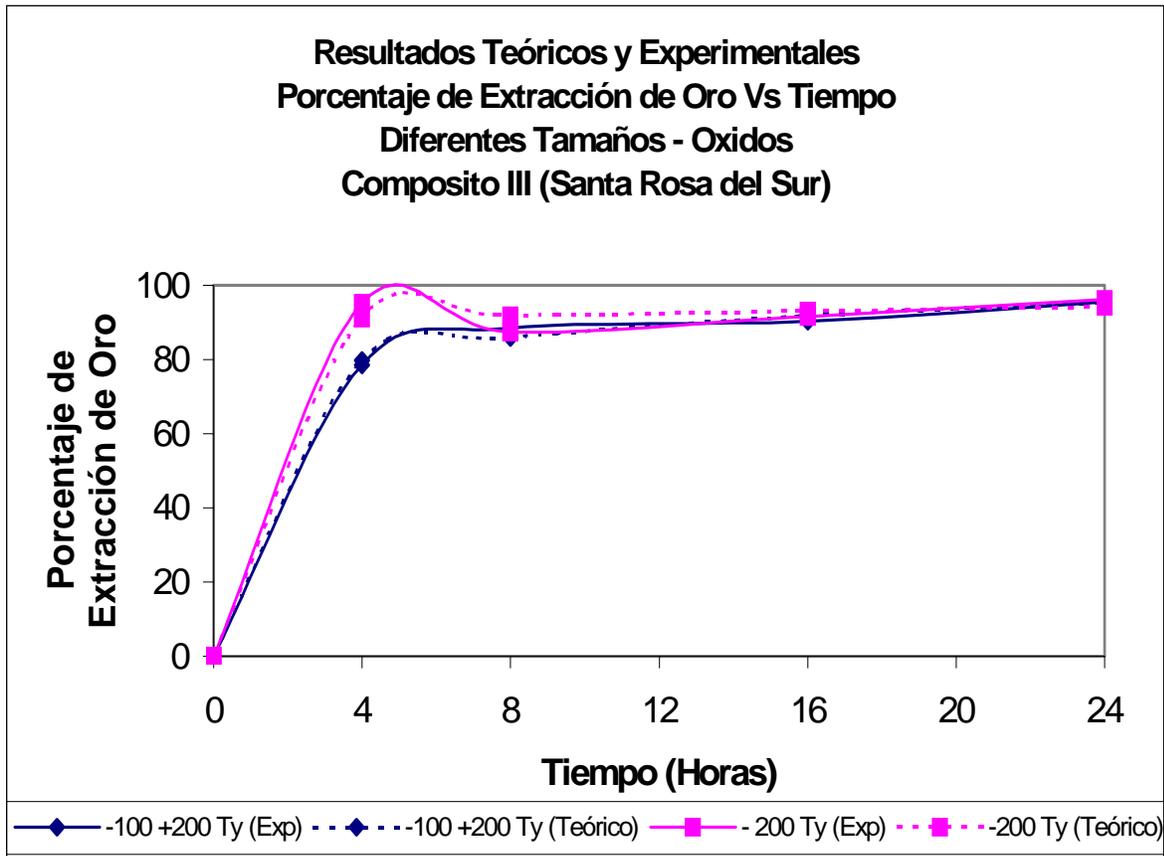


Tabla 46. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto V (óxidos) de Santa Rosa del Sur.

Porcentaje de extracción de oro vs tiempo (%)				
Tiempo (Horas)	Experimental - 100 + 200 Ty	Teórico - 100 + 200 Ty	Experimental - 200 Ty	Teórico -200 Ty
0	0	0	0	0
4	68.69	70.6	87.67	87.87
8	81.17	77.88	91.65	91.07
16	84.71	85.15	93.64	94.27
24	88.48	89.4	96.42	96.14
Coefficiente de Correlación	0.964		0.994	
Ecuación de Correlación	Au: 56.05 + 10.49 Ln T		Au: 81.37 + 4.61 Ln T	

Figura 50. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto V (óxidos) de Santa Rosa del Sur.

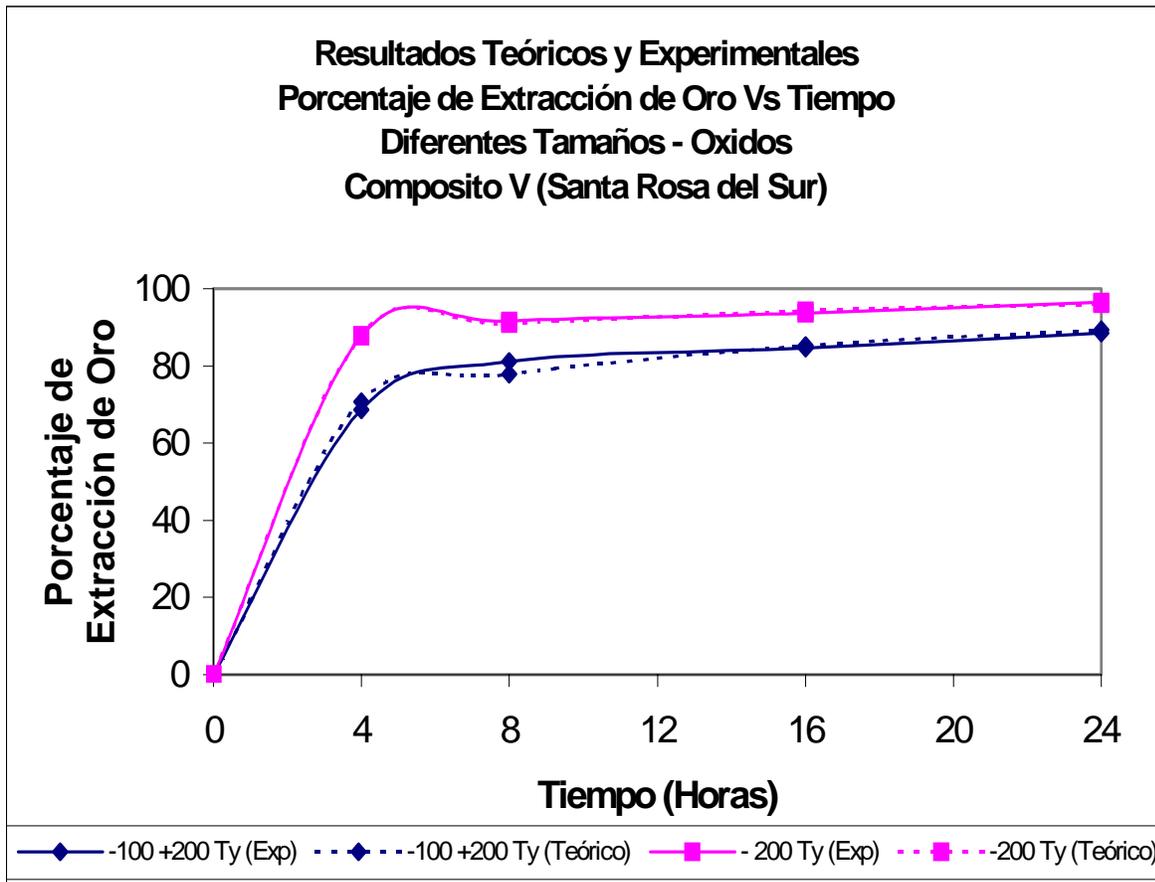


Tabla 47. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto de Sulfuros de Santa Rosa del Sur.

Porcentaje de extracción de oro vs tiempo (%)				
Tiempo (Horas)	Experimental - 100 + 200 Ty	Teórico - 100 + 200 Ty	Experimental - 200 Ty	Teórico -200 Ty
0	0	0	0	0
2	50.31	51.98	59.75	64.50
4	59.9	60.63	67.36	67.13
8	70.42	69.28	76.11	72.4
12	75.23	74.34	77.54	77.68
16	78.09	77.93	79.98	82.95
20	80.12	80.72	89.32	88.23
24	82.44	82.99	94.55	93.50
Coefficiente de Correlación	0.9971		0.9793	
Ecuación de Correlación	Au: $42.08 + 12.95 \ln T$		Au: $60.02 + 1.435 T$; T > 2 horas	

Figura 51. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto de Sulfuros de Santa Rosa del Sur.

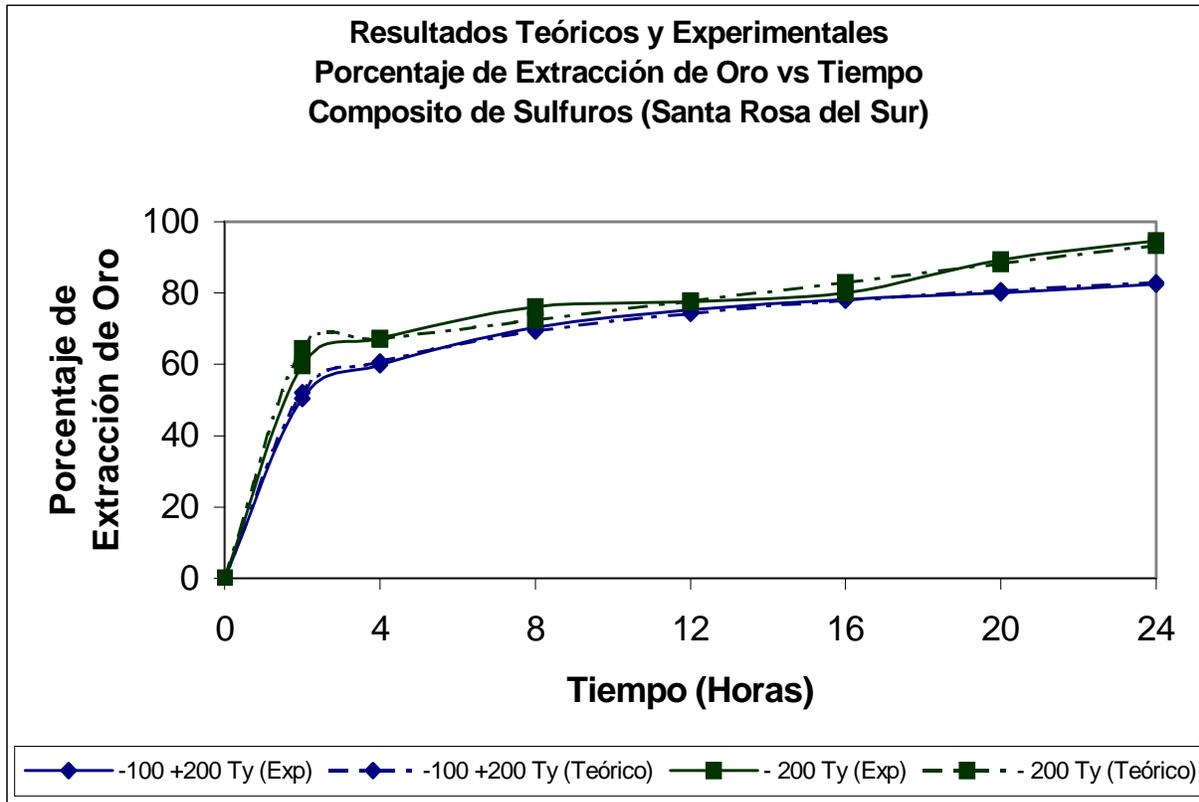


Tabla 48. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del composito II (sulfuros) de Santa Rosa del Sur.

Porcentaje de extracción de oro vs tiempo (%)				
Tiempo (Horas)	Experimental - 100 + 200 Ty	Teórico - 100 + 200 Ty	Experimental - 200 Ty	Teórico -200 Ty
0	0	0	0	0
4	59.9	60.63	67.36	67.13
8	70.42	69.28	76.11	72.4
16	78.09	77.93	79.98	82.95
24	82.44	82.99	94.55	93.5
Coefficiente de Correlación	0.996		0.979	
Ecuación de Correlación	Au: 42.07 + 12.9 Ln T		Au: 60.027 + 1.435 T	

Figura 52. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del composito II (sulfuros) de Santa Rosa del Sur.

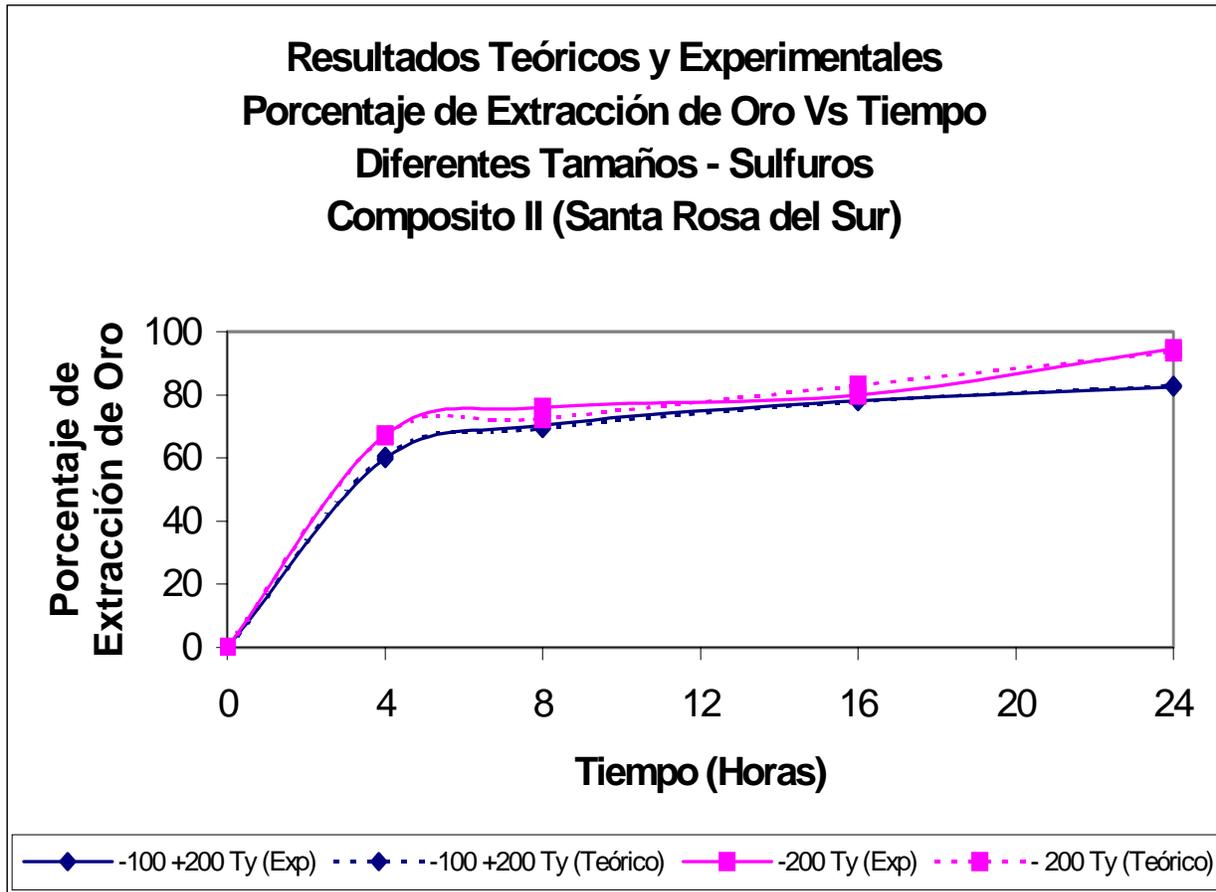


Tabla 49. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto IV (sulfuros) de Santa Rosa del Sur.

Porcentaje de extracción de oro vs tiempo (%)				
Tiempo (Horas)	Experimental - 100 + 200 Ty	Teórico - 100 + 200 Ty	Experimental - 200 Ty	Teórico -200 Ty
0	0	0	0	0
4	73.8	74.17	81.47	80.69
8	78.8	78.61	82.51	81.93
16	84.23	83.05	81.34	84.41
24	84.68	85.65	88.62	86.89
Coefficiente de Correlación	0.984		0.792	
Ecuación de Correlación	Au: 65.29 + 6.40 Ln T		Au: 79.46 + 0.309 T	

Figura 53. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto IV (sulfuros) de Santa Rosa del Sur.

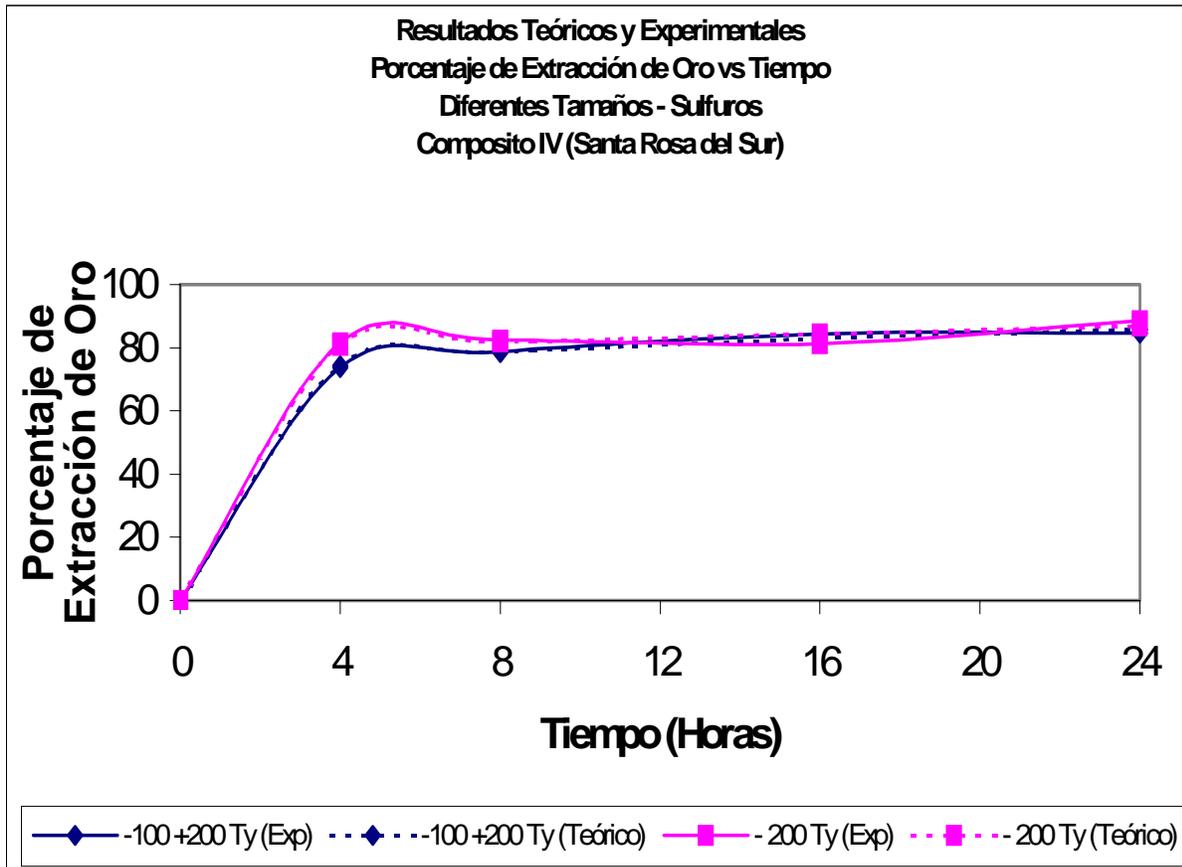
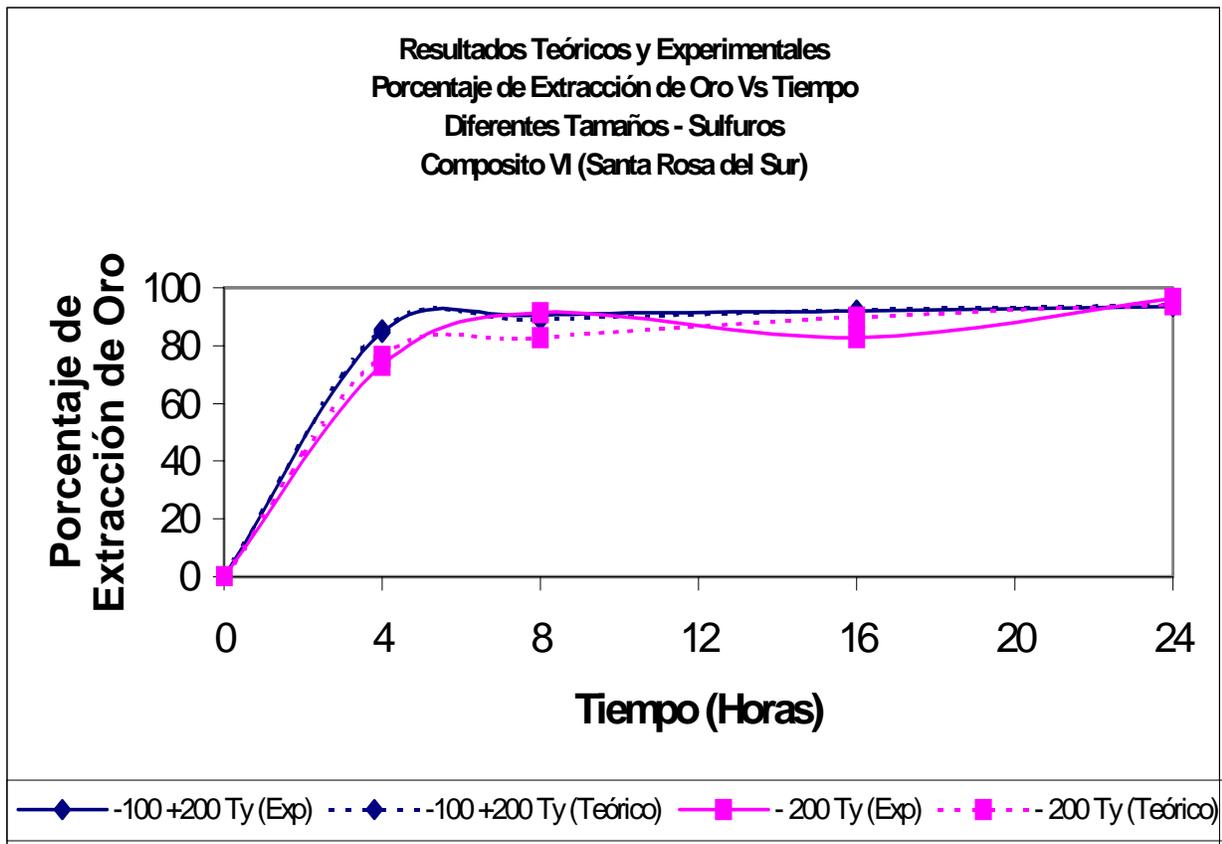


Tabla 50. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto VI (sulfuros) de Santa Rosa del Sur.

Porcentaje de extracción de oro vs tiempo (%)				
Tiempo (Horas)	Experimental - 100 + 200 Ty	Teórico - 100 + 200 Ty	Experimental - 200 Ty	Teórico -200 Ty
0	0	0	0	0
4	84.57	85.54	73.13	76.33
8	90.49	88.85	91.44	82.77
16	92.05	92.15	82.86	89.76
24	93.54	94.09	96.36	94.12
Coefficiente de Correlación	0.9564		0.7596	
Ecuación de Correlación	Au: $78.94 + 4.76 \ln T$		Au: $64.91 T^{0.116}$	

Figura 54. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías del compuesto VI (sulfuros) de Santa Rosa del Sur.



6.2 DESARROLLO DE CORRELACIONES PARA LAS CURVAS DE CIANURACIÓN DE MAYOR PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE ORO Y GRANULOMETRÍA ÓPTIMA DE CADA TIPO DE MENA

Tal como se consideró en el análisis de resultados de las pruebas de cianuración de cada tipo de mena (sección 5.2.4), en todos los composito de cada tipo de mena analizada se encontró que la mayor disolución de oro en periodos de 24 horas, se presenta en la granulometría correspondiente a – 200 mallas Tyler o un tamaño de partícula que corresponde a 75 μm .

Por tanto, se considera una granulometría de –200 mallas Tyler como un tamaño de partícula óptimo y apropiado para obtener en los composito de Vetas, California, Santa Rosa del Sur – Oxidos y Santa Rosa del Sur – Sulfuros, el mayor porcentaje de extracción de oro posible al ser sometidos estos minerales a un proceso de cianuración por agitación bajo las condiciones de procesamiento presentadas en la metodología del proyecto.

Con base en estos resultados, se procedió a tomar los datos de las pruebas de cianuración para estos minerales a – 200 mallas Tyler y ajustarlos mediante el uso del software MATLAB, de forma que una vez procesados estos datos ha arrojado los siguientes correlaciones matemáticas, donde T designa el tiempo de procesamiento en horas y Au, el porcentaje de extracción de oro:

- Correlación Para el Composito de Vetas:

$$\text{Au: } 57.73 + 6.52 \text{ Ln T}$$

Coefficiente de Correlación: 0.755

Máximo porcentaje de extracción de oro (24 horas): 78.3 %

- Correlación Para el Composito de California:

$$\text{Au: } 29.8 + 9.64 \text{ Ln T}$$

Coefficiente de Correlación: 0.807

Máximo porcentaje de extracción de oro (24 horas): 56.8 %

- **Correlación del Composito de Santa Rosa - Oxidos:**

$$\text{Au: } 81.38 + 4.60 \ln T$$

Coeficiente de Correlación: 0.994

Máximo porcentaje de extracción de oro (24 horas): 96.4 %

- **Correlación del Composito de Santa Rosa – Sulfuros:**

$$\text{Au: } 60.02 + 1.435 T ; T > 2\text{horas}$$

Coeficiente de Correlación: 0.979

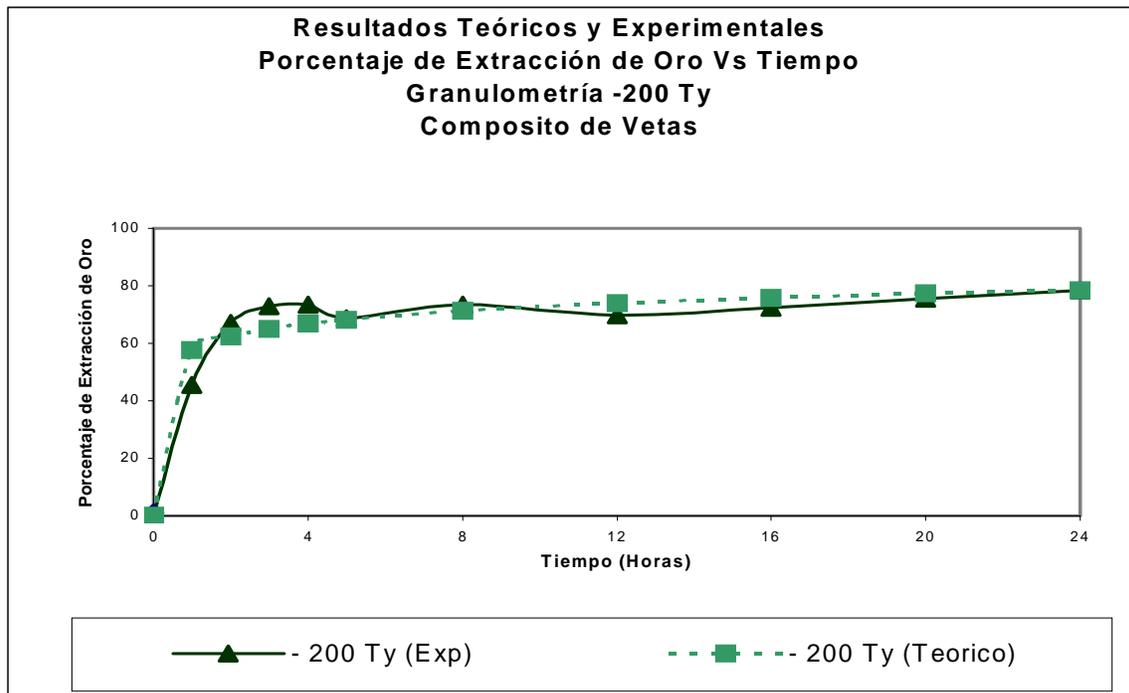
Máximo porcentaje de extracción de oro (24 horas): 94.5 %

Los resultados experimentales de las pruebas y los resultados teóricos calculados a partir de estas correlaciones, se presentan a continuación en la forma de tablas y figuras.

**Tabla 51. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
D₈₀: – 200 Ty Composito de Vetas.**

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Teórico - 200 Ty
0	0	0
1	45.5	57.73
2	67.2	62.26
3	72.8	64.89
4	73.4	66.77
5	68.6	68.23
8	73.5	71.29
12	69.7	73.94
16	72.3	75.82
20	75.4	77.27
24	78.3	78.46
Coeficiente de Correlación		0.75
Ecuación de Correlación		Au: 57.73 + 6.52 Ln T

Figura 55. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para granulometría – 200 Ty del composito de Vetas.



**Tabla 52. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
D₈₀: -200 Ty Composito de California.**

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Teórico - 200 Ty
0	0	0
1	18.18	29.79
2	32.3	36.47
3	45.2	40.38
4	53.03	43.15
5	56.81	45.3
8	55	49.84
12	50.8	53.75
16	53.03	56.52
20	55	58.67
24	55	60.43
Coeficiente de Correlación		0.807
Ecuación de Correlación		Au: 29.8 + 9.64 Ln T

Figura 56. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para granulometría: - 200 Ty del composito de California.

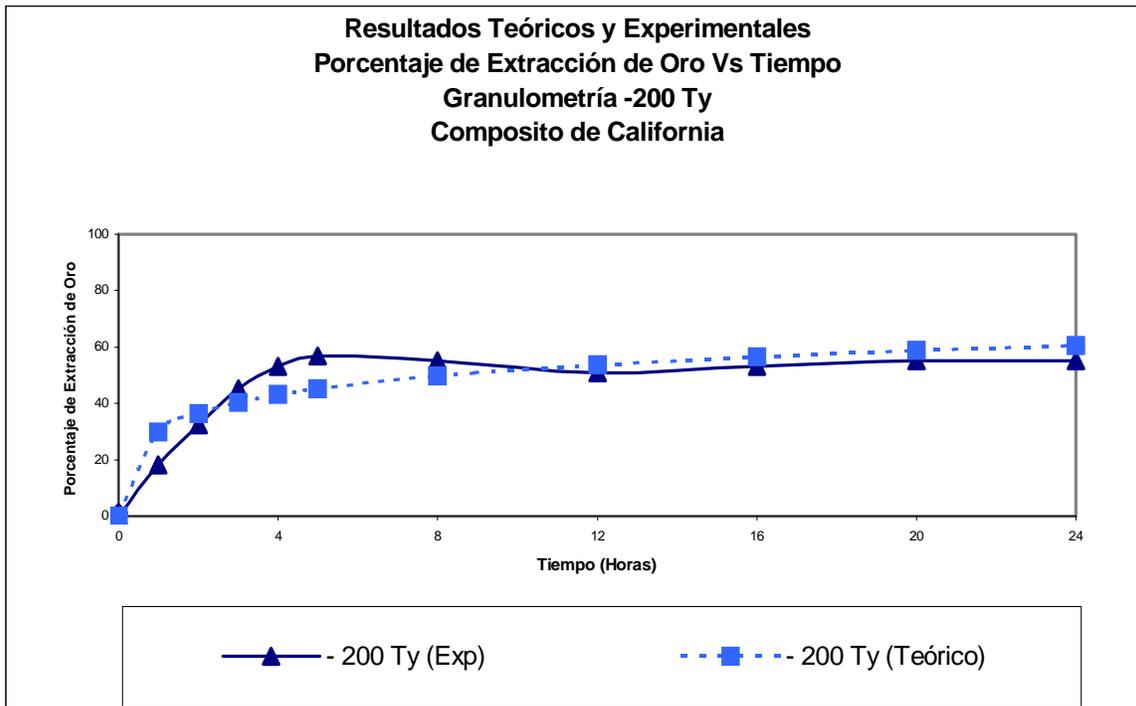


Tabla 53. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo.
 D_{80} : - 200 Ty Composito de Oxidos de Santa Rosa del Sur.

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Teórico - 200 Ty
0	0	0
2	84.56	84.67
4	87.67	87.87
8	91.65	91.07
12	92.35	92.94
16	93.64	94.27
20	95.2	95.31
24	96.42	96.14
Coeficiente de Correlación		0.994
Ecuación de Correlación		Au: $81.38 + 4.60 \ln T$

Figura 57. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para granulometría - 200 Ty del composito de Oxidos de Santa Rosa del Sur.

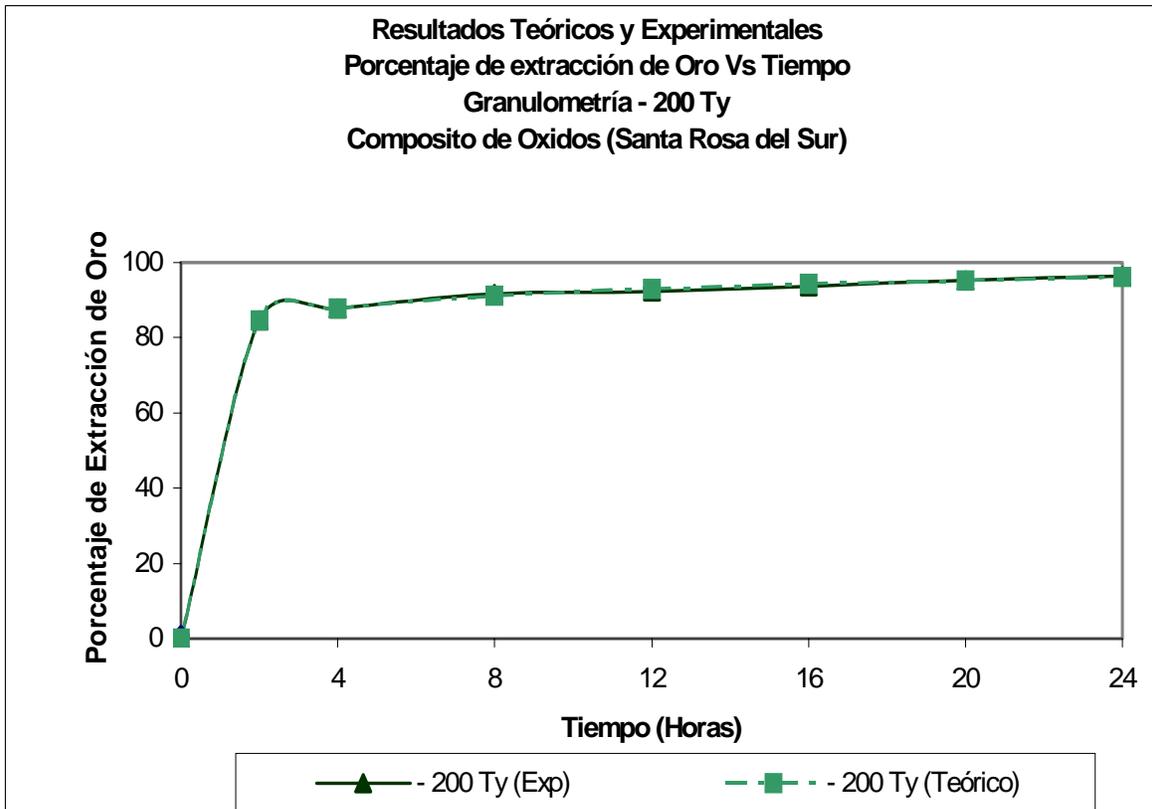
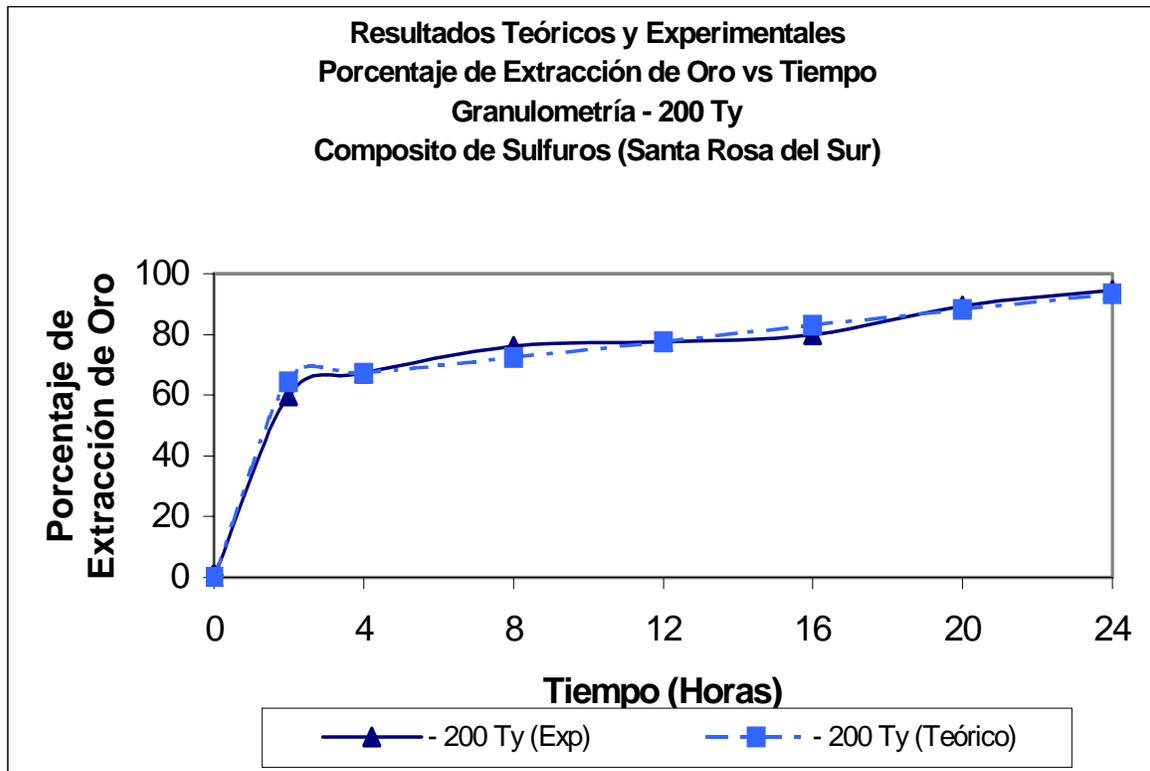


Tabla 54. Correlaciones entre porcentaje de extracción de oro vs tiempo. D_{80} : - 200 Ty
 Composito de Sulfuros de Santa Rosa del Sur.

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Teórico - 200 Ty
0	0	0
2	59.75	64.50
4	67.36	67.13
8	76.11	72.4
12	77.54	77.68
16	79.98	82.95
20	89.32	88.23
24	94.55	93.50
Coeficiente de Correlación		0.9793
Ecuación de Correlación		Au: $60.02 + 1.435 T$; $T > 2$ horas

Figura 58. Porcentajes teórico y experimental de extracción de oro vs tiempo para granulometría - 200 Ty del composito de Sulfuros de Santa Rosa del Sur.

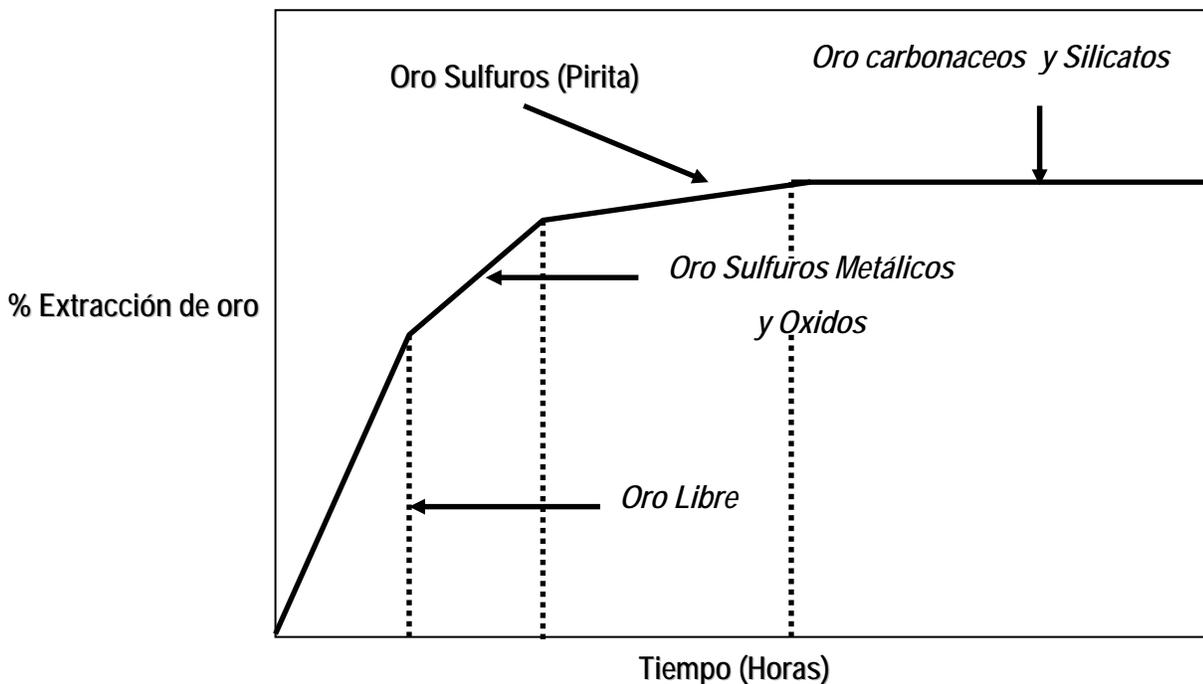


6.3 CORRELACIONES PARA LA DISOLUCIÓN DE ORO DE DIFERENTES MATRICES MINERALES

De acuerdo a los conceptos presentados en la sección 2.4, sobre lixiviación diagnóstica de menas auríferas y los procedimientos para determinación del oro asociado a diferentes matrices minerales (figura 22), puede afirmarse que durante el proceso de cianuración, el reactivo ataca inicialmente el mineral menos estable o aquel que se encuentra más expuesto en la matriz de la muestra y posteriormente aquellos minerales más estables.

Con base en estos fundamentos, se ha dividido la curva de cianuración de minerales auríferos en diferentes zonas bien definidas, de las cuales cada zona corresponde a un tipo específico de matriz mineral. Esta división se muestra en la figura 59.

Figura 59. Curva cinética de disolución de oro de diferentes matrices minerales.



Fuente: López, María Esperanza. La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de los minerales auroargentíferos. Tesis de Grado de Maestría en Ingeniería Metalúrgica, UIS, 1999, Bucaramanga. Modificado por el autor.

Según este esquema, durante el proceso de cianuración inicialmente se lixivía el oro que se encuentra libre expuesto, seguido del oro asociado a óxidos y sulfuros de base metálica o polisulfuros, luego el oro asociado con pirita y finalmente el oro asociado a silicatos.

De todas las matrices minerales que pueden estar conteniendo oro, el oro que se encuentra libre expuesto, sea en forma de oro nativo o electrum, es el menos estable de todos y por tanto el que primero es solubilizado por el cianuro. Los óxidos metálicos (calcita, hematita, goethita, etc.) y sulfuros de base metálica o polisulfuros entre ellos pirrotita, galena, esfalerita y sulfuros de cobre (calcopirita, calcosita, covelina, etc.) aunque son más estables, exhiben algún grado de solubilidad en soluciones de cianuro o son fácilmente oxidados de forma que el oro asociado a ellos puede ser lixiviado por el cianuro, sin embargo estos minerales son altamente cianicidas y su consumo de cianuro y oxígeno de la solución es alto y por tanto generan retardo de la reacción de disolución.

La pirita, arsenopirita y marcasita, son sulfuros minerales mucho más estables que los anteriores y por tanto de mayores problemas durante la cianuración, estos compuestos se descomponen mediante aireación y adición de cal para formar sulfuros solubles y tiosulfatos que reaccionan con el cianuro y oxígeno, agotando su concentración de la solución lixivante. Además, a altas concentraciones de álcalis, la pirita tiene una alteración superficial y los iones sulfuro que provienen de minerales que contiene sulfuro de hierro, pueden insensibilizar la superficie del oro, de forma que inhiben la cianuración de este.

De todos los compuestos que pueden contener oro, los silicatos son aquellos donde la acción lixivante del cianuro es prácticamente nula.

Entonces, una vez que se obtuvieron las curvas de cianuración de oro con mayores porcentajes de extracción y tamaño óptimo de partícula, se procedió a comparar estas curvas con la curva presentada en la figura 59, de forma que pudiese dividirse cada curva en secciones definidas y determinadas por los resultados obtenidos de los ensayos de lixiviación diagnóstica, donde se determinó que porcentaje de oro está asociado a cada tipo de minerales en cada compuesto de tipo de mena.

Hecho esto, y tomando como base que miembros de la Universidad de Stellenbosch (Sudáfrica)[12], han concluido que la lixiviabilidad de las menas no es solamente dependiente del grado de liberación que se alcance en la conminución, sino que además depende del grado de exposición que alcanza en si las partículas o granos de oro en el mineral de mena que lo contiene, encontrando que el grado de liberación (lixiviabilidad), es una función no solamente del tamaño de partícula al cual se ha sometido a conminución la mena de interés sino también de la forma de ocurrencia del oro (partículas) en los minerales de mena (mineralogía), reforzando la utilidad de la técnica de lixiviación diagnostica en combinación con otros ensayos.

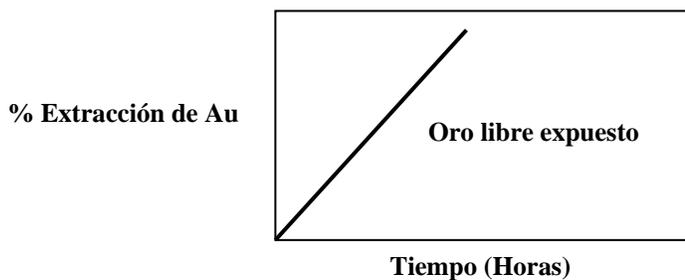
Estos investigadores propusieron que el oro contenido en los diferentes minerales de mena, muy posiblemente obedezca el siguiente tipo de correlaciones:

- Oro libre expuesto:

Se considera que el comportamiento de este metal precioso en la cianuración corresponde a la ecuación matemática:

$$A_{\text{libre}} = a_0 + b_0 t$$

Donde A_{libre} es el porcentaje de oro libre expuesto en esta mena, a y b son constantes características, t es el tiempo en horas y tiene como gráfica la siguiente representación:

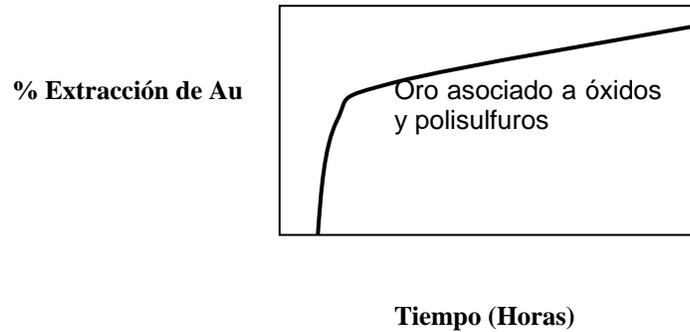


- Oro asociado a sulfuros de base metálica y óxidos:

El comportamiento del oro asociado a estos minerales corresponde al tipo de ecuación matemática:

$$A_{\text{SBM}} = a_1 + b_1 \ln t$$

Donde Au_{SBM} , es el porcentaje de oro asociado a estos minerales, a y b son constantes características del tipo de mena tratada, t es el tiempo en horas y tiene como gráfica la siguiente representación:

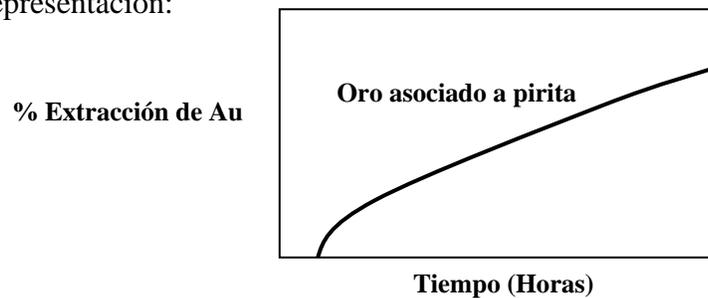


- Oro asociado a pirita:

El comportamiento en disolución de cianuro del oro asociado a estos minerales corresponde al tipo de ecuación matemática:

$$Au_{PIRITA} = a_2 + b_2 \sqrt{t}$$

Donde Au_{PIRITA} , es el porcentaje de oro asociado a estos minerales, a y b son constantes características del tipo de mena tratada, t es el tiempo en horas y tiene como gráfica la siguiente representación:

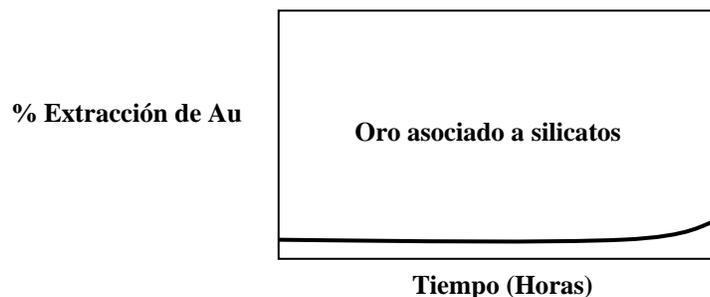


- Oro asociado a silicatos:

El comportamiento en disolución de cianuro del oro asociado a estos minerales corresponde al tipo de ecuación matemática:

$$Au_{SILICATOS} = e^{a_3 + b_3 \sqrt{t}}$$

Donde $Au_{SILICATOS}$, es el porcentaje de oro asociado a estos minerales, a y b son constantes características del tipo de mena tratada, t es el tiempo en horas y tiene como gráfica la siguiente representación:



Tomando como base toda la fundamentación teórica presentada en la figura 59, los conceptos de los investigadores de la Universidad de Stellenbosch (Sudáfrica), la caracterización mineralógica realizada a cada compuesto de mena y los resultados obtenidos en las pruebas de lixiviación diagnóstica, se procedió a fraccionar cada curva cinética de disolución de oro para los compuestos de cada tipo de mena, de forma que pudiese conjugarse la mineralogía con la extracción de oro para cada tipo de mena aurífera utilizando los datos de lixiviación diagnóstica, tal como se planteó en los objetivos del estudio. Una vez hecho esto, se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Correlaciones fraccionadas para el compuesto de Vetas:** Los ensayos de lixiviación diagnóstica para este compuesto reporta los siguientes porcentajes de asociación del oro: Oro libre expuesto (45.2 %), oro en polisulfuros y pirita (34.6 %), oro en silicatos (20.2 %). Con estos resultados, analizando la mineralogía del compuesto y el comportamiento de la curva de cianuración, se procedió a fraccionar esta curva de extracción vs tiempo para el compuesto de Vetas, obteniéndose las siguientes correlaciones:

- Oro libre: **Au Libre: $1.4875 + 35.08 T$** **$0 < T < 2$ horas**
 Coeficiente de correlación: 0.986

- Oro en Sulfuros de base metálica o polisulfuros (BMS):

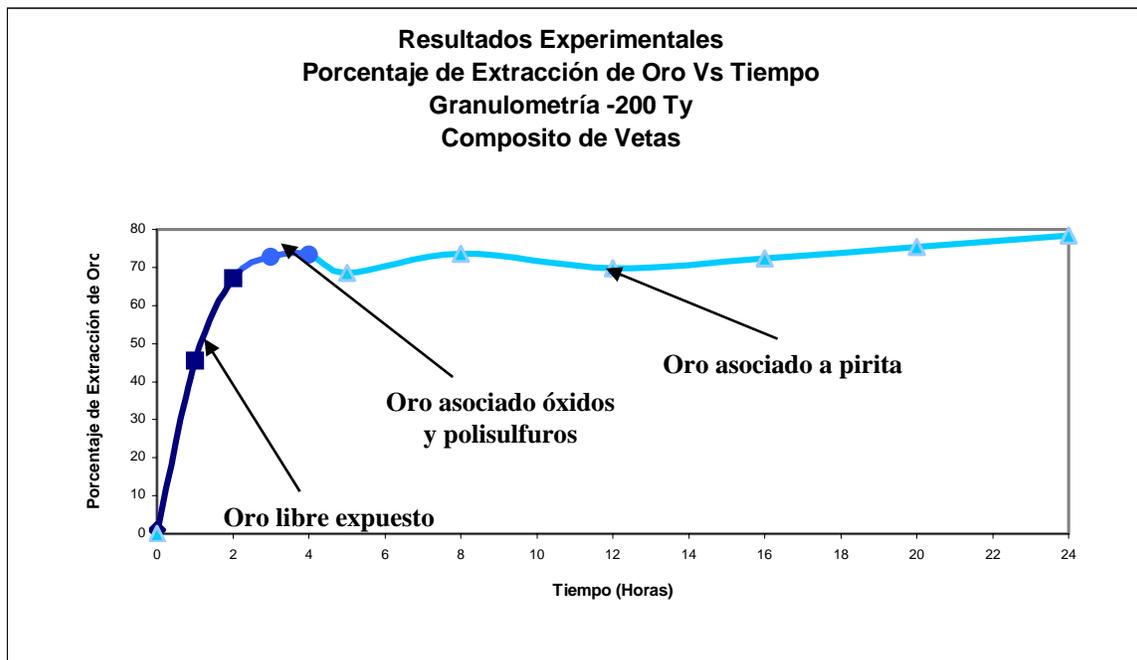
$$\text{Au}_{\text{BMS}}: 47.69 + 22.07 \ln T \quad 2 \leq T \leq 4 \text{ horas}$$

Coefficiente de correlación: 0.957

- Oro en pirita: $\text{Au}_{\text{pirita}}: 46.14 (T)^{0.164} \quad 5 \leq T \leq 24 \text{ horas}$

Coefficiente de correlación: 0.992

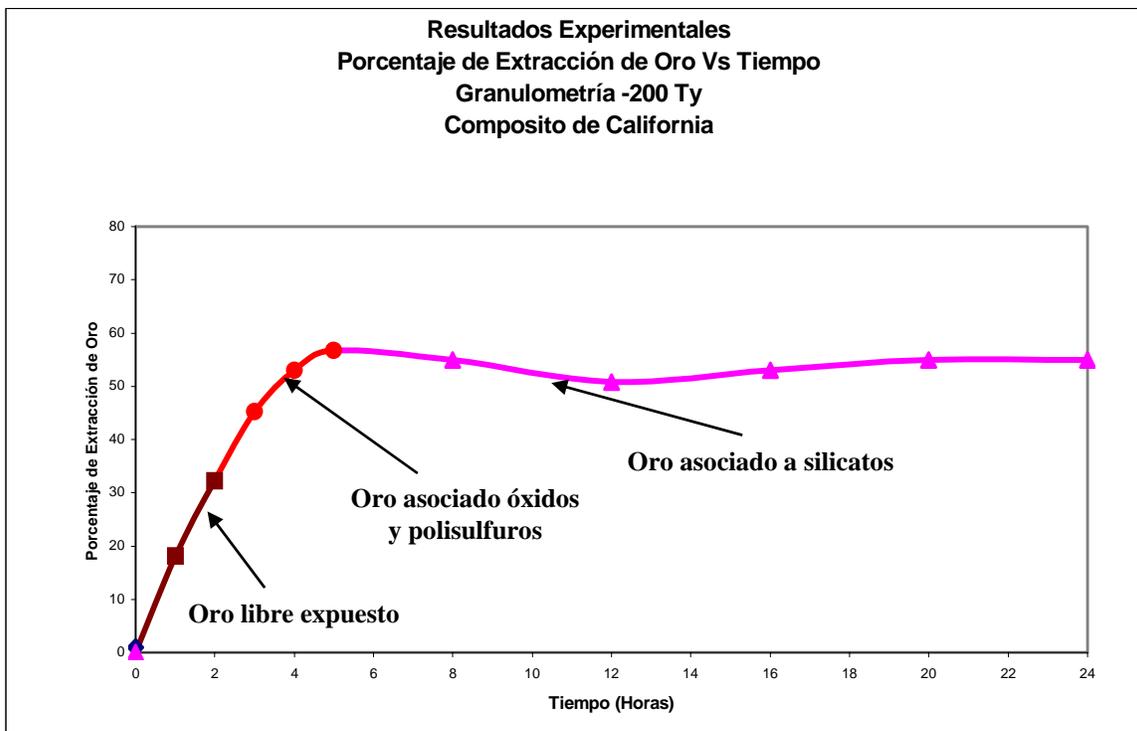
La curva fraccionada de extracción vs tiempo para este compuesto, es la siguiente:



- **Correlaciones fraccionadas para el compuesto de California:** Los ensayos de lixiviación diagnóstica para este compuesto reportan los siguientes porcentajes de asociación del oro: Oro libre expuesto (33.5 %), oro en polisulfuros (23.3 %), oro en silicatos (43.2 %). Con estos resultados, analizando la mineralogía del compuesto y el comportamiento de la curva de cianuración, se procedió a fraccionar esta curva de extracción vs tiempo para el compuesto de California, obteniéndose las siguientes correlaciones:

- Oro libre: **Au Libre: $7.92 + 3.0 T$** **$0 < T \leq 2$ horas**
Coeficiente de correlación: 0.936
- Oro en Sulfuros de base metálica o polisulfuros (BMS):
Au BMS: $15.176 + 26.21 \ln T$ **$2 \leq T \leq 5$ horas**
Coeficiente de correlación: 0.993
- Oro en silicatos: **Au silicatos: $47.14 (e)^{0.00675 T}$** **$5 < T \leq 24$ horas**
Coeficiente de correlación: 0.955

La curva fraccionada de extracción vs tiempo para este compuesto, es la siguiente:



6.4 MODELOS CINETICOS DE DISOLUCION

Tal como se describe en el capítulo 2 (Marco Teórico), existen diferentes tipos de modelos cinéticos teóricos de disolución de minerales, entre estos modelos, los más importantes y que acorde a los datos experimentales existentes se consideraron, fueron los siguientes modelos: Modelo de núcleo sin reaccionar, modelo de granos, modelo de poros uniformes, modelo de poros aleatorios y modelo homogéneo.

La mayor aceptación de estos modelos en cuanto al comportamiento cinético de los minerales en disolución, se ha logrado mediante la utilización de los modelos de núcleo sin reaccionar y particularmente, el modelo de grano, razón por la cual, el trabajo se basa en esta parte, en comprobar si efectivamente los resultados experimentales obtenidos de extracción de oro vs tiempo, obedece alguno de estos dos modelos.

- **Modelo de Núcleo Sin Reaccionar (que se contrae):** Este es el modelo cinético más ampliamente esparcido en la descripción de la cinética de reacción entre salida y fluido de partículas densas (no porosas).

Una de las ecuaciones de este modelo, describe un “Control difusional a través de una capa de ceniza”, con partículas esféricas de tamaño constante. Este modelo está descrito por:

$$1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X) = \frac{t}{\tau}$$

Donde X = Conversión de Au; τ = tiempo para reacción completa (min) y t = Tiempo (min). El modelo contempla entre sus características, que durante la lixiviación hay formación de una capa de “Cenizas” sobre la superficie de la partícula.

- **Modelo de Grano:** De acuerdo a este modelo, las partículas sólidas se consideran pellets consistentes de granos individuales y compactados juntos. Cada grano reacciona individualmente de acuerdo al patrón del núcleo sin reaccionar que se contrae. El reactivo

fluido difunde a través de los intersticios de los granos sólidos mientras tiene lugar la reacción.

Como resultado, el sólido reactante se agota progresivamente con un decremento gradual en la extensión de los granos sólidos a medida que avanza hacia el centro del pellet.

Cuando la difusión a través de los poros es el paso controlante, el modelo se ajusta a la siguiente ecuación, considerando partículas esféricas:

$$\frac{t^*}{\sigma^2} = 1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X)$$

Donde t^* y σ son dados por las siguientes ecuaciones:

$$t^* = \left(\frac{bKC_{A,g}}{\rho_m} \frac{A_g}{F_g V_g} \right) t$$

$$\sigma = \frac{R_p}{3} \left(\frac{3K(1 - \varepsilon)}{2D_e} \frac{A_g}{F_g V_g} \right)$$

Donde F_g es el factor de forma del grano, con valores de 1,2,3 para granos de forma plana, cilíndrica y esférica respectivamente. A_g y V_g son el área superficial externa (cm^2) y el volumen (cm^3) del grano; R_p es el radio del pellet (cm), ε es la porosidad del pellet (partícula) y K es la constante de velocidad de reacción ($mol/m^2 \cdot min$), $C_{A,g}$ es la concentración del fluido (mol/L), b es un factor estequiométrico de la ecuación general y ρ_m la densidad molar de las partículas sólidas (mol/cm^3).

Según el análisis de la literatura, en reacciones de lixiviación, donde hay un reactivo líquido intentando solubilizar valores metálicos contenidos en partículas, el paso controlante es la difusión de este reactivo a través de los poros. Ajustando las ecuaciones a la conversión (X) vs tiempo, se puede derivar la siguiente ecuación:

$$1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X) = \frac{6D_e}{R_p^2 \rho_m (1 - \varepsilon)} C_{A, promedio} t$$

Ecuación muy similar a la ecuación inicial del modelo de núcleo sin reaccionar, pero en la cual se incluyen parámetros y factores de gran influencia en el proceso de lixiviación y que permiten un mayor ajuste de datos.

Con base en estos conceptos, se procedió a comparar los resultados experimentales obtenidos de las pruebas de lixiviación (Porcentaje de extracción de oro vs Tiempo) para el tamaño de partícula (granulometría) de – 200 mallas Tyler (75 μm), por ser la granulometría en la cual se obtuvieron mejores resultados de extracción.

Para los cálculos realizados sobre la ecuación correspondiente al modelo de núcleo sin reaccionar, se tomó τ = tiempo para reacción completa, con un valor de 24 horas, debido a que este tiempo se consideró apropiado para el procesamiento de los minerales tratados a la granulometría indicada.

Para los cálculos correspondientes al modelo de grano, se han tomado los siguientes valores para las constantes de la ecuación:

- R_p , radio del pellet (cm): 33.5 μm (75 μm de diámetro promedio de partículas)
- ε , porosidad del pellet (partícula): 0.708 (valor teórico para estos minerales)
- $C_{A,g}$ concentración del fluido (mol/L): 0.04 mol/L, concentración del cianuro es 2 – 5 Kg / Ton. de Mineral
- ρ_m , densidad molar de las partículas sólidas (mol/cm^3): 0.042, (valor teórico)
- D_e , Difusividad del reactivo (cm^2/seg): 0.775×10^{-11} cm^2/seg , (valor teórico)

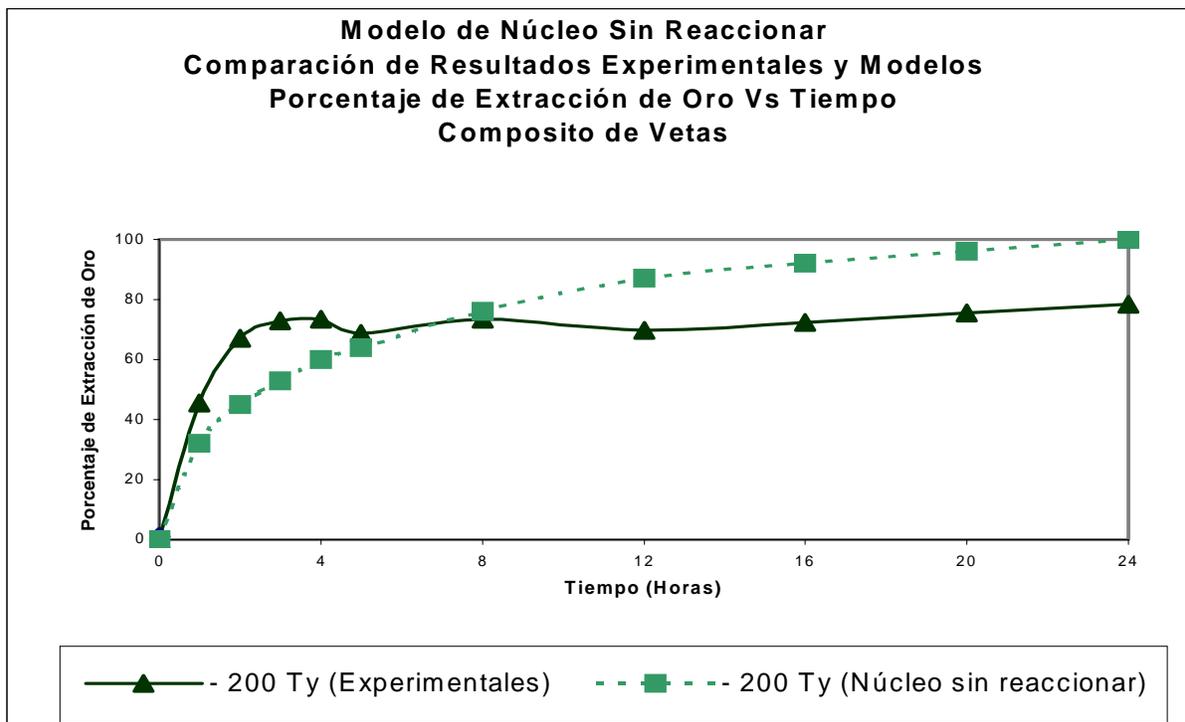
Tomando estos valores de constantes, se construyeron las siguientes comparaciones:

- Modelo de núcleo sin reaccionar:

**Tabla 55. Resultados experimentales vs modelo de núcleo sin reaccionar
Porcentaje de extracción de oro vs tiempo. D_{80} : - 200 Ty
Composito de Vetas.**

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Núcleo sin Reaccionar - 200 Ty
0	0	0
1	45.5	32
2	67.2	45
3	72.8	53
4	73.4	60
5	68.6	64
8	73.5	76
12	69.7	87
16	72.3	92
20	75.4	96
24	78.3	100

**Figura 60. Comparación de resultados experimentales vs modelo de núcleo sin reaccionar. Porcentajes de extracción de oro vs tiempo - 200 Ty
Composito de Vetas.**



**Tabla 56. Resultados experimentales vs modelo de núcleo sin reaccionar
 Porcentaje de extracción de oro vs tiempo. D_{80} : - 200 Ty
 Composito de California.**

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Núcleo sin Reaccionar - 200 Ty
0	0	0
1	18.18	32
2	32.3	45
3	45.2	53
4	53.03	60
5	56.81	64
8	55	76
12	50.8	87
16	53.03	92
20	55	96
24	55	100

**Figura 61. Comparación de resultados experimentales vs modelo de núcleo sin reaccionar. Porcentajes de extracción de oro vs tiempo - 200 Ty
 Composito de California.**

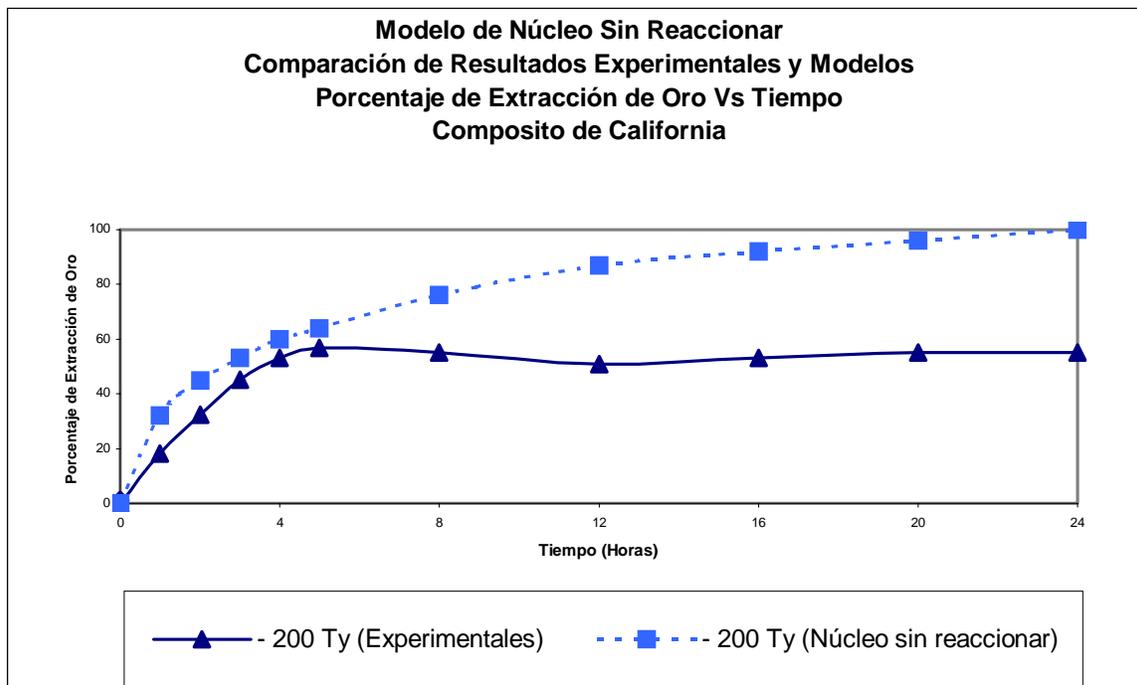


Tabla 57. Resultados experimentales vs modelo de núcleo sin reaccionar
Porcentaje de extracción de oro vs tiempo. D_{80} : - 200 Ty
Composito de Santa Rosa del Sur (Oxidos).

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Núcleo sin Reaccionar - 200 Ty
0	0	0
2	84.56	45
4	87.67	60
8	91.65	76
12	92.35	87
16	93.64	92
20	95.2	96
24	96.42	100

Figura 62. Comparación de resultados experimentales vs modelo de núcleo sin reaccionar. Porcentajes de extracción de oro vs tiempo - 200 Ty
Composito de Santa Rosa del Sur (Oxidos).

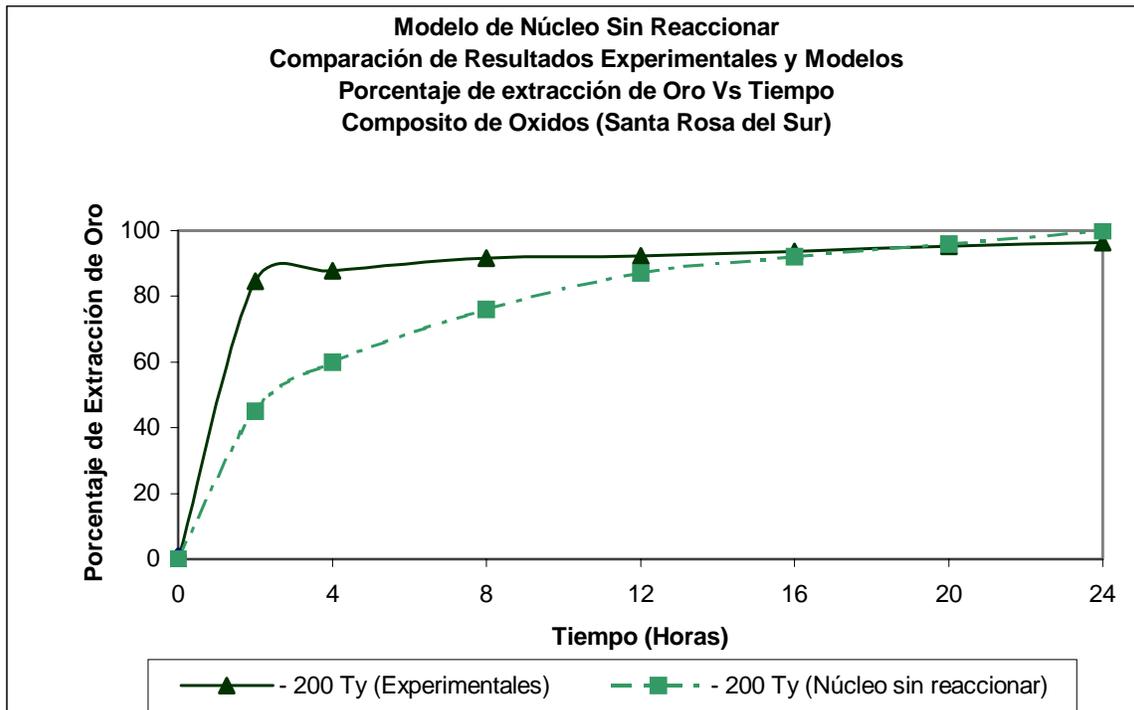
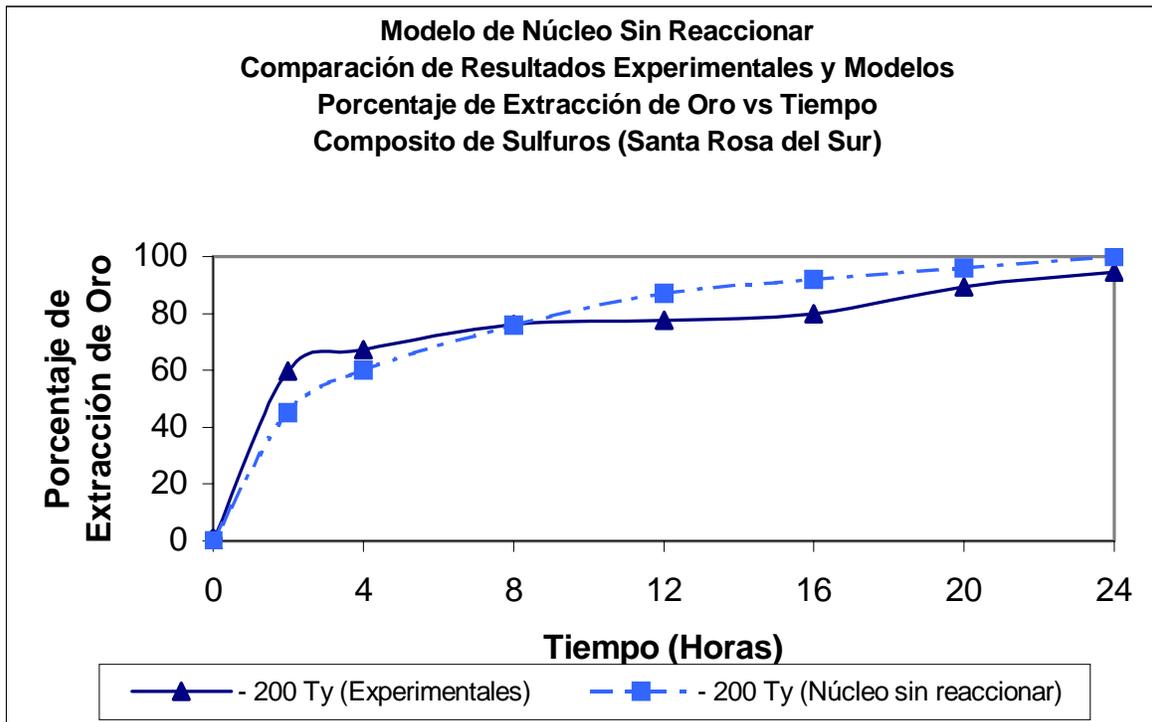


Tabla 58. Resultados experimentales vs modelo de núcleo sin reaccionar
Porcentaje de extracción de oro vs tiempo. D_{80} : - 200 Ty
Composito de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Núcleo sin Reaccionar - 200 Ty
0	0	0
2	84.56	45
4	87.67	60
8	91.65	76
12	92.35	87
16	93.64	92
20	95.2	96
24	96.42	100

Figura 63. Comparación de resultados experimentales vs modelo de núcleo sin reaccionar. Porcentajes de extracción de oro vs tiempo - 200 Ty
Composito de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).

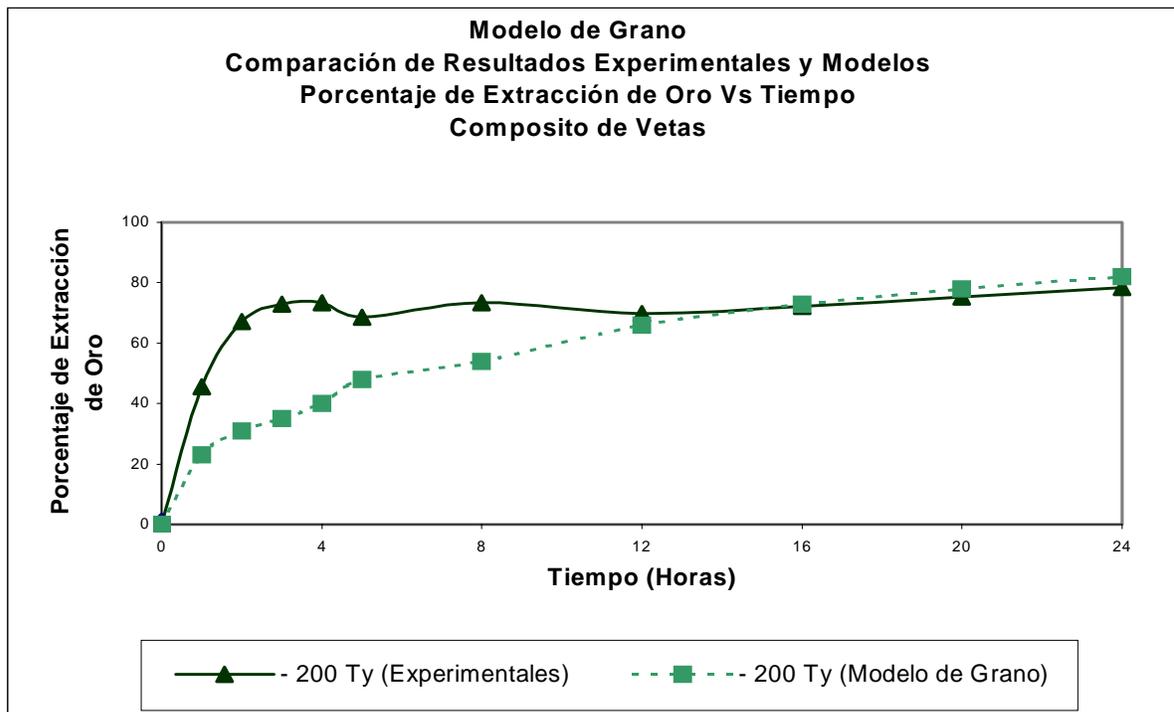


- Modelo de grano:

**Tabla 59. Resultados experimentales vs modelo de grano
Porcentaje de extracción de oro vs tiempo. D_{80} : - 200 Ty
Composito de Vetas.**

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Modelo de Grano - 200 Ty
0	0	0
1	45.5	23
2	67.2	31
3	72.8	35
4	73.4	40
5	68.6	48
8	73.5	54
12	69.7	66
16	72.3	73
20	75.4	78
24	78.3	82

**Figura 64. Comparación de resultados experimentales vs modelo de grano.
Porcentajes de extracción de oro vs tiempo - 200 Ty
Composito de Vetas.**



**Tabla 60. Resultados experimentales vs modelo de grano
Porcentaje de extracción de oro vs tiempo. D_{80} : - 200 Ty
Composito de California.**

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Modelo de Grano - 200 Ty
0	0	0
1	18.18	23
2	32.3	31
3	45.2	35
4	53.03	40
5	56.81	48
8	55	54
12	50.8	66
16	53.03	73
20	55	78
24	55	82

**Figura 65. Comparación de resultados experimentales vs modelo de grano.
Porcentajes de extracción de oro vs tiempo - 200 Ty
Composito de California.**

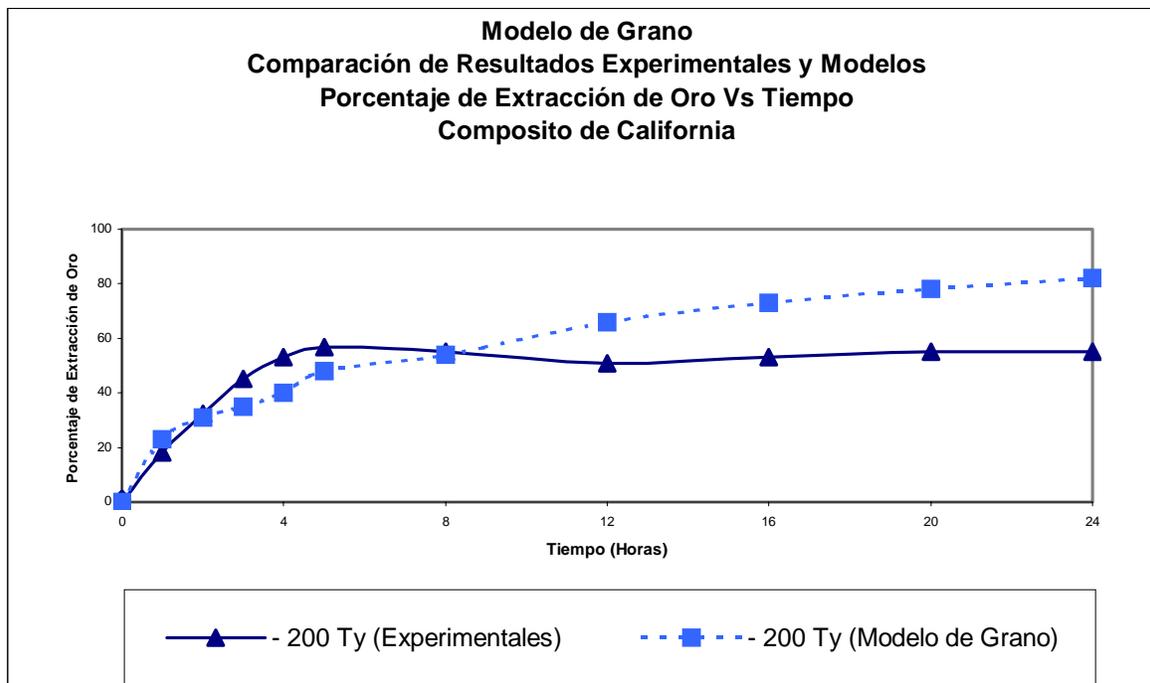


Tabla 61. Resultados experimentales vs modelo de grano
Porcentaje de extracción de oro vs tiempo. D_{80} : - 200 Ty
Composito de Santa Rosa del Sur (Oxidos).

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Modelo de Grano - 200 Ty
0	0	0
2	84.56	31
4	87.67	40
8	91.65	54
12	92.35	66
16	93.64	73
20	95.2	78
24	96.42	82

Figura 66. Comparación de resultados experimentales vs modelo de grano.
Porcentajes de extracción de oro vs tiempo - 200 Ty
Composito de Santa Rosa del Sur (Oxidos).

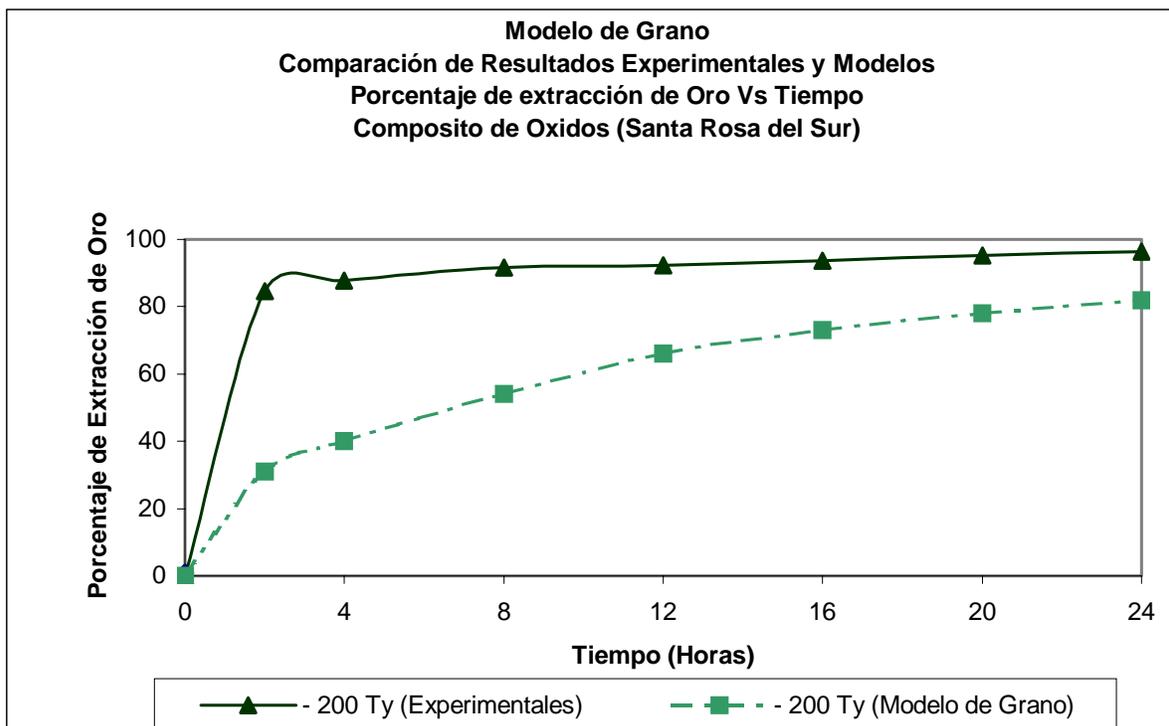
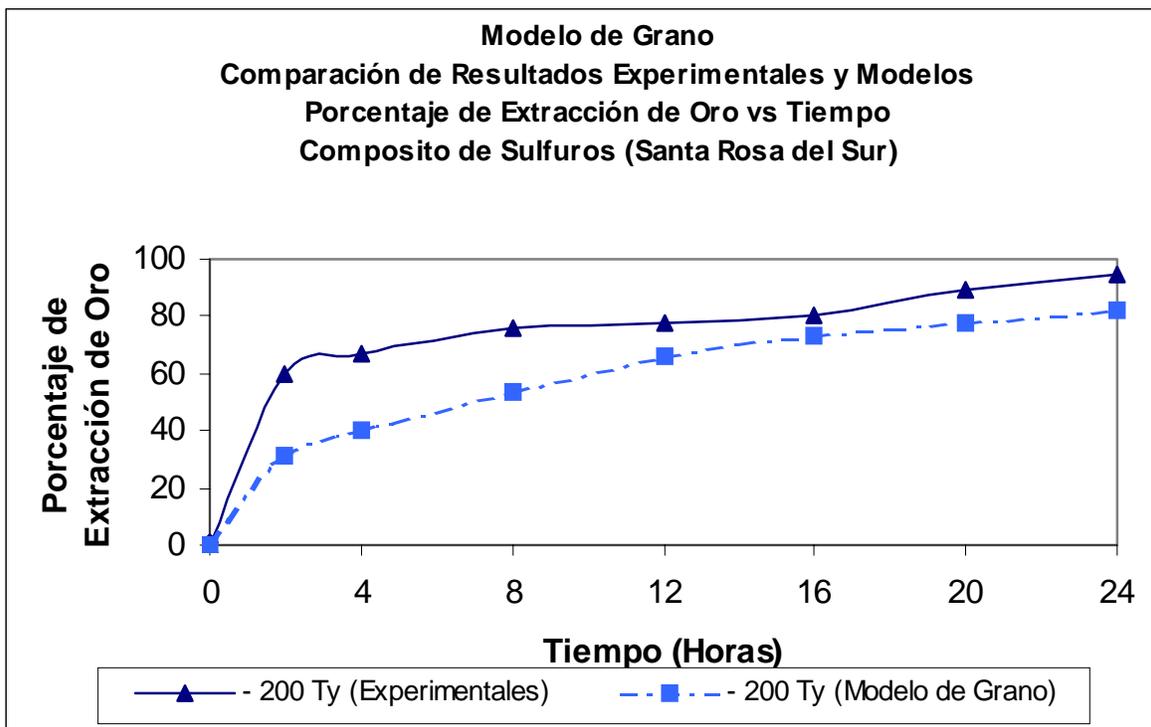


Tabla 62. Resultados experimentales vs modelo de grano
Porcentaje de extracción de oro vs tiempo. D_{80} : - 200 Ty
Composito de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (Horas)	Experimental - 200 Ty	Modelo de Grano - 200 Ty
0	0	0
2	59.75	31
4	67.36	40
8	76.11	54
12	77.54	66
16	79.98	73
20	89.32	78
24	94.55	82

Figura 67. Comparación de resultados experimentales vs modelo grano.
Porcentajes de extracción de oro vs tiempo - 200 Ty
Composito de Santa Rosa del Sur (Sulfuros).



6.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE CORRELACIONES Y MODELOS

Las diferentes correlaciones y comprobación de modelos cinéticos teóricos que se han desarrollado, corresponden al ajuste de datos experimentales obtenidos en pruebas de cianuración y lixiviación diagnóstica aplicadas a las diferentes menas minerales tratadas en este estudio. Al ajustar estos datos experimentales, se han producido ecuaciones matemáticas que permiten realizar cálculos sobre diferentes tamaños de partículas y prever los diferentes porcentajes de extracción de oro que pueden obtenerse de cada mena tratada en diferentes tiempos, cuando estas son sometidas a procesos de cianuración bajo las condiciones contenidas en esta investigación.

En el desarrollo de correlaciones sobre cada curva de cianuración (sección 6.1), puede observarse que la mayoría de las curvas cinéticas de extracción de oro vs tiempo, siguen una tendencia logarítmica, debido en gran parte a la rápida disolución del oro libre o expuesto para luego tomar una curva correspondiente a la disolución de óxidos y sulfuros metálicos y continuar con los sulfuros (pirita), este tipo de comportamiento descrito en la figura 59, se ajusta muy bien al comportamiento logarítmico, siendo este tipo de correlaciones, las que produjeron los mayores valores de coeficientes de correlación a diferentes tamaños de partículas para cada uno de los diferentes tipos de mena examinados.

En aquellas curvas correspondientes a datos experimentales de diferentes tamaños, tal como es el caso de las curvas de extracción para el composito de California (figura 44), aquellos valores que produjeron correlaciones tipo lineales o aun de potencias, muestran coeficientes de correlación muy bajos. Este tipo de respuesta, puede analizarse desde dos puntos de vista; el primero se hace asumiendo que la serie de datos experimentales no sigue un patrón o tendencia de una ecuación definida y su correlación es muy baja o segundo, es posible que aunque muestre una tendencia respecto a una ecuación de correlación, esta sea muy pobre y sólo logre ajustar un número bajo de datos.

Un hecho que reafirma el acierto en la selección del tamaño de 75 micrones (-200 Ty) como el tamaño al cual se producen los mejores resultados de extracción de oro para las condiciones impuestas a las menas tratadas, se refleja al observar que los resultados de las correlaciones de datos para este tamaño en las diferentes muestras, corresponde a los mas altos coeficientes de correlación, muy cercanos a la unidad, tal como se observa en las figuras 43, 44, 47 y 51, de los composito de Vetas, California, Santa Rosa del Sur (Oxidos y Sulfuros) respectivamente.

Puede entonces afirmarse que una correlación tipo logarítmica es adecuada para describir y prever el comportamiento metalúrgico que tendrán las menas de las regiones de Vetas, California y Santa Rosa del Sur, al ser sometidas a procesos de cianuración bajo las condiciones de trabajo utilizadas en esta investigación. Estas correlaciones obtenidas, han mostrado producir un coeficiente de correlación entre los datos experimentales y teóricos de las curvas de extracción de oro bastante altos y acordes a los datos experimentales.

Cuando se analiza detenidamente las correlaciones obtenidas para las curvas de cianuración de mayor porcentaje de extracción de oro y granulometría óptima de cada tipo de mena (sección 6.2), se encuentra el hecho que aunque las menas de Vetas y California no presentan una extracción de 100 % de los valores de metales preciosos contenidas en ellas, pues solamente se pudo extraer 78.3 % y 56.8 % respectivamente, del oro contenido en estas menas, también se observa que la correlación obtenida, describe muy bien la curva cinética y que además los coeficientes de correlación para estas dos menas, es bastante adecuado, estando por encima del 75 % del valor experimental para todos y cada uno de los valores teóricos calculados.

Para el caso de las menas de Santa Rosa del Sur, el caso es bastante diferente, estos minerales poseen una alta mineralización que pudo influir en el tamaño de poro de los minerales que la conforman, lo cual pudo influir en la extracción de casi el 100 % de los valores de metales preciosos contenidos en estas menas y al proceder al ajuste de los datos obtenidos, los coeficientes de correlación superan ampliamente el 95 % del máximo posible, evidenciando un ajuste bastante bueno y una muy buena descripción del

comportamiento en cianuración de estas menas a las condiciones de granulometría y concentración de reactivos especificadas.

Los resultados de las pruebas de cianuración diagnóstica de cada tipo de mena, en las cuales se determinó la presencia de diferentes matrices conteniendo el oro presente en estos minerales, también se hace evidente cuando en la sección 6.3, se desarrollaron correlaciones para la disolución de oro de diferentes matrices minerales. En esta sección, se encontró que el composito de Vetas, inicia con una disolución lineal del oro libre o expuesto que contiene, seguida por la disolución logarítmica posterior del oro contenido en los sulfuros de base metálica o polisulfuros y concluyendo con la disolución exponencial del oro contenido en la pirita.

El composito de California, sigue un comportamiento similar al composito de Vetas, pero con la diferencia de obtener menos extracción del oro que contiene y culminando la curva cinética con una correlación exponencial, debida a la presencia o atrapamiento de oro asociado con silicatos, especialmente cuarzo muy presente entre sus minerales de ganga.

En el fraccionamiento de las curvas de cianuración de las menas de Santa Rosa del Sur, se hizo necesario dividir estas correlaciones en dos, una correspondiente al oro libre o nativo y otra para el oro tipo electrum, puesto que esta era la información que mostraba los resultados de la lixiviación diagnóstica y la caracterización mineralógica de estas menas, por tanto se describió el comportamiento de estas menas en la cianuración, mediante el uso de dos correlaciones lineales, la primera correspondiente al oro libre nativo y la segunda para el oro tipo electrum, correlaciones que ajustaron bastante bien con los resultados experimentales y generaron altos coeficientes de correlación.

En cuanto a la comprobación de los modelos cinéticos teóricos para observar si posiblemente el comportamiento en cianuración de alguna de las menas tratadas obedecía el comportamiento descrito por los modelos cinéticos teóricos de núcleo sin reaccionar y de grano, la respuesta fue bastante negativa, al observar las curvas de extracción de cada tipo

de mena para los datos experimentales y los datos calculados a partir de los modelos tomados, se hace evidente la discrepancia o poca correlación entre datos.

En general los modelos descritos y tratados (núcleo sin reaccionar y grano), son modelos cinéticos que sugieren una curva de extracción donde se produce un aumento progresivo en el porcentaje de extracción con respecto al tiempo o dicho de otra forma presentan una curva normal o típica de cianuración, sin embargo como se mencionó en capítulos anteriores, los comportamientos de las menas de Vetas y California especialmente, no son nada típicas, razón por la cual no se esperaba concordancia de estas menas con el comportamiento descrito por los modelos cinéticos.

Para el caso del composito de Vetas, los valores calculados y las curvas son bastante diferentes, no se produce un acercamiento o concordancia entre estos, en ninguno de los datos y si se observa una clara separación con respecto al modelo de núcleo sin reaccionar, aunque en el modelo de granos, se tiene un comportamiento similar entre datos calculados y experimentales para tiempos mayores a 12 horas.

En cuanto al composito de California, ninguno de los dos modelos establecidos, ni el de núcleo sin reaccionar ni el de grano corresponde a su comportamiento, este material solo lixivía hasta cierto grado y posteriormente se estanca respecto a la extracción.

Las menas de Santa Rosa del Sur (Oxidos y Sulfuros), tampoco encontraron una descripción de su comportamiento al ser sometidas a cianuración en los modelos cinéticos tratados, estas menas presentan una disolución muy rápida de los valores de metales preciosos contenidos en ellas, hecho que se realiza en las primeras horas de cianuración, discrepando del comportamiento descrito por los modelos.

Aunque el comportamiento de ninguno de los tipos de menas estudiados corresponde con el descrito por los dos modelos cinéticos tratados, si se hace muy visible el perfeccionamiento o mayor grado de acercamiento al comportamiento de los minerales que presenta el modelo de grano, puesto que este modelo incluye en su formulación aspectos y parámetros que

hacen parte de la mineralogía de las menas tales como tamaño de partícula, tamaño de poro, y densidad molar, además de variables del proceso de cianuración como concentración del reactivo lixivante y su coeficiente de difusividad.

7. CONCLUSIONES

- De los resultados de la investigación realizada, se concluye que la mineralogía de cada una de las menas estudiadas es intrínseca a cada una y conserva una relación directa con su comportamiento metalúrgico en los procesos de lixiviación (cianuración), debido precisamente al tipo de minerales y asociaciones de estos presentes, de tal forma que esta relación entre respuesta metalúrgica a la lixiviación y mineralogía, puede ser expresada mediante correlaciones matemáticas o modelamiento.
- En el procesamiento de los composito de menas analizadas, se encontró que la mayor disolución de oro en periodos de 24 horas, se presenta en la granulometría correspondiente a – 200 mallas Tyler (75 μm), este comportamiento se evidencia en las gráficas correspondientes a porcentajes de extracción de oro vs tiempo para diferentes granulometrías de los diferentes compositos, pero aunque estas afirmaciones son validas y parecen ser muy lógicas, también debe notarse que en algunas muestras (Compositos de Santa Rosa del Sur), se observa que granulometrías por encima de este tamaño(>75 μm), también reportan altas disoluciones de oro comparables a las máximas obtenidas en granulometría menor y en tiempos igualmente comparables, pero sin llegar en ningún momento a sobrepasar la extracción obtenida en el tamaño de 75 μm , lo cual reafirma este tamaño de partícula (200 Ty) como óptimo para lograr mayor porcentaje de extracción de oro de cada tipo de mena estudiada.
- Al analizarse las curvas de porcentaje de extracción de oro vs tiempo para diferentes composito y en diferentes granulometrías (Curva Cinética a diferentes tamaños de partícula) de todos los composito, puede decirse que un tiempo empleado de 24 horas para tratar estas menas mediante cianuración es bastante apropiado, debido a que tiempos mayores o prolongados no reportan aumento en el porcentaje de extracción de oro de estos composito y por el contrario si reportan aumento en consumo de cianuro y

aun disminución en el porcentaje de extracción de oro, posiblemente debido al efecto de atrapamiento de las partículas del metal por arcillas, recubrimiento de óxidos metálicos o material carbonaceo.

- Aun cuando la teoría afirma que una curva normal de cianuración de disolución de oro vs tiempo, a unas condiciones de temperatura, presión y concentración de cianuro dadas y constante, debe presentar un aumento en el porcentaje de disolución a medida que aumenta el tiempo, hasta llegar a cierto límite que no puede ser superior al 100 % y a menos que se presenten precipitaciones, en todas las pruebas de lixiviación vs tiempo de los diferentes composito de menas, se encontró que la curva de disolución presenta aumento y disminución en el porcentaje de extracción de oro con el tiempo, llegando en algunos casos a estabilizarse a tal punto que no aumenta sino que disminuye. Este tipo de comportamiento, es muy frecuentemente asociado a la presencia de arcillas y materiales carbonaceos, que en algunos casos trabajan como intercambiadores iónicos y son capaces de absorber el oro presente en la solución cianurada rica en este metal.
- Se concluye que una correlación tipo logarítmica es adecuada para describir y prever el comportamiento metalúrgico que tendrán las menas de las regiones de Vetas, California y Santa Rosa del Sur, al ser sometidas a procesos de cianuración bajo las condiciones de trabajo presentadas. Estas correlaciones obtenidas, han mostrado producir un coeficiente de correlación bastante alto entre los datos experimentales y teóricos de las curvas de extracción de oro, con valores muy cercanos a la unidad y acordes a los datos experimentales.
- Los mayores coeficientes de correlación se presentaron para el tamaño de partículas de 75 μm y corresponden al composito de óxidos de Santa Rosa del Sur (0.994), seguido del composito de sulfuros (0.979), el composito de California (0.807) y finalmente el composito de Vetas (0.75). la ecuación de correlación que mejor ajusto los datos experimentales en todos estos composito, correspondió a la ecuación tipo logarítmico.

- En la evaluación de los resultados obtenidos del estudio realizado, se verificó (sección 6.4), que el comportamiento metalúrgico de las menas y minerales estudiados, no obedece el comportamiento cinético de ninguno de los modelos cinéticos teóricos objeto de comprobación (núcleo sin reaccionar y grano), sin embargo dentro de esta limitante, es mayor el grado de concordancia que ofrece el modelo de grano que el modelo de núcleo sin reaccionar, debido tal vez a la inclusión de parámetros y variables de mineralogía y procesamiento en la formulación del modelo de grano.

- En forma general se concluye, que la lixiviación diagnóstica es una herramienta muy valiosa para el metalurgista en la toma de decisiones respecto a los procesos de tratamientos de minerales, puesto que le permite contrastar la información obtenida de otros estudios mineralógicos y determinar la asociación que puede existir de las partículas de oro con minerales en particular y explicar el comportamiento de ciertos materiales en procesos con un mayor entendimiento de causa.

- Se considera entonces, que el desarrollo de correlaciones matemáticas y la comprobación de modelos cinéticos teóricos que se ha obtenido en esta investigación, conjugan de manera apropiada la caracterización mineralógica, la mineralogía de procesos y los datos de lixiviación diagnóstica de los diferentes minerales auríferos de las zonas mineras de Santa Rosa del Sur (Bolívar) y Vetas y California (Santander del sur) con el grado de extracción de oro de estos minerales, de forma que estas correlaciones permiten predecir el comportamiento de estos minerales al ser sometidos a procesos de lixiviación (cianuración), particularmente en lo referente a los porcentajes de extracción de oro que pudiesen obtenerse de estos.

8. RECOMENDACIONES

Como una forma de permitir la continuidad de investigación en el área y realizar futuros trabajos en esta línea, el autor expresa las siguientes recomendaciones:

- Realizar investigación sobre los diferentes productos que se forman durante el proceso de lixiviación de estas menas, de forma que se comprenda en mayor escala su comportamiento en cianuración, a la vez que se presenten registros o evidencias (microfotografías) de la mineralogía o la forma en que evoluciona durante el procesamiento a las condiciones de trabajo y durante la lixiviación diagnóstica.
- Investigar sobre la mejor forma de aumentar los porcentajes de extracción de los valores de metales preciosos contenidos en menas como vetas y California, donde una opción propuesta podría ser realizar tratamientos previos a estas menas, con el fin de atacar o destruir las matrices tipo silicatos y sulfuros que pudiesen estar reteniendo el oro o proporcionando refractariedad a estas menas.
- Formular trabajos similares a este, con minerales auríferos diferentes o de otras regiones mineras, de forma que pueda pensarse en una generalización de las ecuaciones de correlación en la medida de lo posible e incluir en su formulación tecnologías del tipo redes neuronales o lógica difusa, que parece ser la tendencia en el mundo desarrollado dentro de esta área y para lo cual se requerirá gran número de datos e información de trabajos experimentales.
- Transferir los resultados del estudio al sector minero industrial y artesanal, de manera que estos puedan ser aprovechados y el minero conozca, así sea en una forma teórica aproximada cual es la composición mineralógica del mineral que explota y cual será el comportamiento metalúrgico de este mineral cuando sea sometido a procesos de extracción tipo cianuración.

BIBLIOGRAFIA

1. CARDOZO, Ana. Informe geológico “Mejoramiento de los procesos de beneficio de minerales auríferos en los municipios de Vetas y California”. Grupo de Investigación en minerales, biohidrometalurgia y ambiente, UIS. 2002.
2. NARVAEZ, Martín. Informe geológico Minercol – Alcaldía de Santa Rosa del Sur (Bolívar).
3. GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MINERALES BIOHIDROMETALURGIA Y AMBIENTE, UIS. Informe final “Mejoramiento de los procesos de beneficio de metales preciosos en el Sur de Bolívar”. UIS, 2002.
4. LORENZEN, Leon. Some guidelines to the desing of a diagnostic leaching experiment. Minerals Engineering, vol. 8, 1995. Elsevier.
5. PETRUK, W. Mineralogical evaluations of gold recoveries by extractive metallurgy techniques. Process mineralogy. New York, Edit.Richard Hagni, 1995.
6. PETRUK, W. Some relationship between mineral textures and extractive metallurgy process mineralogy. New York, Edit. Hagni, 1995.
7. VAN DEVENTER, Jani.S. The interrelationship between mineral liberation and leaching behaviour. Mineral Processing, Vol. 41, 1994.
8. PETERSEN, K. The use of neural network analysis of diagnostic leaching data. University of Stellenboch, South Africa, 1995.

9. SOCIETY OF MINING ENGINEERS, AIME. Mineral processing handbook. New York,1985.
10. KAUTZMAN Y MILTZAREK. Tratamiento de minerios. CETEM 1998.
11. SOCIETY OF MINING ENGINEERS, AIME. Mineral processing handbook. New York,1985., pag. 13 – 25.
12. LORENTZEN, Leon Y ANNANDALE, G. Interrrelationship between mineral liberation and leaching behaviour of refractories ores, ICAM 1996.
13. PAPANGELAKIS, Vladimiro. Leaching of ores: Chemistry and kinetics. University of Toronto, 1999.
14. SZEKELY, Julian. Gas solid reactions. Plenum press. 1979.
15. LORENTZEN, Leon y ANNANDALE, G. Interrrelationship between mineral liberation and leaching behaviour of refractories ores. Dpt. Of chemical Engineering, University of Stellenbosch (South Africa), 1996.
16. CÁRDENAS, Agustín. Metalurgia extractiva del oro. Bolivia: imprenta offset “Imral” Ltda., 1990.
17. HABASHI, Fathi. Principles of extractive metallurgy. New York, Gordon and Breach, 1960.
18. GARCÍA, Ismael. Importancia de la metalúrgica teórica en el desarrollo de proyectos de investigación tecnológica en metalurgia extractiva. Tesis de grado de maestría en Ingeniería Metalúrgica, UIS, 1999. Bucaramanga.

19. LÓPEZ, María Esperanza. La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de los minerales auroargentíferos. Tesis de Grado de Maestría en Ingeniería Metalúrgica, UIS, 1999, Bucaramanga.
20. WADSWORTH, Milton E. Rate processes of extractive metallurgy. New York, Plenum press, 1979.
21. GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MINERALES, BIOHIDROMETALURGIA Y AMBIENTE, UIS. Diagnostico preliminar del procesamiento de minerales auroargentíferos en el asentamiento minero de San Pedro Frío y su área de influencia, 2001.
22. ANNANDALE, G. J. Neural net analysis of the liberation of gold using diagnostic leaching data. Mineral Engineering, vol. 9, 1996. Elsevier.
23. TUMILTY, J. A. Diagnostic leaching in the development of flowsheets for new ore deposits. International symposium of gold metallurgy Canada, 1987.
24. INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. Minería Química. 1991.
25. HAUSEN, D. Characterizing the textural features of gold ores for optimizing gold extraction. Journal of mining, Vol. 52, pag. 14. Abril 2000. New York.
26. RONG – YU WAN. Importance of metallurgical research on refractory gold ore processing. Mining Engineering, Vol 53, pag. 41, Noviembre 2001, littleton.
27. CASTROVIEJO, R. Microscopic digital image of gold ores: A critical test of methodology mineral and metallurgical processing. Vol 19, pag 102. Mayo 2002, littleton.
28. CHEN, T. Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues. Journal of mining, Vol 54, pag 20, diciembre 2002. New York.