

03800
15



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFISICA**

**CARACTERIZACION MINERALOGICA Y FISICO-
QUIMICA DEL MINERAL DE FIERRO "NORMAL"
Y "AMORFO", DEL YACIMIENTO DE "PEÑA
COLORADA", ESTADO DE COLIMA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS (GEOLOGIA)**

P R E S E N T A:

MARIA DE LA LUZ RIVAS SANCHEZ



MEXICO. D. F. CIUDAD UNIVERSITARIA, 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



Universidad Nacional Autónoma de México

Of. No. PCT/JOCE/75/01

Asunto: Asignación de jurado para examen de grado.

MARIA DE LA LUZ RIVAS SANCHEZ

Estudiante de Doctorado
Facultad de Ciencias
Presente,

El Comité Académico del Posgrado, reunido en sesión ordinaria el 16 de enero del año en curso, aprobó a los siguientes investigadores como su jurado de examen de grado para defender la Tesis titulada "Caracterización mineralógica y fisicoquímica del mineral de fierro "normal" y "amorfo" del yacimiento Peña Colorada, Estado de Colima":

| | |
|-------------------------------|------------|
| Dr. Fernando Ortega Gutiérrez | Presidente |
| Dr. Liberto de Pablo | Vocal |
| M. en C. Margarita Reyes | Vocal |
| Dr. Raymundo Martínez Serrano | Vocal |
| Dr. Luis Alva Valdivia | Secretario |
| Dr. Dr. Alejandro Carrillo | Suplente |
| Dr. Avto Gogutchaisvili | Suplente |

Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 16 de enero del 2001.
EL COORDINADOR DEL PROGRAMA

DR. J. OSCAR CAMPOS ENRIQUEZ

c.c.p. Tutor
c.c.p. Miembros del Jurado

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIRCUITO INVESTIGACION, MEXICO, D.F., 04510
TELS. 56 22 41 30, 56 22 43 24 FAX. 56 22 40 97 E-mail: coord@anahuac.igeofcu.unam.mx

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CONTENIDO

| | Pag. |
|--|------|
| AGRADECIMIENTOS | 7 |
| RESUMEN | 9 |
| 1. ANTECEDENTES | 11 |
| 2. OBJETIVO | 12 |
| 3. MÉTODOS DE TRABAJO | 12 |
| 4. LOCALIZACIÓN | 14 |
| 5. GEOLOGÍA REGIONAL | 14 |
| 5.1. Geología Estructural y Estratigráfica. | 14 |
| 6. YACIMIENTOS MINERALES | 18 |
| 7. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y FISICOQUÍMICA DEL MINERAL DE FIERRO “NORMAL” Y “AMORFO” | 20 |
| 7.1. Descripción Megascópica preliminar | 20 |
| 7.1.1. Mineral “Normal” | 20 |
| 7.1.2. Mineral “Amorfo” | 22 |
| 7.2. Análisis químico cualitativo y cuantitativo para el Mineral “Normal” y el Mineral “Amorfo” | 23 |
| 7.2.1. Análisis cualitativo por Espectrografía de Emisión y Fluorescencia de Rayos X. | 23 |
| 7.2.2. Análisis químico cuantitativo elemental por Espectrografía de Plasma . | 24 |
| 7.2.3. Análisis químico cuantitativo elemental y compuestos químicos por Vía Húmeda y Técnicas Instrumentales. | 25 |
| 7.3. Análisis por Difracción de Rayos X del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo” | 26 |
| 7.4. Estudio Petrográfico del Mineral “Normal” | 27 |
| 7.4.1. Descripción Megascópica | 27 |
| 7.4.2. Descripción Microscópica | 27 |

| | pág. |
|--|-----------|
| 7.5. Estudio Minerográfico del Mineral “Normal” | 30 |
| 7.5.1. Descripción Microscópica | 30 |
| 7.6. Paragénesis del Mineral “Normal” | 34 |
| 7.7. Estudio Petrográfico del Mineral “Amorfo” | 38 |
| 7.7.1. Descripción Megascópica | 38 |
| 7.7.2. Descripción Microscópica | 38 |
| 7.8. Estudio Minerográfico del Mineral “Amorfo” | 44 |
| 7.8.1. Descripción Microscópica | 45 |
| 7.9. Paragénesis del Mineral “Amorfo” | 47 |
| | |
| 8. ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS | 51 |
| | |
| 8.1. Difracción de rayos x de las Cloritas | 52 |
| 8.1.1. Antecedentes | 52 |
| 8.1.2. Objetivo | 52 |
| 8.1.3. Método de trabajo y desarrollo | 55 |
| 8.1.4. Clasificación de la Clorita del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo” | 57 |
| 8.1.5. Resultados de la clasificación de la Clorita del Mineral “Normal” y el Mineral “Amorfo” por Difracción de Rayos X. | 58 |
| 8.1.6. Conclusiones de la clasificación de la clorita del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo” por Difracción de Rayos X | 63 |
| | |
| 8.2. Análisis al Microscopio de Polarización con Luz Trasmítida de las Cloritas del Mineral “Normal” y el Mineral “Amorfo” | 64 |
| 8.2.1. Antecedentes | 64 |
| 8.2.2. Objetivo | 64 |
| 8.2.3. Método de trabajo | 64 |
| 8.2.4. Propiedades Ópticas de la Chamosita del mineral “Normal” | 65 |
| 8.2.5. Composición Química de la Chamosita del mineral “Normal” | 66 |
| 8.2.6. Propiedades Ópticas de la Bertierina del mineral “Amorfo” | 69 |
| 8.2.7. Composición Química de la Bertierina del mineral “Amorfo” | 70 |
| 8.2.8. Conclusiones del Análisis al Microscopio de Polarización con Luz Trasmítida de la Clorita del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo” | 74 |

| | pág. |
|--|------------|
| 8.3. Difracción de Rayos X de la Magnetita del Mineral “Normal” y la Magnetita del Mineral “Amorfo” | 75 |
| 8.3.1. Objetivo | 75 |
| 8.3.2. Método de trabajo | 75 |
| 8.3.3. Resultados | 75 |
| 8.3.4. Conclusiones de la Difracción de Rayos X de la Magnetita del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo” | 75 |
| 8.3. Análisis Térmico Diferencial y Gravimétrico de la Clorita y Magnetita del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo” | 77 |
| 8.4.1. Objetivo | 77 |
| 8.4.2. Método de trabajo | 77 |
| 8.4.3. Resultados del Análisis Térmico Diferencial y Gravimétrico de la Clorita y Magnetita del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo” | 78 |
| 8.4.4. Conclusiones del Análisis Térmico Diferencial y Gravimétrico de la Clorita y Magnetita del Mineral “Normal” y el Mineral “Amorfo” | 88 |
| 8.5. Estudio por Espectroscopia Mössbauer | 89 |
| 8.5.1. Antecedentes | 89 |
| 8.5.2. Introducción | 90 |
| 8.5.3. Objetivos | 91 |
| 8.5.4. Método de trabajo | 92 |
| 8.5.5. Resultados | 92 |
| 8.5.6. Perspectiva Metalogenética del yacimiento de fierro de “Peña Colorada” | 94 |
| 8.5.7. Conclusiones | 94 |
| 8.6. Análisis por Microsonda Electrónica de Barrido de la Magnetita y Clorita del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo” | 95 |
| 8.6.1. Objetivo | 95 |
| 8.6.2. Método de trabajo | 95 |
| 8.6.3. Resultados por Microsonda Electrónica de Barrido | 96 |
| 8.6.4. Conclusiones de los resultados obtenidos en el Análisis por Microsonda Electrónica de Barrido | 105 |
| 8.7. Microscopía de Fuerza Magnética | 106 |
| 9. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y FISICOQUÍMICA DE PRODUCTOS METALÚRGICOS DEL MINERAL “NORMAL” Y MINERAL “AMORFO” COMO APOYO A LA INVESTIGACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN METALÚRGICA | 112 |

| | pág. |
|--|------|
| 9.1. Condiciones de Operación estipuladas | 113 |
| 9.2. Análisis Químico Cuantitativo de elementos y compuestos de interés | 114 |
| 9.3. Análisis de Liberación de Magnetita en apoyo a la Investigación y Experimentación Metalúrgica | 115 |
| 9.4. Interpretación sobre la Liberación de la Magnetita del Mineral "Normal" con respecto a la del Mineral "Amorfo" | 116 |
| 9.5. Interpretación sobre la influencia de las Características Mineralógicas y Texturales que afectan el grado de Liberación de la Magnetita | 122 |
| 10 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES | 124 |
| 10. 1. Perspectiva Metalogenética. | 137 |
| 11 REFERENCIAS | 139 |

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero reconocimiento y agradecimiento al Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada y en especial al Ing. Miguel Ramos, Director de Tecnología, del C M B J, "Peña Colorada", por brindarme su confianza y apoyo, por su gran interés, colaboración y entusiasmo que ha mostrado siempre, para llevar a cabo el desarrollo de la caracterización e investigación del Mineral de hierro de Peña Colorada (Mineral "Normal" y Mineral "Amorfo"), lo que me permitió tener una conciencia clara, de la gran importancia que tiene el conocimiento de la naturaleza mineralógica y fisicoquímica, de ambas menas de hierro y sus implicaciones en su beneficio metalúrgico, dejando huella, su atinada frase: *"La minería llega hasta donde la metalurgia lo permite"*. Con agradecimiento también por permitirme consultar y tomar información de los estudios realizados sobre la Caracterización Mineralógica y Fisicoquímica del yacimiento.

Así también con aprecio y agradecimiento a los investigadores e ingenieros de la Mina, Planta Concentradora y Planta Peletizadora de Peña Colorada, en especial a los Ings. Jesús Enciso y Héctor Ruiz, con quienes he trabajado en forma estrecha, por su confianza e interés para seguir en el estudio y conocimiento del mineral "Normal" y Amorfo".

Con afecto y agradecimiento al Dr. Luis M. Alva Valdivia, asesor en la realización de este estudio, por sus acertadas sugerencias, observaciones, su valioso tiempo invertido y atinada aportación y dirección en la aplicación del Microscopio de Fuerza Atómica. Por el ánimo y el entusiasmo que me brinda siempre, pero sobre todo por su gran calidad humana, factores que influyeron en mí para dar seguimiento a la conclusión de esta tesis y continuar estudiando.

A las autoridades del Instituto de Geofísica y Comité Académico del Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM, en especial al Dr. J. Oscar Campos Enríquez, por brindarme la oportunidad de presentar este trabajo de tesis, su valioso apoyo y confianza, para continuar mis estudios de posgrado,

Al Dr. Jesús Soberón Mobarak, Gerente de los Laboratorios del Consejo de Recursos Minerales (C. R. M.), con aprecio y agradecimiento por sus interesantes comentarios y apoyo en la realización de este trabajo de tesis, por su valiosa aportación en los estudios de Espectroscopia de Mössbauer, que con ayuda del Dr. Noel Nava Entzana, del Laboratorio Mössbauer del Instituto Mexicano del Petróleo, nos permitió contar con los espectros Mössbauer correspondientes y ampliar el conocimiento sobre la magnetita de "Peña Colorada", agradezco enormemente su valiosa ayuda.

Al Ing. Rolando Nieto Gutiérrez, Jefe del laboratorio del Centro Experimental Tecamachalco del C. R. M., su importante apoyo para el uso del equipo instrumental y sus valiosos comentarios sobre la investigación realizada..

Al Ing. Ernesto Aguilera Torres, Q. I. Gloria Ayala Rojas, Q. Angel Ruiz Ramos, al Sr. Juan Fierros López, Ing. Juan Carlos Ruiz, Sr. Jorge Soto, Ing. Gregorio Medina García, Ing. Flor de María Harp, Ing. José Antonio González, Ing. Raúl Galván Vergara, Sr. Arturo (biblioteca IG) y M.C. Beatriz Rivas, a todos ellos mi reconocimiento y agradecimiento por su valiosa ayuda y comentarios.

Al Dr. Hugo Delgado, M.C. Margarita Reyes y M.C. Carlos Linares, por su valiosa ayuda en el estudio de los minerales de Peña Colorada, a través de la Microsonda Electrónica de Barrido del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Al Dr. José Saniger y al M.C. José Guadalupe G., por su apreciable apoyo en la aplicación y obtención de resultados, a través del Microscopio de Fuerza Atómica del Instituto de Investigación de Materiales de la UNAM.

A mi jurado de examen: Dr. Fernando Ortega Gutiérrez, Dr. Liberto de Pablo, M. C. Margarita Reyes, Dr. Raymundo Martínez Serrano, Dr. Alejandro Carrillo y Dr. Avto Gognichaishvili, que aportaron su valioso tiempo en la revisión de este estudio, por sus comentarios y apoyo para concretar esta investigación.

A todas aquellas personas que de una u otra manera me ayudaron durante la realización de este estudio, también mi agradecimiento.

MEMORIA DE:

ING. ARMANDO RUIZ, Investigador de la Planta Concentradora de Peña Colorada (1973 – 1989), por su gran preocupación e interés, en resolver y dar una solución viable a la concentración del mineral “Amorfo”. Admiré en él su constancia y dedicación.

ING. OTHÓN COLÍN Jefe de Geología de Peña Colorada (1983 – 1990), por su valiosa colaboración en el estudio del mineral “Normal” y mineral “Amorfo”.

RESUMEN

La mena de hierro de Peña Colorada, ha sido uno de los yacimientos de hierro más importantes en el país, tradicionalmente se le conoce como una mena de magnetita, rica en hierro y noble al beneficio metalúrgico. A partir de 1987 al avance de la explotación minera, se descubre una nueva mena de magnetita con características muy particulares, que difieren notablemente del mineral tradicional, a esta nueva mena de hierro se le llamo Mineral "Amorfo" distinguiéndolo de la mena de hierro ya conocida, a la cual se le dio el nombre de Mineral "Normal".

En este estudio se efectuó la caracterización de las dos menas de hierro de Peña Colorada desde el punto de vista mineralógico, geoquímico, físico, petrográfico y minerográfico, con el objeto principal de conocerlas, para llegar a determinar su origen y ambiente de formación, aspectos fundamentales en la planeación de la exploración, explotación y optimización de su beneficio metalúrgico.

El conocimiento de estas características mineralógicas, proporcionó información sobre el grado de liberación de la magnetita, que esta relacionada con su tamaño de grano, forma, asociación mineralógica y relación textural con los minerales de ganga, lo que permitió optimizar el proceso metalúrgico en la planta de concentración magnética, así como una mejor planeación en la explotación del yacimiento y su interacción de alimentación mineral con la planta.

El Mineral "Normal" está representado por magnetita masiva y magnetita diseminada. La magnetita está en cristales bien desarrollados que llegan a medir hasta 7 mm. La roca encajonante es un hornfels feldespático con piroxenos y hornblenda, en algunas muestras predominan los piroxenos y el granate. El mineral "Normal" es afectado por hidrotermalismo posterior al pirometasomatismo, caracterizado por la depositación de magnetita en vetas, seguida por cuarzo, apatito, calcita, pirita, calcopirita, pirrotita, galena, marmatita y covelita, que le dan a la roca huésped (hornfels) un aspecto brechado. Los minerales de alteración hidrotermal están limitados en algunas zonas a chamosita, epidota, sericita y minerales arcillosos.

El Mineral "Amorfo" se diferencia del primero, porque la magnetita es de grano muy fino, tamaños entre 50 micrones y a veces menores de 1 micrómetro, está en granos subredondeados individuales ó en agregados granulares sin una forma definida, intercrecidos intergranularmente con clorita de la variedad bertierina, criptocristalina a coloidal, con patrones de difracción de pobre cristalinidad (semiamorfa a amorfa). En relación al mineral "Normal", el mineral "Amorfo" tiene un mayor contenido de cuarzo, apatito, calcita y pirita, con proporciones semejantes de calcopirita, pirrotita, galena, marmatita y covelita, estos minerales están depositados en una secuencia paragenética similar al mineral "Normal" a excepción de la clorita (bertierina), solo presente en el mineral "Amorfo" y que fue la última en depositarse.

A través de Espectroscopía Mössbauer también se observaron diferencias en ambos tipos de menas, la magnetita del mineral "Normal" presento un espectro Mössbauer típico de los estados de oxidación FeO y Fe₂O₃ de la magnetita, sin embargo la magnetita del mineral "Amorfo" además de mostrar también estos estados de oxidación, mostró radicales oxhídricos asociados al Fe, esto último debido al margen de alteración que sufre la magnetita al contacto con la clorita, donde la clorita comparte radicales oxhídricos (OH-) y iones de Mg, Al, con el Fe²⁺ ó Fe³⁺ de la magnetita.

La forma del espectro del mineral "Amorfo" es muy diferente al "Normal", este es característico de muestras que presentan tamaños de partículas muy finas (menores a 12 micrones), esta característica aunada al margen de oxidación magnetita-clorita, impide que exista una interacción adecuada de los momentos magnéticos de los átomos de la molécula Fe_3O_4 , mostrando en el espectro Mössbauer una señal similar a las sustancias paramagnéticas ó superparamagnéticas.

Por Microscopía de Fuerza Magnética se detectan también diferencias en cuanto a la magnetización de los dominios magnéticos, detectadas también en los estudios de paleomagnetismo realizados por Alva Valdivia et al., 1996, 2000, debidos al tamaño de grano de la magnetita, lo que afecta el origen de la magnetización remanente natural y la fidelidad del registro paleomagnético.

Por análisis térmico diferencial y gravimétrico se observó, en el caso de la magnetita del mineral "Normal" un comportamiento térmico correspondiente a una magnetita típica, es decir con una oxidación total a hematita a los $650^{\circ}C$, lo que no sucede con la magnetita del mineral "Amorfo", que en este caso tiene una oxidación más lenta y marcada a ciertas temperaturas, oxidándose completamente a los $750^{\circ}C$.

En el análisis por Microsonda Electrónica de barrido, existe una ligera disminución del contenido de hierro en la magnetita del mineral "Amorfo", en comparación a la magnetita del mineral "Normal", esto se debe a su estrecha relación con la clorita a tamaños muy finos (menos de una micra), lo que impide tener un espectro limpio, contaminándose este con la composición química de la clorita.

La clorita criptocristalina asociada a la magnetita del mineral "Amorfo", reportó por difracción de rayos x una pobre cristalinidad y valores de reflexión $d = 7 \text{ \AA}$, con valores 1:1 semejantes a la caolinita. La clorita se clasificó como una bertierina, que al ser analizada por termoanálisis corroboró un comportamiento térmico diferencial semejante al caolín.

Los resultados obtenidos de estos estudios permiten vislumbrar que el ambiente geológico y geoquímico prevaleciente durante la formación del yacimiento de Peña Colorada, fue de tipo pirometasomático de contacto, con una fase final hidrotermal, que inicia con la alteración de la roca huésped, con cloritización formando chamosita y provocando la depositación de magnetita en vetas, característica claramente representada en el Mineral "Normal". No así para el Mineral "Amorfo" de origen exclusivamente hidrotermal, depositado en un ambiente que incluía la presencia y el contacto con un medio acuoso y un P. h. mayor a 7. Esto explicaría el enfriamiento drástico que da origen al pequeño tamaño de grano de la magnetita, así como su transporte en un medio acuoso a través de la clorita (bertierina), provocando el ataque químico de la magnetita por sus bordes, dándole un aspecto corroído y el consecuente redondeamiento de sus granos. A la bertierina se le atribuye una formación diagenética (James , 1960), lo que viene a corroborar un ciclo geoquímico atípico para el mineral "Amorfo".

Esto indica finalmente una evolución geoquímica y ambientes de depósito diferentes para el mineral "Normal" y el mineral "Amorfo".

1. ANTECEDENTES.

El yacimiento de hierro de Peña Colorada, es el principal productor de pellets de mineral de hierro en el país y abastece con un volumen importante a las siderúrgicas nacionales, su producción ha aumentado notablemente en los últimos años.

A fines del año de 1987 se descubrió una importante nueva mena de hierro, en el yacimiento mineral de "Peña Colorada", recibiendo el nombre de "MINERAL AMORFO". Esta mena presenta diferencias mineralógicas y texturales que difieren notablemente de la mena de hierro tradicional ya existente, llamada "MINERAL NORMAL". La mena del mineral "Normal" es básicamente magnetita masiva y magnetita diseminada, está última en cristales bien desarrollados, con bordes rectos y tamaños hasta de 7 mm, la ganga es principalmente feldespática. La mena del mineral "Amorfo" es magnetita de grano fino a muy fino (tamaños menores de un micrón a 50 micrones) con bordes redondeados y corroídos, intercrecidos intergranularmente con una clorita semiamorfa de la variedad bertierina.

Desde un punto de vista geológico, las diferencias mineralógicas y texturales de ambos tipos de minerales "Normal" y "Amorfo", marcan la huella de su particular origen y ambiente de depósito.

Desde un punto de vista metalúrgico, las características mineralógicas y texturales del mineral "Amorfo", provocaron un problema de liberación de la magnetita con respecto a la ganga, durante el proceso metalúrgico de concentración magnética.

A esta fecha los investigadores de la empresa Consorcio Minero Benito Juárez, Peña Colorada, han trabajado en estrecha colaboración con los investigadores del laboratorio Experimental México de lo que fuera la Comisión de Fomento Minero y ahora laboratorio Experimental Tecamachalco del Consejo de Recursos Minerales, con el fin de conocer las características mineralógicas y fisicoquímicas de la magnetita del mineral "Amorfo", así como sus implicaciones y asociaciones con la ganga, lo que ha permitido optimizar y desarrollar los procesos de beneficio, mejorándose en forma sustantiva su capacidad de proceso.

La problemática metalúrgica del mineral "Amorfo" se ha resuelto favorablemente; aunado a esto, los programas de desarrollo de la calidad, han permitido mejorar en forma significativa las características químicas, físicas y metalúrgicas del pellet de mineral de hierro, en lo cual la competitividad del pellet de Peña Colorada se mantiene a la vanguardia.

2. OBJETIVO.

El fin principal de esta investigación es realizar un estudio de caracterización mineralógica y fisicoquímica de las menas de magnetita del mineral "Amorfo" y mineral "Normal", así como determinar la relación de la magnetita con los minerales de ganga, a través de técnicas instrumentales de análisis.

Esta caracterización permitirá sugerir hipótesis respecto a la génesis y ambientes de emplazamiento. Estos son aspectos fundamentales para planear la explotación de la mena de magnetita y experimentar y desarrollar el beneficio metalúrgico, mejorando la productividad además de aprovechar integralmente las reservas del mineral.

3. MÉTODOS DE TRABAJO.

Con el fin de cumplir con el objetivo señalado en el conocimiento del mineral "Normal" y el mineral "Amorfo", se integra y ordena toda la información técnica obtenida, tomando como base las técnicas instrumentales empleadas, sin perder de vista tres conceptos principales, que de acuerdo a las técnicas utilizadas se referirán a lo siguiente:

- a) Consulta bibliográfica sobre la geografía y geología general del yacimiento mineral de "Peña Colorada".
- b) Caracterización fisicoquímica y mineralógica de los minerales de mena y ganga.

Para dar inicio a la caracterización fisicoquímica y mineralógica se requiere conocer la composición elemental de las muestras a través de análisis químicos cualitativos y cuantitativos, por lo cual se emplearán las técnicas de fluorescencia de rayos x y técnicas analíticas por vía húmeda y seca, en este caso se trabajará sobre compósitos de muestras del mineral "normal" y "amorfo".

Posteriormente se procederá a la identificación mineralógica de las especies minerales de mena y ganga, por medio de las técnicas de: difracción de rayos X, petrografía y minerografía, así como microsonda electrónica de barrido.

- c) Caracterización fisicoquímica de la magnetita y minerales del grupo de las cloritas.

Entre la magnetita del mineral "normal" y "amorfo" existen diferencias fisicoquímicas marcadas (forma, tamaño, composición química, etc.), que repercuten directamente en su concentración magnética durante el beneficio metalúrgico de la mena.

2. OBJETIVO.

El fin principal de esta investigación es realizar un estudio de caracterización mineralógica y fisicoquímica de las menas de magnetita del mineral "Amorfo" y mineral "Normal", así como determinar la relación de la magnetita con los minerales de ganga, a través de técnicas instrumentales de análisis.

Esta caracterización permitirá sugerir hipótesis respecto a la génesis y ambientes de emplazamiento. Estos son aspectos fundamentales para planear la explotación de la mena de magnetita y experimentar y desarrollar el beneficio metalúrgico, mejorando la productividad además de aprovechar integralmente las reservas del mineral.

3. MÉTODOS DE TRABAJO.

Con el fin de cumplir con el objetivo señalado en el conocimiento del mineral "Normal" y el mineral "Amorfo", se integra y ordena toda la información técnica obtenida, tomando como base las técnicas instrumentales empleadas, sin perder de vista tres conceptos principales, que de acuerdo a las técnicas utilizadas se referirán a lo siguiente:

- a) Consulta bibliográfica sobre la geografía y geología general del yacimiento mineral de "Peña Colorada".
- b) Caracterización fisicoquímica y mineralógica de los minerales de mena y ganga.

Para dar inicio a la caracterización fisicoquímica y mineralógica se requiere conocer la composición elemental de las muestras a través de análisis químicos cualitativos y cuantitativos, por lo cual se emplearán las técnicas de fluorescencia de rayos x y técnicas analíticas por vía húmeda y seca, en este caso se trabajará sobre compósitos de muestras del mineral "normal" y "amorfo".

Posteriormente se procederá a la identificación mineralógica de las especies minerales de mena y ganga, por medio de las técnicas de: difracción de rayos X, petrografía y minerografía, así como microsonda electrónica de barrido.

- c) Caracterización fisicoquímica de la magnetita y minerales del grupo de las cloritas.

Entre la magnetita del mineral "normal" y "amorfo" existen diferencias fisicoquímicas marcadas (forma, tamaño, composición química, etc.), que repercuten directamente en su concentración magnética durante el beneficio metalúrgico de la mena.

Por esta razón es importante definir que factores físicos, químicos y térmicos influyeron durante la formación de la magnetita en los dos diferentes tipos de mena, que modifican el grado de liberación de la magnetita.

Para diferenciar los factores fisicoquímicos, estructurales y térmicos que ocurrieron en la magnetita se emplearán las técnicas de Microscopía de Fuerza Atómica, efecto Mössbauer, Análisis Térmicos Gravimétricos, Térmicos Diferenciales y Difracción de Rayos X.

En el caso de los minerales del grupo de la clorita se requiere identificar la variedad específica de clorita, este dato proporcionará una información muy importante sobre el ambiente de depósito, condiciones de hidratación en las cuales se depositó este mineral y su asociación con la magnetita. Esto permitirá también entender el comportamiento de liberación de la clorita con respecto a la magnetita. Para tal fin se emplearán las técnicas de Difracción de Rayos X, Análisis Térmicos Diferencial y Gravimétrico, Microscopía de Polarización con luz transmitida y Microsonda Electrónica de Barrido.

d) Asociaciones mineralógicas y relaciones texturales de los minerales de mena y ganga.

Las asociaciones mineralógicas y relaciones texturales de la magnetita, con los minerales de ganga, están claramente diferenciadas tanto en el mineral "normal" como en el mineral "amorfo", sugiriendo las condiciones ambientales particulares de depositación, que indudablemente indican su particular origen.

La textura característica de la magnetita, diferente en ambos tipos de mena, ha influido notablemente en los procesos de liberación en el momento del beneficio de las menas.

Para obtener esta información se emplearán las técnicas de microscopía de polarización con luz transmitida y reflejada.

4. LOCALIZACIÓN DEL YACIMIENTO MINERAL DE PEÑA COLORADA.

El yacimiento mineral de Peña Colorada se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas: 19° 21' 37'' N; 104° 05' 43'' W, al norte de la Sierra Madre del Sur en el Estado de Colima, el poblado más cercano es Minatitlán, localizado a 65 Km de la ciudad de Manzanillo ver la Figura No. 1.

5. GEOLOGÍA REGIONAL.

5.1. Geología Estructural y Estratigráfica.

Los estudios paleomagnéticos, estratigráficos y tectónicos, nos indican que el margen continental oeste de Norte América, está compuesta de varios terrenos, algunos tal vez originados mas hacia el sur, en paleolatitudes correspondientes a los terrenos del sureste de México, donde su consecuente desplazamiento hacia el norte involucró un transporte tectónico lateral en respuesta a una convergencia oblicua de las placas tectónicas (e.g. Beck et al., 1981).

El margen continental del Sureste de México exhibe características de un margen de composición truncada, que puede haber sufrido una compleja evolución involucrando la subducción de la placa, acreción de arcos magmáticos y placas oceánicas, así como un fallamiento lateral a gran escala (Karig et al., 1978; Urrutia-Fucagauchi, 1983).

En el margen del Terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983) hay varios batolitos calcoalcalinos emplazados en un complejo vulcanosedimentario y en una secuencia metamórfica. Los depósitos minerales de fierro asociados con cuerpos intrusivos están distribuidos a lo largo de cinturones extensos que aproximadamente siguen al margen.

En la región donde esta ubicado el yacimiento de Peña Colorada las rocas más antiguas que están expuestas, pertenecen al Albiano y están representadas por gneis, esquistos y anfibolitas (Lanuza y Colin, 1987).

La Formación Tepalcatepec (Albiano – Cenomaniano) es una unidad vulcanosedimentaria formada por caliza, areniscas y conglomerados. Esta Formación fue intrusionada por un cuerpo ígneo que es parte de un batolito granítico localizado alrededor del margen Pacífico (Pineda et al., 1969). Arriba de esta formación se localizan flujos andesíticos, riolíticos y piroclásticos del Cretácico Superior.

Las calizas son correlacionables con la Formación Morelos (Fries, 1961) y representan facies de plataforma con macrofósiles de facies de arrecife. Esta base marginal fue desarrollada después de un arco de isla, como resultado de la subducción de la Placa del Pacifico que se introduce debajo de la Placa de Norteamérica.

4. LOCALIZACIÓN DEL YACIMIENTO MINERAL DE PEÑA COLORADA.

El yacimiento mineral de Peña Colorada se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas: 19° 21' 37'' N; 104° 05' 43'' W, al norte de la Sierra Madre del Sur en el Estado de Colima, el poblado más cercano es Minatitlán, localizado a 65 Km de la ciudad de Manzanillo ver la Figura No. 1.

5. GEOLOGÍA REGIONAL.

5.1. Geología Estructural y Estratigráfica.

Los estudios paleomagnéticos, estratigráficos y tectónicos, nos indican que el margen continental oeste de Norte América, está compuesta de varios terrenos, algunos tal vez originados mas hacia el sur, en paleolatitudes correspondientes a los terrenos del sureste de México, donde su consecuente desplazamiento hacia el norte involucró un transporte tectónico lateral en respuesta a una convergencia oblicua de las placas tectónicas (e.g. Beck et al., 1981).

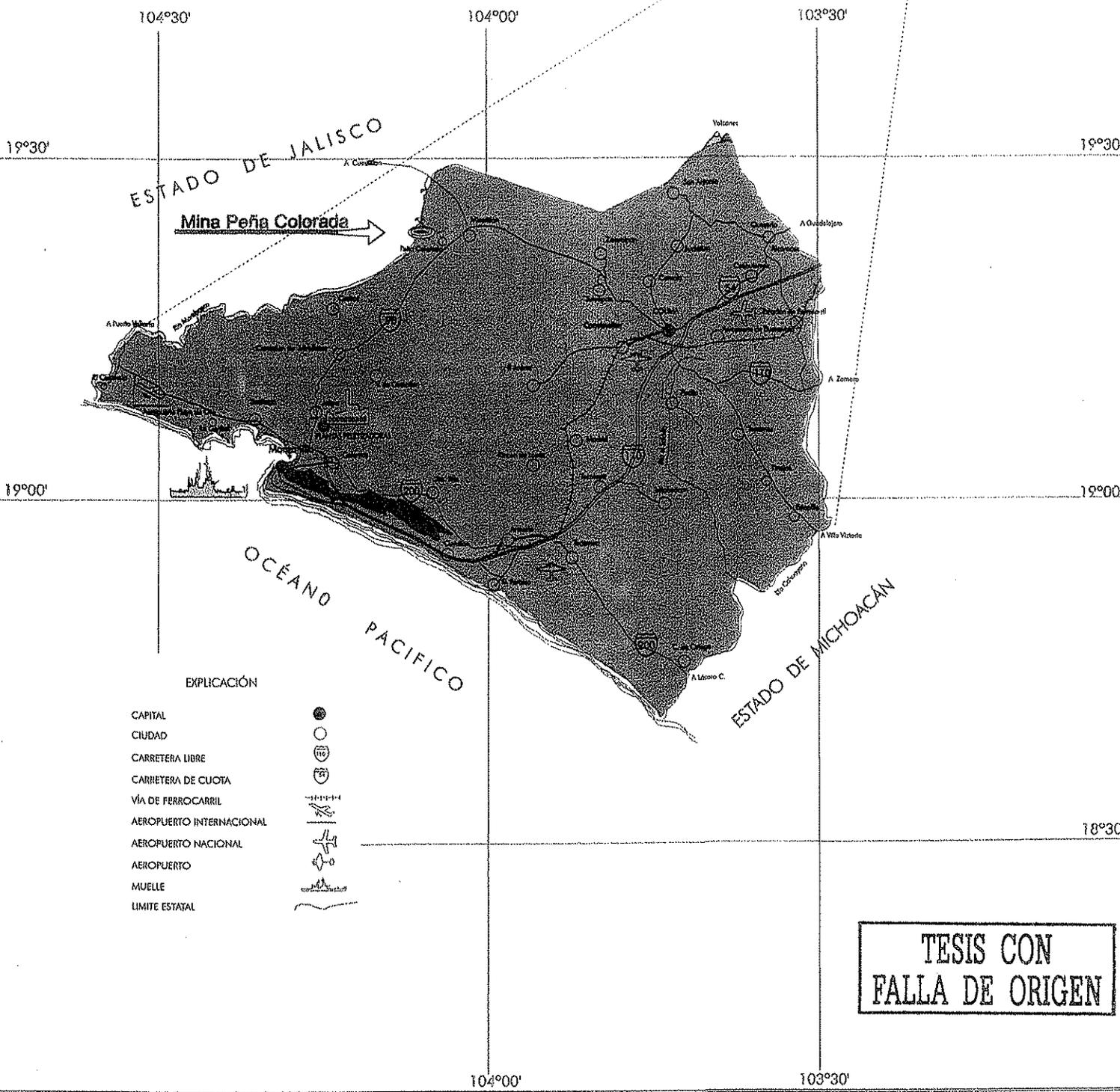
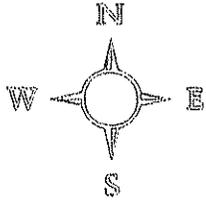
El margen continental del Sureste de México exhibe características de un margen de composición truncada, que puede haber sufrido una compleja evolución involucrando la subducción de la placa, acreción de arcos magmáticos y placas oceánicas, así como un fallamiento lateral a gran escala (Karig et al., 1978; Urrutia-Fucagauchi, 1983).

En el margen del Terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983) hay varios batolitos calcoalcalinos emplazados en un complejo vulcanosedimentario y en una secuencia metamórfica. Los depósitos minerales de fierro asociados con cuerpos intrusivos están distribuidos a lo largo de cinturones extensos que aproximadamente siguen al margen.

En la región donde esta ubicado el yacimiento de Peña Colorada las rocas más antiguas que están expuestas, pertenecen al Albiano y están representadas por gneis, esquistos y anfibolitas (Lanuza y Colin, 1987).

La Formación Tepalcatepec (Albiano – Cenomaniano) es una unidad vulcanosedimentaria formada por caliza, areniscas y conglomerados. Esta Formación fue intrusionada por un cuerpo ígneo que es parte de un batolito granítico localizado alrededor del margen Pacífico (Pineda et al., 1969). Arriba de esta formación se localizan flujos andesíticos, riolíticos y piroclásticos del Cretácico Superior.

Las calizas son correlacionables con la Formación Morelos (Fries, 1961) y representan facies de plataforma con macrofósiles de facies de arrecife. Esta base marginal fue desarrollada después de un arco de isla, como resultado de la subducción de la Placa del Pacifico que se introduce debajo de la Placa de Norteamérica.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESCALA Km
0 5 10 15 20 25

Febrero, 2000



ESTADO DE COLIMA
LOCALIZACIÓN DE LA MINA "PEÑA COLORADA"
Figura No. 1

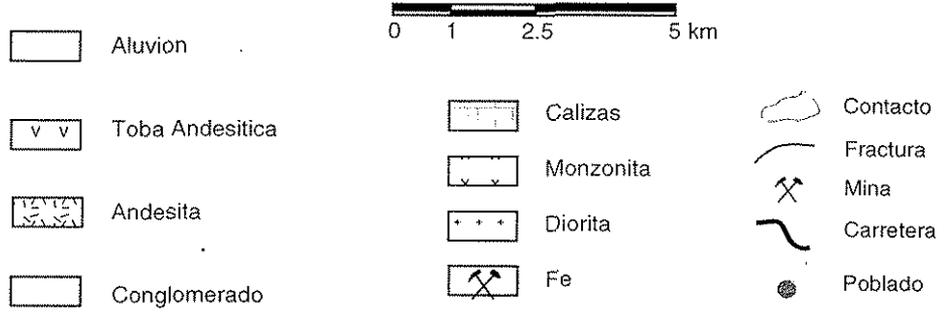
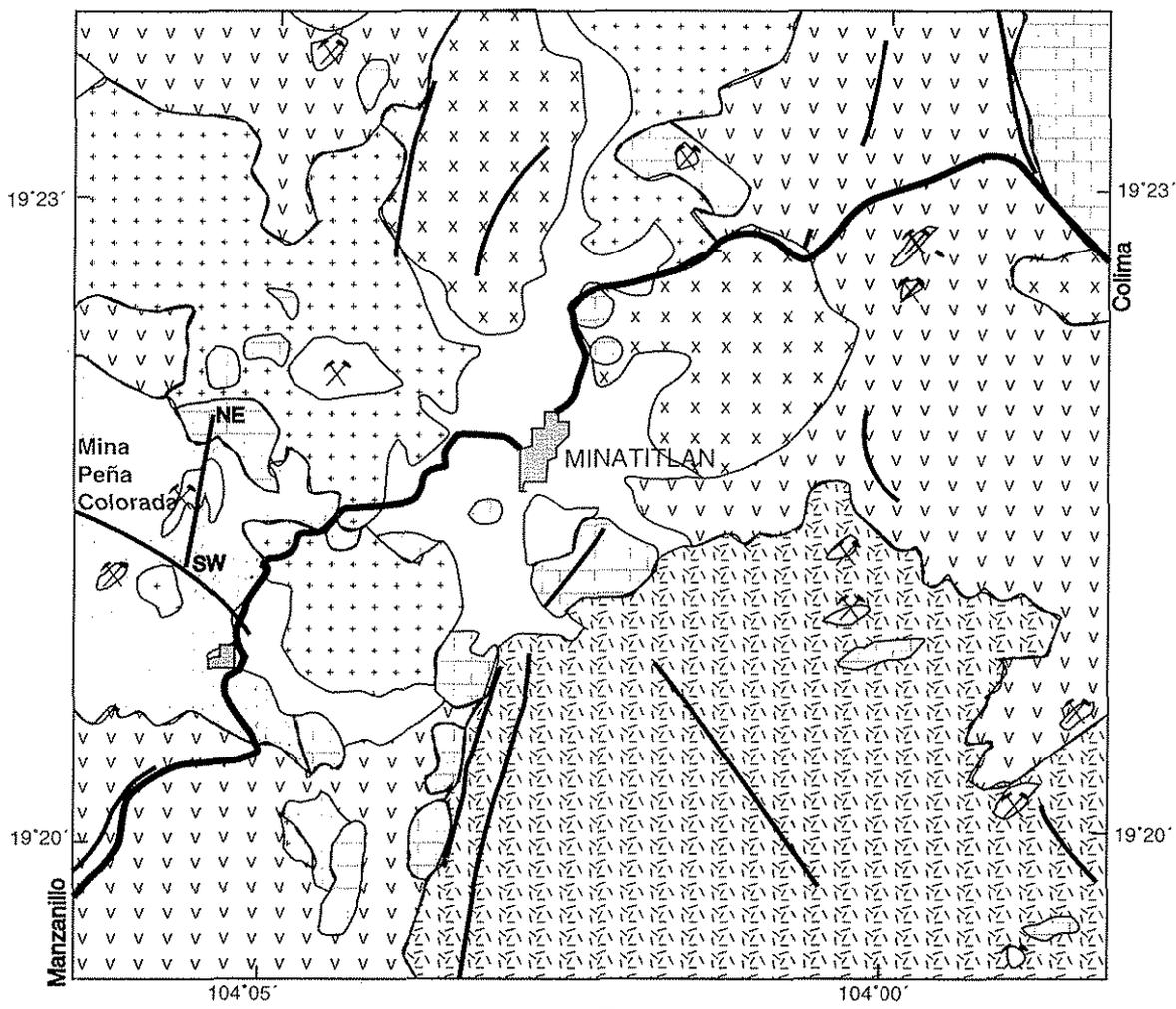


Figura No. 2

MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO
(MODIFICADO POR EL CONSEJO DE RECURSOS MINERALES, 1995)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Al principio del Cretácico Tardío hubo un incremento de actividad tectónica, seguida de periodos cortos de calma, la presencia de un aumento del tamaño de grano de los sedimentos sin ninguna estratificación, indica el fin de los procesos sedimentarios en la cuenca.

Esta área emergió al final del Cretácico Tardío como lo indican los depósitos de conglomerados rojos en cuencas continentales. La cuenca se formó por una falla normal y lateral, en este tiempo también el batolito Tomatlán de composición diorítica, se introdujo en una secuencia vulcanosedimentaria (Schaaf, 1990). El batolito está expuesto hacia los límites del Noreste del yacimiento de Peña Colorada.

Durante el Terciario temprano un cuerpo intrusivo de composición diorítica, produjo un metamorfismo de contacto en la secuencia Mesozoica, dando como resultado la formación de skarn y hornfels a partir de la intrusión en calizas y andesitas respectivamente, formando las rocas huésped para la mineralización de hierro.

La mineralización de hierro es básicamente magnetita masiva en la zona exoskarn. El cuerpo tiene una forma de manto con una profundidad regional amplia que sigue la estratificación, con capas de pequeños cristales de magnetita diseminados.

El contacto entre el intrusivo y el skarn es casi horizontal y paralelo al cuerpo masivo.

El cuerpo principal tiene tamaños de grano muy finos en la parte Sureste cercano al contacto con el cuerpo intrusivo y exhibe un alto grado de alteración hidrotermal. Sin embargo el tamaño de grano fino de la magnetita y el alto contenido de clorita implica que la alteración hidrotermal ocurrió después del emplazamiento de la magnetita.

Otro sistema de diques (Terciario Tardío) asociado con el cuerpo Tomatlán intrusiona casi todas las rocas de este distrito, incluyendo el cuerpo mineral.

La gradación metamórfica tanto en dirección vertical como horizontal es reconocida en la base de un conglomerado, que es afectado por epidotización vertical, exhibe un reemplazamiento de clastos de caliza por magnetita.

De igual forma, se observa en la mena masiva de magnetita islas de fragmentos relictos de roca feldespática, fuertemente recristalizados (hornfels) y reemplazados por magnetita.

Sedimentos recientes localizados al S – E de Peña Colorada están representados por; conglomerados con fragmentos de todas las rocas preexistentes, así como depósitos aluviales y suelos en los valles.

En términos generales el área de Peña Colorada (Fig. No. 2) se caracteriza por una secuencia vulcanosedimentaria del Aptiano, conocida como la Formación Encino Superior, la cual está compuesta por un paquete sedimentario de 300 m de espesor, constituido por calizas arrecifales y lentes intercalados de pizarra y margas de 0.10 m de espesor.

La Formación Encino Superior es discordante con unidades vulcanosedimentarias del Albiano de la Formación Vallecitos, formada por una secuencia de conglomerado gris verdoso y un conglomerado polimíctico rojo. Además de estas unidades hay una microbrecha andesítica rojiza concordante.

Un barreno de diamante cortó tobas andesíticas intercaladas con una secuencia sedimentaria, la cual está al sur de Minatitlán intercalada con calizas.

Estas formaciones exhiben mineralización de fierro y están formadas por sedimentos calcáreos pelíticos (Formación Encino Superior), tobas andesíticas y conglomerados rojos (Formación Vallecitos). Este paquete geológico fue intrusionado por un cuerpo diorítico con diferenciación local a tonalita.

6. YACIMIENTOS MINERALES.

El depósito mineral de Peña Colorada es volumétricamente el más grande de México con alrededor de 192 millones de toneladas y arriba del 26 al 35 % de Fe (Consejo de Recursos Minerales, 1995).

Alva Valdivia et. al., (2000), indican que la forma de los cuerpos mineralizados de fierro es de dos tipos: a) Un cuerpo estratiforme subhorizontal en forma de herradura, de 50 a 100 m de espesor, b) otro en forma de una veta de magnetita oculta, que sigue una orientación E – W y tiene un espesor de 3 a 10 m llamada la Chula.

La roca encajonante de la mineralización de fierro es una secuencia pelítica calcárea de la Formación Encino Superior. Una estructura veniforme está atrapada entre el intrusivo y el conglomerado en el área de La Chula (Alva Valdivia, et. al., 2000). Así también se observa mineralización diseminada en un hornfels feldespático de protolito ígneo andesítico – diorítico.

La Formación Tepalcatepec que está representada por caliza masiva con un espesor de más de 500 m, se observó en los cortes expuestos del cuerpo mineralizado del Chinforinazo Sur, siendo éste el contacto más cercano con los cuerpos mineralizados, la caliza está distribuida en ambos lados de la mineralización actuando como un control sobre esta, Alva Valdivia, et. al., (1996).

Las áreas mejores de mineralización son hornfels con grado variable de metamorfismo, las cuales se concentran de Este a Oeste, en este caso la magnetita se encuentra en forma diseminada en los cuerpos de hornfels y en forma de vetas que cortan a estos dando un aspecto brechado.

Los principales cuerpos mineralizados son dos capas de magnetita masiva paralelos a la estratificación. El primer cuerpo tiene un largo de 4 Km. con una dirección orientada N – E, un kilómetro más amplio sobre el promedio y 50 a 100 m. de espesor. El segundo cuerpo es una capa más delgada, se une a profundidad con la capa principal, dando como resultado un cuerpo masivo de mas de 100 m de espesor localizado al Oeste del contacto con las calizas, Alva Valdivia, et. al., (1996).

La Formación Encino Superior es discordante con unidades vulcanosedimentarias del Albiano de la Formación Vallecitos, formada por una secuencia de conglomerado gris verdoso y un conglomerado polimíctico rojo. Además de estas unidades hay una microbrecha andesítica rojiza concordante.

Un barreno de diamante cortó tobas andesíticas intercaladas con una secuencia sedimentaria, la cual está al sur de Minatitlán intercalada con calizas.

Estas formaciones exhiben mineralización de fierro y están formadas por sedimentos calcáreos pelíticos (Formación Encino Superior), tobas andesíticas y conglomerados rojos (Formación Vallecitos). Este paquete geológico fue intrusionado por un cuerpo diorítico con diferenciación local a tonalita.

6. YACIMIENTOS MINERALES.

El depósito mineral de Peña Colorada es volumétricamente el más grande de México con alrededor de 192 millones de toneladas y arriba del 26 al 35 % de Fe (Consejo de Recursos Minerales, 1995).

Alva Valdivia et. al., (2000), indican que la forma de los cuerpos mineralizados de fierro es de dos tipos: a) Un cuerpo estratiforme subhorizontal en forma de herradura, de 50 a 100 m de espesor, b) otro en forma de una veta de magnetita oculta, que sigue una orientación E – W y tiene un espesor de 3 a 10 m llamada la Chula.

La roca encajonante de la mineralización de fierro es una secuencia pelítica calcárea de la Formación Encino Superior. Una estructura veniforme está atrapada entre el intrusivo y el conglomerado en el área de La Chula (Alva Valdivia, et. al., 2000). Así también se observa mineralización diseminada en un hornfels feldespático de protolito ígneo andesítico – diorítico.

La Formación Tepalcatepec que está representada por caliza masiva con un espesor de más de 500 m, se observó en los cortes expuestos del cuerpo mineralizado del Chinforinazo Sur, siendo éste el contacto más cercano con los cuerpos mineralizados, la caliza está distribuida en ambos lados de la mineralización actuando como un control sobre esta, Alva Valdivia, et. al., (1996).

Las áreas mejores de mineralización son hornfels con grado variable de metamorfismo, las cuales se concentran de Este a Oeste, en este caso la magnetita se encuentra en forma diseminada en los cuerpos de hornfels y en forma de vetas que cortan a estos dando un aspecto brechado.

Los principales cuerpos mineralizados son dos capas de magnetita masiva paralelos a la estratificación. El primer cuerpo tiene un largo de 4 Km. con una dirección orientada N – E, un kilómetro más amplio sobre el promedio y 50 a 100 m. de espesor. El segundo cuerpo es una capa más delgada, se une a profundidad con la capa principal, dando como resultado un cuerpo masivo de mas de 100 m de espesor localizado al Oeste del contacto con las calizas, Alva Valdivia, et. al., (1996).

Parte del cuerpo intrusivo esta expuesto en la porción Sureste del depósito, este es de color gris claro y es el límite de la mineralización, porque corre en forma paralela hacia el contacto del cuerpo mineral – intrusivo.

Desde el punto de vista mineralógico, fisicoquímico y textural se consideran dos tipos de mineralización de hierro, los cuales reciben el nombre de: mineral “normal” y mineral “amorfo”.

El principal mineral de hierro se conoce como mineral “normal”, está constituido por magnetita diseminada homogéneamente en un hornfels feldespático (roca encajonante), así como magnetita masiva, la cual rellena vetas en el hornfels feldespático, las vetas cortan a la roca en varias direcciones, dando a esta un aspecto brechoide.

La magnetita masiva y diseminada se encuentran asociadas principalmente a feldespatos (plagioclasas sódicas), augita – diópsida, calcita, apatito, granate, epidota, en menor proporción; pirita, calcopirita y escasas; marmatita, pirrotita, cuarzo y clorita.

El mineral “amorfo” está constituido por una magnetita intercrecida intergranularmente con clorita de la variedad bertierina, donde la clorita en algunos casos ha reemplazado completamente a la roca original.

La magnetita del mineral “amorfo” está asociada en una mediana proporción a pirita y calcita, en menor proporción a cuarzo, apatito y pirrotita y en escasa proporción a hematita, calcopirita, marmatita y covelita.

El origen del yacimiento mineral de Peña Colorada, es principalmente para el mineral “normal” pirometasomático con evidencias también de hidrotermalismo, sin embargo para el mineral “amorfo” su origen es principalmente hidrotermal y tiene una relación estrecha con un ambiente de depósito acuoso, que dio lugar a la precipitación de la bertierina, donde las condiciones de reducción prevalecieron por descomposición de la materia orgánica.

Alva Valdivia, et. al., (2000), mencionan que el origen del depósito de Peña Colorada es vulcanosedimentario, porque esta relacionado con un medio ambiente de arco de islas. Durante el principio del Cretácico, varias erupciones volcánicas ocurrieron en un medio subacuoso. Así también la estructura y la mineralización de la veta “La Chula” estuvo formada por procesos hidrotermales durante el último emplazamiento de un cuerpo diorítico intrusivo.

7. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y FISICOQUÍMICA DEL MINERAL DE FIERRO “NORMAL” Y “AMORFO”.

La mineralogía del yacimiento de “Peña Colorada” está claramente representada en sus dos diferentes tipos de mena, identificadas como mineral “Normal” y mineral “Amorfo”, los cuales se caracterizan por diferencias marcadas en su mineralogía, textura y asociaciones mineralógicas de la magnetita con la ganga.

El mineral de mena en ambos tipos de mineral es la magnetita. Los minerales de ganga primarios principales en el mineral “Normal” son feldespatos en sus variedades del grupo de las plagioclasas sódicas (andesina y oligoclasa) fuertemente recristalizadas y ferromagnesianos como: piroxenos (augita - hyperstena), anfíboles (hornblenda) y granate.

Los minerales de alteración son epidota y escasa clorita ferrosa. Así como escasos sulfuros como: pirita, calcopirita, galena, pirrotita, marmatita y covelita.

Los minerales de ganga principales en el mineral “amorfo” son: clorita (bertierina) y calcita. Así como pirita y escasas; marmatita, pirrotita, covelita y hematita. Existe un aumento en el contenido de pirita con relación al mineral “normal”.

7.1. Descripción Megascópica preliminar

7.1. Mineral “Normal”

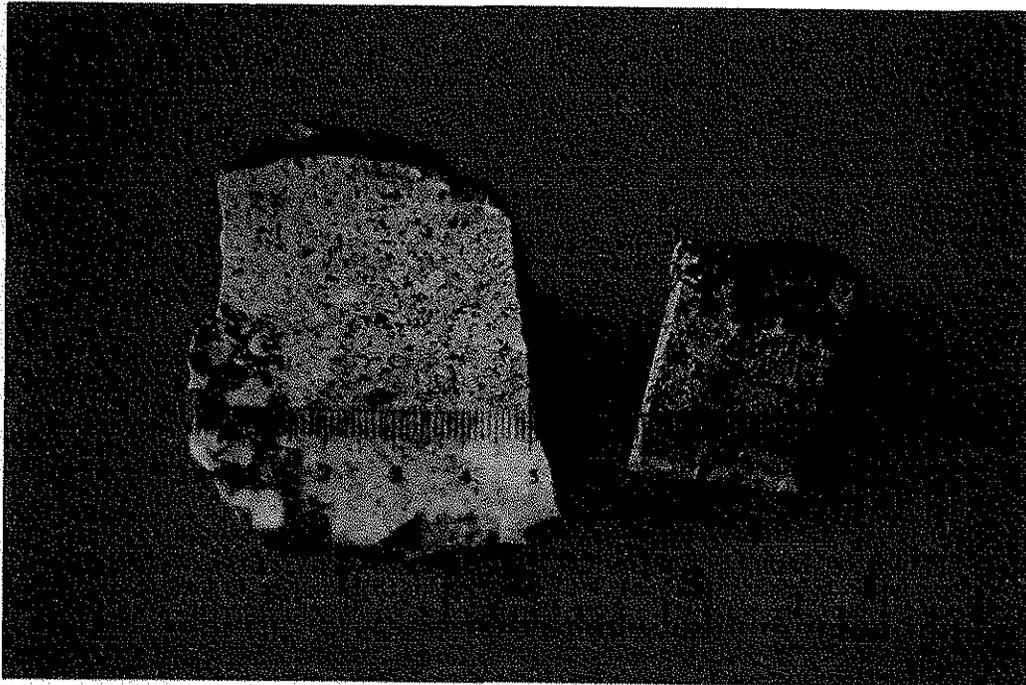
En general el mineral “Normal” se presenta en dos tipos de menas; masivo y diseminado.

El mineral “normal” masivo está formado por fragmentos de roca brechados, por el relleno y reemplazamiento de magnetita masiva a través de fracturas, las cuales llegan a tener espesores de hasta de 10 cm. ver fotomicrografía No. 1 a.

El mineral “normal” diseminado se caracteriza por magnetita en cristales euedrales y subedrales homogéneamente diseminados en la roca, ver fotomicrografía 1 b.



Fotomicrografía No. 1 a. Mineral "Normal". Fragmentos de magnetita masiva y fragmentos de roca brechados y reemplazados por la mineralización de magnetita.

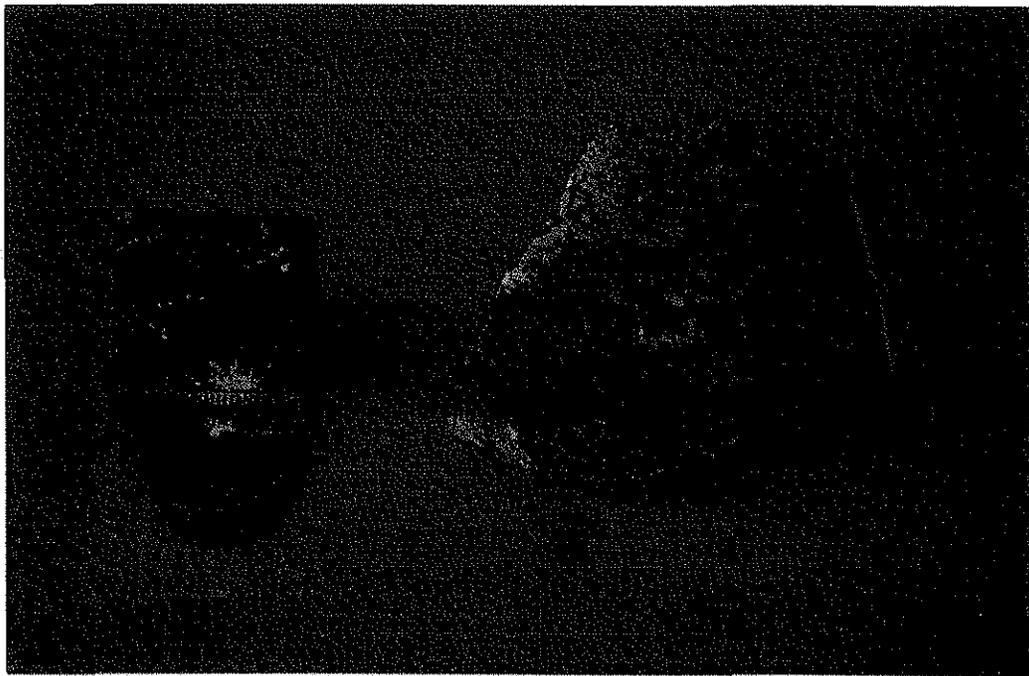


Fotomicrografía No. 1 b. Mineral "Normal". Fragmentos de roca con magnetita diseminada y relleno de fracturas en la roca.

7.1.2. Mineral "Amorfo"

El mineral "Amorfo" se caracteriza por presentar una textura granular de grano muy fino de magnetita, difícilmente observable a simple vista.

Los granos de magnetita están sostenidos en una masa compacta de clorita de color verde oscuro, formando ambos minerales una textura de intercrecimiento intergranular, ver fotomicrografía No. 2.



Fotomicrografía No. 2. Mineral "Amorfo" de textura granular de magnetita (en negro) asociada a pirita (Pi) y calcita (manchas blancas).

7.2. Análisis químico cualitativo y cuantitativo para el Mineral "Normal" y el Mineral "Amorfo".

7.2.1. Análisis cualitativo elemental por Espectrografía de Emisión y Fluorescencia de Rayos x.

Como inicio a la caracterización mineralógica se determinaron los elementos que constituyen el mineral "normal" y el mineral "amorfo", a través de un Espectrómetro de Emisión de Arco, marca Hitachi, el cual tiene límites de detección de hasta menos de 1 ppm para ciertos elementos (como el molibdeno), mientras que para otros solo detecta arriba de 100 ppm. Sin embargo en la identificación de otros elementos que se encuentran en muy baja concentración, sus líneas espectrales secundarias se interfieren, como es el caso del azufre y el potasio, por esta razón se requiere según el caso, de una técnica de apoyo como es Fluorescencia de Rayos X, esta técnica tiene límites de detección que varían según el elemento, de 20 ppm hasta 100 ppm., por esta razón ambas técnicas se complementan.

El estudio de Fluorescencia de Rayos X se realizó en un Espectrómetro de rayos X marca Rigaku, en las condiciones: 50 Kv, 40 mA usando un ánodo de Cu. Se utilizaron dos cristales analizadores LiF para elementos pesados y EDDT para elementos ligeros.

Los resultados obtenidos por ambas técnicas se ilustran en el siguiente cuadro No 1, para ambos tipos de mineral:

| MINERAL | PROPORCIÓN ESTIMADA | | | | |
|---------------|---------------------|-----------------|----------------|-----------------------|------------------------------------|
| | Más del 10 % | De 10.0 a 1.0 % | De 1.0 a 0.1 % | De 0.1 a 0.01 % | Menos de 0.01 % |
| <i>NORMAL</i> | Fe, Si. | Al, Mg. | Ca, Na. | Mn, Ti, Cu, V, Zn, S. | Sr, Cr, Ni, Sn, Mo, K, Co, Pb, Ag. |
| <i>AMORFO</i> | Fe. | Si, Ca, Al. | Mg, Na, S. | Ti, Mn, V, Cu, Zn, K. | Co, Ni, Mo, Ba, Cr, Ag, Pb. |

Cuadro No. 1

Análisis Cualitativo por Espectrografía de Emisión y Fluorescencia de rayos X del mineral "normal" y el mineral "amorfo"

7.2.2. Análisis químico cuantitativo elemental por Espectrografía de Plasma.

Se cuantificaron por esta técnica 22 elementos usando un Espectrómetro de Plasma, marca SHIMATSU, completando de esta manera la identificación química elemental del mineral “normal” y el mineral “amorfo”.

Este análisis se realizó en las muestras de cabeza y los resultados obtenidos se anotan a continuación en el cuadro No. 2:

| ELEMENTOS | MINERAL “NORMAL” | MINERAL “AMORFO” |
|-----------|------------------|------------------|
| | ppm | Ppm |
| Cr | 518.8 | 528.9 |
| Ni | 25.1 | 66.0 |
| Cu | 24.8 | 111.1 |
| Pb | 91.4 | 90.8 |
| Zn | 176.9 | 234.2 |
| As | 8.36 | 4.325 |
| Sb | N.D. | N.D. |
| Ba | 6.8 | 21.6 |
| Be | 5.5 | 5.5 |
| Bi | 0.4 | 0.4 |
| Cd | N.D. | 1.6 |
| Co | 28.4 | 46.6 |
| Sc | N.D. | 2.5 |
| Sr | 34.9 | 10.8 |
| Te | N.D. | N.D. |
| Mn | 920.9 | 1450.5 |
| Se | N.D. | N.D. |
| Tl | N.D. | N.D. |
| U | N.D. | N.D. |
| W | 88.6 | 82.2 |
| Sn | 0.5 | n |

Cuadro No.2
Análisis Cualitativo por Espectrografía de Plasma del
Mineral “Normal” y el Mineral “Amorfo”

7.2.3. Análisis químico cuantitativo elemental y compuestos químicos por Vía Húmeda y Técnicas Instrumentales.

Los elementos y compuestos de mayor interés analizados en las muestras del mineral de cabeza, se cuantificaron químicamente utilizando las siguientes técnicas:

Absorción Atómica; según el caso con disolución y fusión para: Fe total, Al_2O_3 , Na_2O_3 , K_2O , Ca O, Mg O

Análisis Volumétrico: FeO

Análisis Gravimétrico para: SiO_2 , $Fe_2O_3^*$, Fe O, S

*depués absorción atómica

Los resultados obtenidos se reportan en el cuadro No. 3, para el Mineral "Normal" y el Mineral "Amorfo".

| ELEMENTOS Y COMPUESTOS | MINERAL "NORMAL" | MINERAL "AMORFO" |
|---------------------------|------------------|------------------|
| | % | % |
| Fe total | 49.0 | 47.0 |
| FeO | 16.0 | 17.0 |
| S | 0.5 | 1.0 |
| SiO_2 | 16.0 | 10.0 |
| Al_2O_3 | 5.0 | 4.0 |
| CaO | 3.0 | 6.0 |
| MgO | 1.0 | 1.0 |
| Na_2O | 1.0 | 0.7 |
| K_2O | 0.2 | 0.4 |

Cuadro No. 3.

Análisis Cuantitativo por Vía Húmeda y Técnicas Instrumentales del mineral de cabeza "Normal" y el Mineral "Amorfo"

7.3. Análisis por Difracción de Rayos X del Mineral “Normal” y el Mineral “Amorfo”.

Las especies minerales cristalinas principales que constituyen el mineral “normal” y el mineral “amorfo”, se identificaron por medio de los difractogramas obtenidos en un difractor marca Rigaku, modelo Geiger – Flex, en las condiciones: 40 Kv, 30 mA, ánodo de Cu.

Los resultados obtenidos son los siguientes y se reportan en el cuadro No. 4.

| PROPORCIÓN ESTIMADA | MINERAL “NORMAL” | MINERAL “AMORFO” |
|---------------------|------------------------|------------------------|
| | <i>ESPECIE MINERAL</i> | <i>ESPECIE MINERAL</i> |
| <i>MAYOR</i> | Magnetita. | Magnetita. |
| <i>MEDIANA</i> | Feldespatos. | |
| <i>MENOR</i> | Clorita. | Calcita, Clorita. |
| <i>PEQUEÑA</i> | Calcita. | Feldespatos, Pirita. |

Cuadro No. 4.
Análisis por Difracción de Rayos X del Mineral “Normal” y el Mineral “Amorfo”

7.4. Estudio Petrográfico del Mineral “Normal”.

7.4.1. Descripción Megascópica.

Color.- Gris verdoso en ocasiones con un matiz rosado, presenta mineralización metálica negra (magnetita) rodeando en grandes márgenes masivos a los fragmentos de roca. También la mineralización metálica está homogéneamente diseminada dando a la roca un aspecto moteado.

Textura y estructura .- La roca tiene una textura de grano fino a grueso, con tamaños menores a 1.0 cm, esta asociada a una mena metálica de magnetita masiva que rodea y corta a la roca a través de vetas, adquiriendo un aspecto brechoíde. Otros fragmentos de roca presentan una mineralización metálica diseminada o formando islas masivas.

Mineralogía.- Megascópicamente se identifican principalmente: feldespatos, magnetita, ferromagnesianos, pirita y minerales de alteración como epidota y escasa clorita.

7.4.2. Descripción Microscópica.

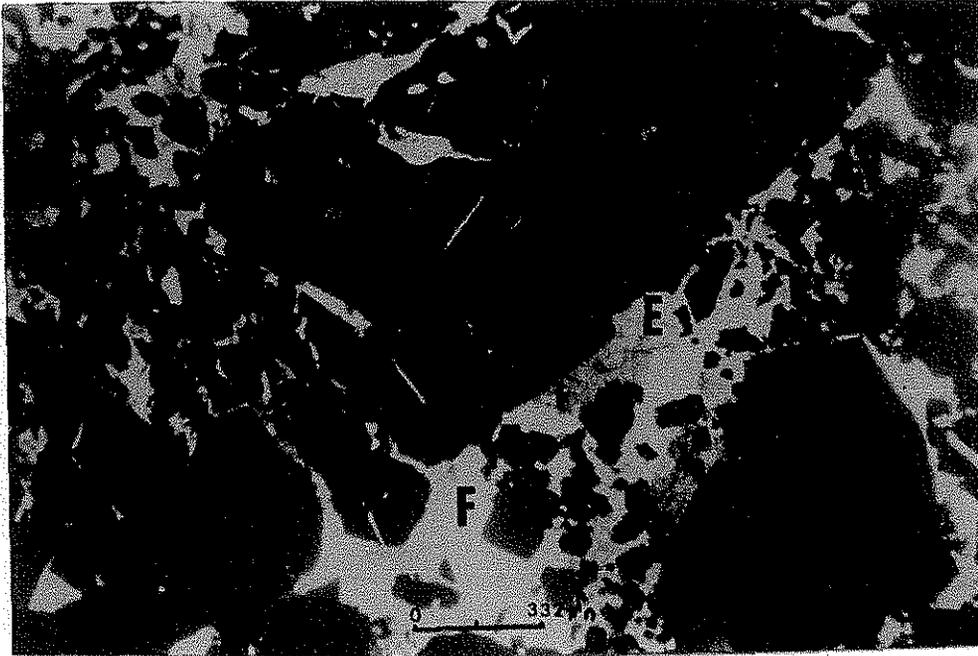
Microtextura.- Granoblástica de grano grueso a medio con mineralización metálica diseminada y en vetas.

Mineralogía:

El estudio petrográfico se realizó sobre diferentes secciones delgadas de la roca principal, asociada a la mena del mineral “normal”. Los resultados obtenidos se condensan a continuación:

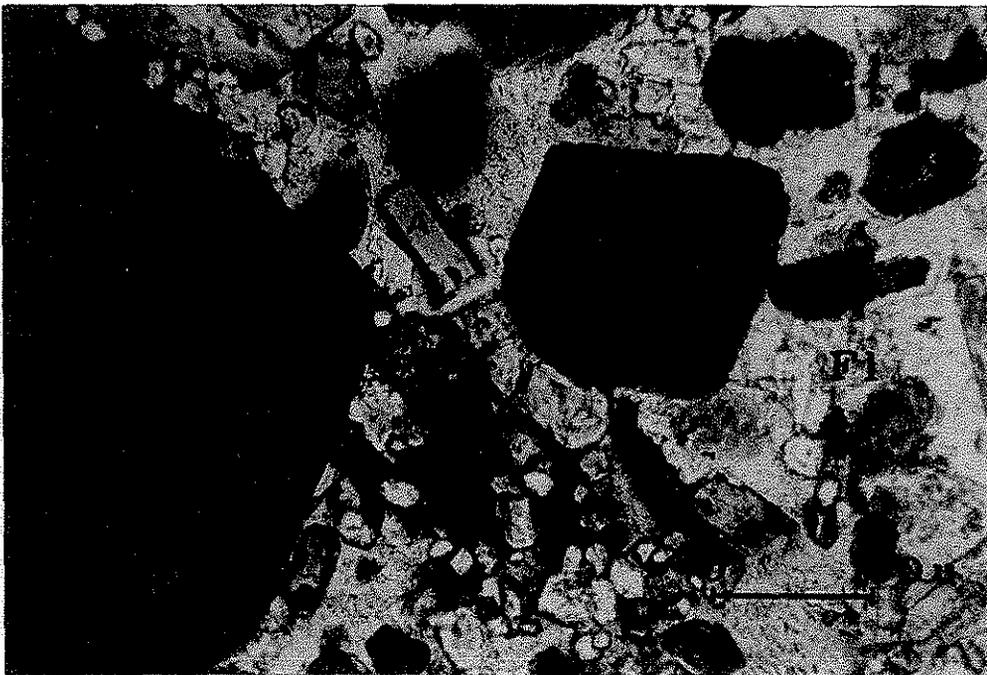
Petrográficamente en sección delgada la roca está representada por un mosaico cristaloblástico y xenoblástico de grano fino a grueso de feldespatos, con granos de tamaños menores a 300 micrómetros, en el cual se distinguen remanentes de la roca ígnea original de textura holocristalina.

La composición mineralógica principal corresponde a granoblóstos de feldespatos del grupo de las plagiclasas sódicas como son oligoclasa y andesina fuertemente recristalizadas y reemplazadas a través de fracturas por una mena metálica masiva de magnetita (ver fotomicrografías Nos: 3 y 5).



Fotomicrografía No . 3. Magnetita (en negro) masiva con bordes rectos rellenando fracturas en una roca hornsfélsica de feldespatos (F) con epidota (E) diseminada.

Sin embargo en otras muestras de la roca granoblástica, la magnetita se observa en cristales eudrales y subdrales con bordes angulosos homogéneamente diseminados, formando ángulos de 120° con las plagioclasas recrystalizadas, característica indiscutible de que sufrieron un efecto metamórfico, como se observa en la fotomicrografía No. 3.



Fotomicrografía No. 4. "Mineral Normal". Cristales eudrales con bordes rectos de magnetita inyectados en una roca feldespática (Fl) con inclusiones de apatito (A).

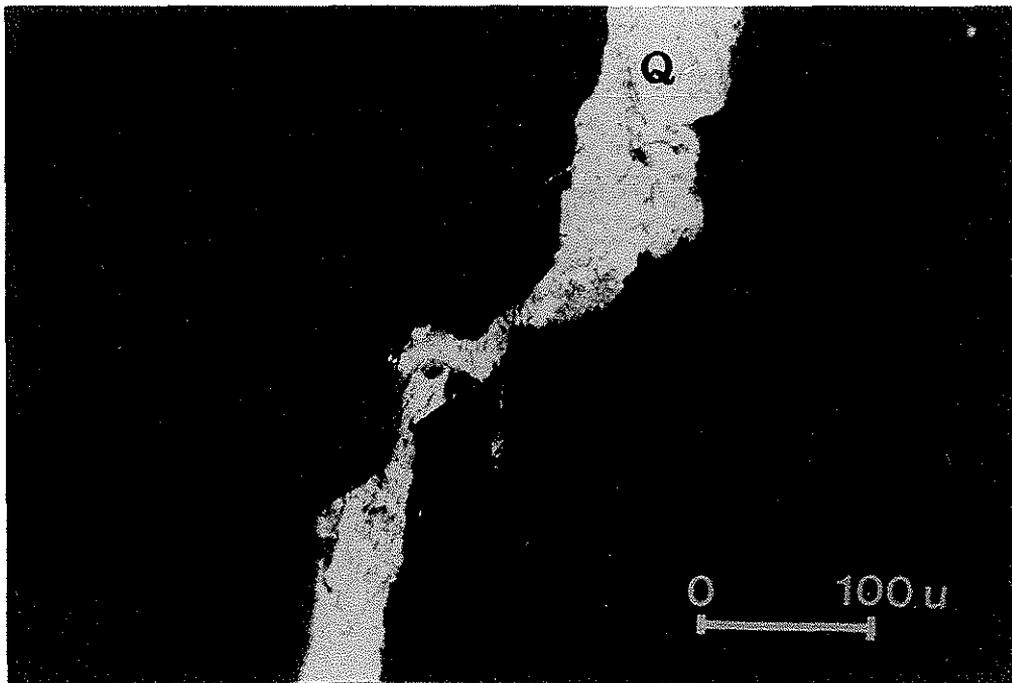
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las plagioclasas están asociadas a piroxenos como augita y en ocasiones diopsida e hiperstena, en menor proporción se distingue hornblenda, estos ferromagnesianos están alterándose principalmente a epidota y en menor proporción a clorita de color verde pistache.

En menor proporción se observan cristales euedrales de apatito de tamaños menores que 10 micrómetros y esfena menor a 70 micrómetros, incluidos en feldespatos y esta última también en calcita.

Como minerales secundarios se observan principalmente granate, calcita y escaso cuarzo.

La calcita es el mineral más abundante, en menor proporción se observa al cuarzo y ambos rellenan huecos principalmente en la magnetita, como se ilustra en la fotomicrografía No. 5.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fotomicrografía No. 5. Magnetita masiva con una fractura rellena de cuarzo (Q).

Los minerales de alteración principales son: sericita y minerales arcillosos por alteración de las plagioclasas, así como epidota y clorita verde pistache por alteración de los ferromagnesianos. Se distingue hematita intersticial por alteración de magnetita.

El mineral de alteración mas sobresaliente es clorita. La clorita presente en el mineral "normal" se caracteriza principalmente por su color verde pistache, una textura laminar continua, su alto índice de refracción y baja birrefringencia; este tipo de clorita se observó principalmente reemplazando a la roca feldespática y es común que sea cortada por vetas de magnetita, lo que sugiere que la cloritización de la roca inició antes del emplazamiento de la mineralización hidrotermal de magnetita.

Los relictos de la roca ígnea original o protolito, son de composición diorítica - andesítica y están constituidos básicamente por plagioclasas como andesina y oligoclasa, las cuales conservan su maclado. En menor proporción se identifica augita, hornblenda, apatito y esfena, estos últimos incluidos en feldespatos, así como calcita en vetillas. Se observa en la roca una alteración incipiente de epidota y clorita.

También presentan escasa magnetita diseminada, estos fragmentos de roca original son cortados también por vetas de magnetita, asociadas a cuarzo y calcita.

Los remanentes de la roca original se identifican sanos y están incluidos en forma aislada en el mosaico granoblástico de plagioclasas, observándose a partir de la roca original una aureola metamórfica, que provoca una decreciente recristalización de las plagioclasas, que exhiben de inicio un maclado bien definido y sin recristalización (roca sana), que cambia gradualmente o bruscamente a una recristalización bien marcada y desarrollada, con crecimiento de los cristales de plagioclasas, las cuales han perdido completamente su maclado, transformándose gradualmente la roca ígnea original a una roca granoblástica y metamórfica (ver fotomicrografías Nos. 4 y 5).

Así también, en algunas muestra aumenta significativamente el contenido de piroxenos y granate, ambos de textura granular de grano fino.

En otras muestras, la hornblenda y los piroxenos sufren una alteración marcada a epidota y escasa clorita.

Origen.- Metamorfismo de contacto de la clase química básica, presentando una aureola de metamorfismo con un zoneamiento gradual, que va de las facies piroxeno corneana, de alta temperatura y presión moderada, a facies corneana de epidota - hornblenda, de moderada temperatura y presión baja.

Clasificación.- Hornfels Feldespático con mena de magnetita, derivado de un protolito de andesita - diorita, ver fotomicrografía Nos. 3 y 4.

7.5. Estudio Minerográfico del Mineral "Normal"

7.5.1. Descripción Microscópica

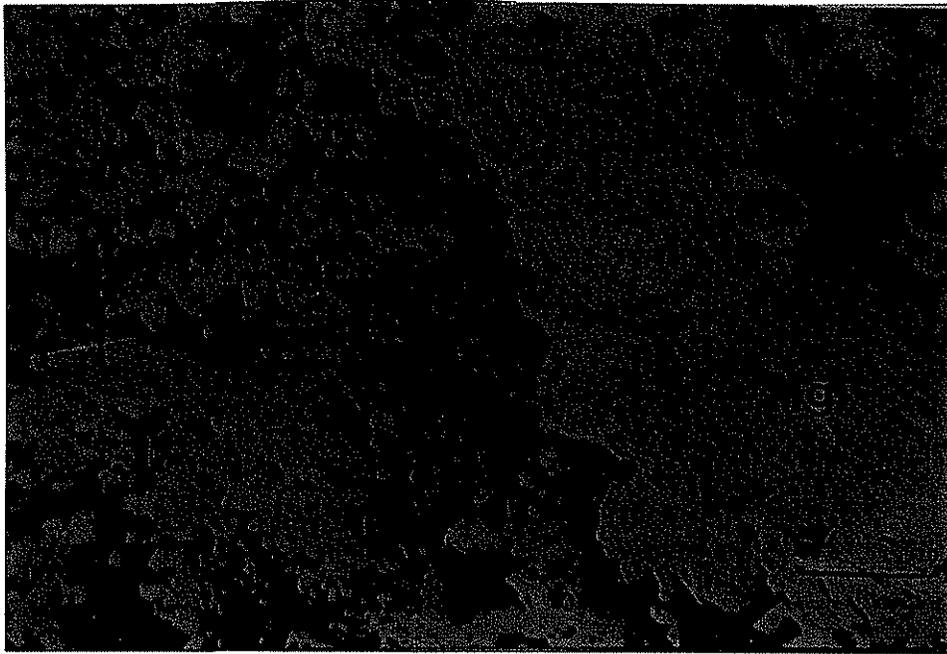
El estudio minerográfico se realizó sobre diferentes superficies pulidas de la mena, determinándose principalmente magnetita, en menor proporción pirita, calcopirita, pirrotita, marmatita, covelita y galena.

A continuación se describen las asociaciones mineralógicas y texturales de los minerales metálicos identificados en este estudio:

Magnetita.

Se presenta en dos formas texturales principales, que son: masiva y diseminada.

La magnetita masiva se caracteriza por un mosaico homogéneo masivo, con bordes rectos brechando a la roca hornfésica, quedando ésta en forma de islas dentro de la masa de magnetita (ver fotomicrografía No. 6).



Fotomicrografía No. 6. Magnetita masiva (Mg) con islas de roca feldespática (Fl).

Las masas de magnetita llegan a alcanzar un espesor de hasta 10.0 cm., en algunas muestras no se observan remanentes de roca, como se ilustra en la fotomicrografía 7.

La magnetita masiva esta asociada a calcita y cuarzo, éstas últimas depositadas en un evento posterior ya que se observan relleno de fracturas y huecos en la magnetita.

La magnetita diseminada se caracteriza por cristales euedrales, subeuedrales y anedrales con bordes rectos homogéneamente diseminados en la roca hornfésica, estos cristales tienen un tamaño promedio de 935.0 micrómetros, algunos de ellos llegan a medir hasta 7 mm, ver fotomicrografía No. 8.



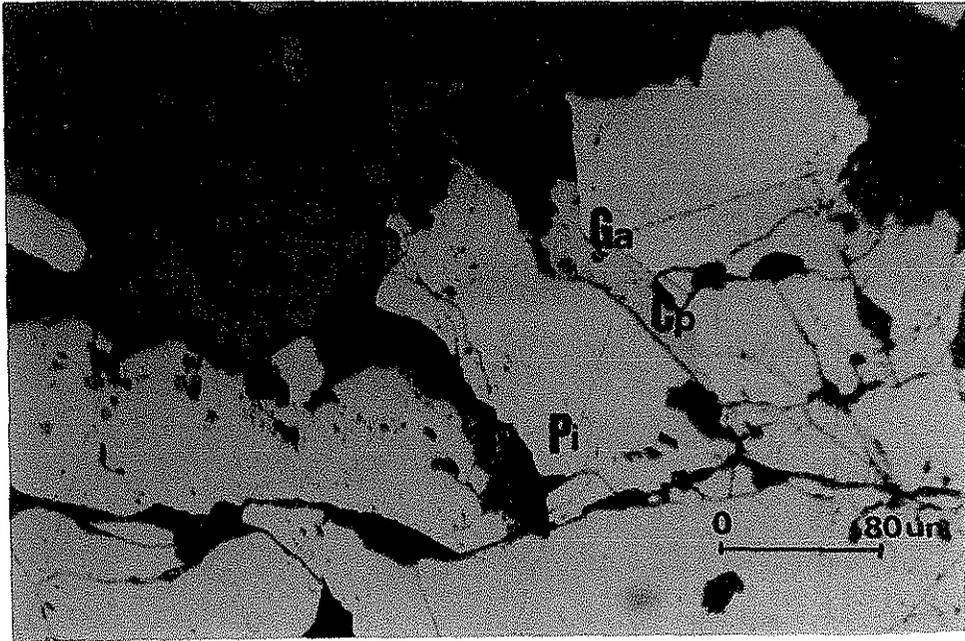
Fotomicrografia No. 7. Magnetita masiva (Mg) con una vetilla de calcita (mineral transparente (MT)).



Fotomicrografia No. 8. Magnetita masiva (Mg) con una vetilla de calcita (mineral transparente (MT)).

Pirita.

Se encuentra en menor proporción que la magnetita en cristales euedrales, subedrales y anedrales diseminados en la roca y generalmente rodea a la magnetita a través de sus bordes o rellena fracturas en la misma, se observaron cristales con un tamaño promedio de 250.0 micrómetros (ver fotomicrografía No. 9).



Fotomicrografía No. 9. Galena (Ga) seguida de calcopirita (Cp), revistiendo y relleno una fractura en pirita (Pi).

Calcopirita.

Rellena fracturas y huecos en la magnetita y pirita, tiene un tamaño hasta de 10.0 micrómetros (ver fotomicrografía No. 8).

Así también está en forma de exsoluciones tipo emulsión en la marmatita, estas tienen un tamaño promedio de 2.0 micrómetros.

Pirrotita.

Rellena huecos en la pirita, tiene un tamaño promedio de 5.0 micrómetros.

Marmatita.

Es un mineral muy escaso, se observó asociado a pirita. Tiene un tamaño promedio de liberación de 8.0 micrómetros.

Covelita.

Esta generalmente reemplazando a la calcopirita a través de sus bordes tiene un tamaño promedio de 5.0 micrómetros.

Galena.

Es un mineral muy escaso está asociada a la calcopirita y pirita. Tiene un tamaño de liberación promedio de 100.0 micrómetros (ver fotomicrografía No. 9).

Hematita

Es un mineral muy escaso, altera a la magnetita formando una textura laminar

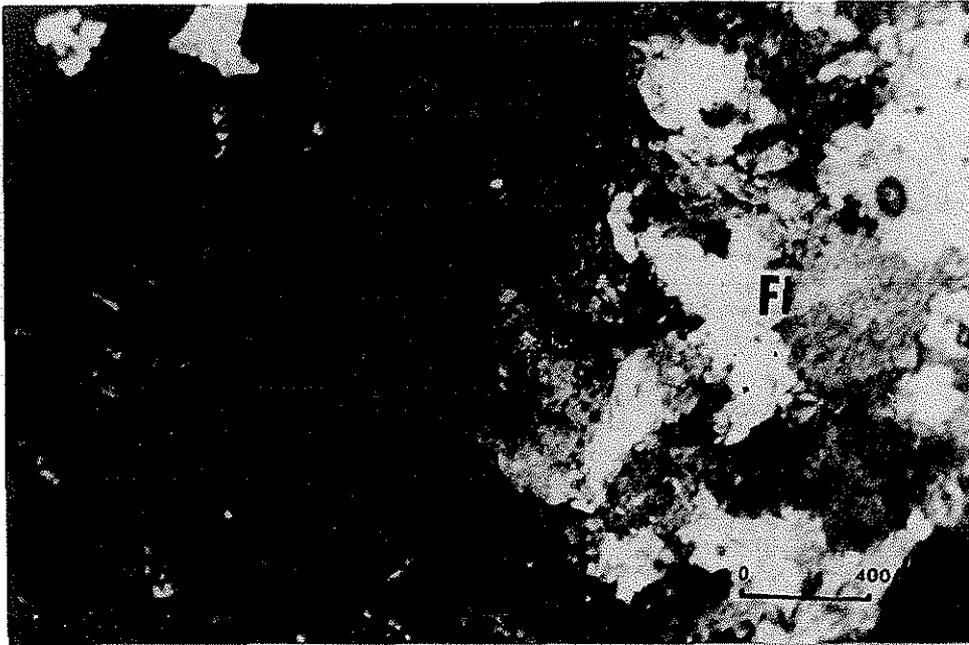
Origen de la mineralización.- Pirometamórfico de contacto, afectado por hidrotermalismo.

Clasificación.- Mena de magnetita con escasa mineralización de cobre, plomo, zinc y plata.

7. 6. Paragénesis del Mineral “Normal”

En la tabla No. 1 se propone la siguiente secuencia paragenética para el mineral “normal”, donde la longitud total de cualquier línea denota un tiempo tentativo sobre el cual se depositó un determinado mineral, pero no indica un tiempo absoluto. El tiempo relativo de depósito de un determinado mineral con respecto a otros minerales, queda indicado por la posición horizontal de la línea dentro de la tabla No. 1, correspondiendo las líneas de la izquierda a edades más antiguas que las líneas de la derecha.

La primera etapa de mineralización ocurrió por efecto de un evento pirometasomático en condiciones de temperatura elevada y presión moderada, que dio lugar a la formación de un hornfels feldespático a partir de un protolito andesítico, por efecto de una intrusión de composición diorítica, ocurriendo la depositación de magnetita que se inyecta a través de los planos más débiles de las plagioclasas recristalizadas, creciendo ésta en forma de cristales euedrales y subedrales, algunos de gran tamaño que llegan a medir hasta 7 mm, también la magnetita crece en la plagioclasa en forma de cruz (ver fotomicrografías 4 y 11). Posterior al pirometasomatismo ocurre un fuerte fracturamiento que afecta a la roca hornfelsica, marcando el inicio de la etapa hidrotermal con la cloritización de la roca huésped, para continuar con la depositación metálica a través de fracturas, donde fluye nuevamente magnetita, depositándose y reemplazando por sus bordes a la roca huésped. En este caso la magnetita rodea a través de las fracturas a la roca, provocando que esta quede como islas dentro de la masa de magnetita, dando un aspecto brechoide, ver fotomicrografía No. 10.



Fotomicrografía No. 10. Islas de roca hornféslica (FI) dentro de una masa de magnetita (en negro).

Este evento pirometasomático provocó una fuerte recristalización de las plagioclasas, las cuales perdieron su maclado y crecieron en grandes cristales de formas abanicadas, aumento el contenido de piroxenos y granate.

En otras muestras las plagioclasas recristalizadas se alteraron parcialmente a sericita y minerales arcillosos, los ferromagnesianos principalmente hornblenda y piroxenos se alteraron a epidota y en forma incipiente a clorita.

La recristalización de las plagioclasas aunado a zonas de debilidad entre sus planos ocasionó que la magnetita creciera, en forma de cristales bien desarrollados euedrales y subedrales, formando ángulos de 120° con las plagioclasas, así como cristales de magnetita en forma de cruz cruzando perpendicularmente y paralelamente los planos recristalizados de las plagioclasas, textura característica de altas temperaturas y enfriamiento rápido, nótese en la fotomicrografía No. 11, como las cruces de magnetita cortan los planos ya no bien diferenciados de las plagioclasas que constituyen la roca hornféslica.

Tanto los cristales bien desarrollados de magnetita como los de forma de cruz se encuentran homogéneamente distribuidos en la roca y caracterizan al mineral "normal" diseminado.



Fotomicrografía No. 11. Magnetita en forma de cruz dispuesta entre y través de los planos más débiles de las plagioclasas sódicas recrystalizadas.

Posteriormente, en una etapa de hidrotermalismo, se depositó nuevamente magnetita de textura masiva, cuarzo y calcita con abundante apatito, a través de los espacios abiertos en la roca y fracturas preexistentes en la magnetita primaria. Posterior a la magnetita ocurre la depositación de sulfuros, que principio con la depositación de pirita, la cual rodea por sus bordes a la magnetita.

Posterior a la llegada de pirita se depositó pirrotita, calcopirita, marmatita y galena, estos minerales cortan a la pirita y rellenan fracturas y huecos en la misma. La calcopirita forma exoluciones de tipo emulsión dentro de la marmatita, y la galena en ocasiones se observa intercrecida con calcopirita y en otras está revistiendo los bordes entre pirita y calcopirita como se observa en la fotomicrografía 9. La pirrotita está principalmente relleno huecos en la pirita, sin embargo esporádicamente también rellena huecos en magnetita y calcopirita.

Por efectos de oxidación se formó covelita a partir de calcopirita, así como escasa hematita por oxidación de pirita y magnetita.

El contenido de sulfuros en el mineral normal es bajo.

| MINERALIZACIÓN | PIROMETAZOMATISMO | HIDROTHERMALISMO |
|-----------------------|-------------------|------------------|
| OLIGOCLASA - ANDESINA | | |
| AUGITA - HIPERSTENA | | |
| APATITO | | |
| ESFENA | | |
| GRANATE | | |
| MAGNETITA | | |
| CHAMOSITA | | |
| EPIDOTA | | |
| CALCITA | | |
| CUARZO | | |
| PIRITA | | |
| CALCOPIRITA | | |
| MARMATTITA | | |
| GALENA | | |
| PIRROTITA | | |
| COVELITA | | |
| HEMATITA | | |

Tabla No. 1
 Secuencia paragenética propuesta para el mineral "normal" del yacimiento de Peña Colorada

7.7. Estudio Petrográfico del Mineral “Amorfo”.

En la realización de este estudio se estudiaron varias secciones de roca de muestras de diferentes zonas del mineral “amorfo”, las cuales se caracterizaron por una importante cantidad de clorita asociada a la magnetita y por un aumento en el contenido de sulfuros, calcita, cuarzo y apatito, en relación al mineral “normal”.

Durante el desarrollo del estudio petrográfico del mineral “amorfo” se destacan diferencias mineralógicas y texturales marcadas en relación al mineral “normal”.

A continuación se describen con detalle los resultados obtenidos de estos estudios petrográficos.

7.7.1. Descripción Megascópica.

Color.- Mena de color verde oscuro y negro metálico.

Textura.- Compacta, granular de grano fino a muy fino.

Mineralogía.- Magnetita granular de grano fino a muy fino sostenida en láminas de clorita, con abundante pirita y calcita relleno de fracturas en magnetita.

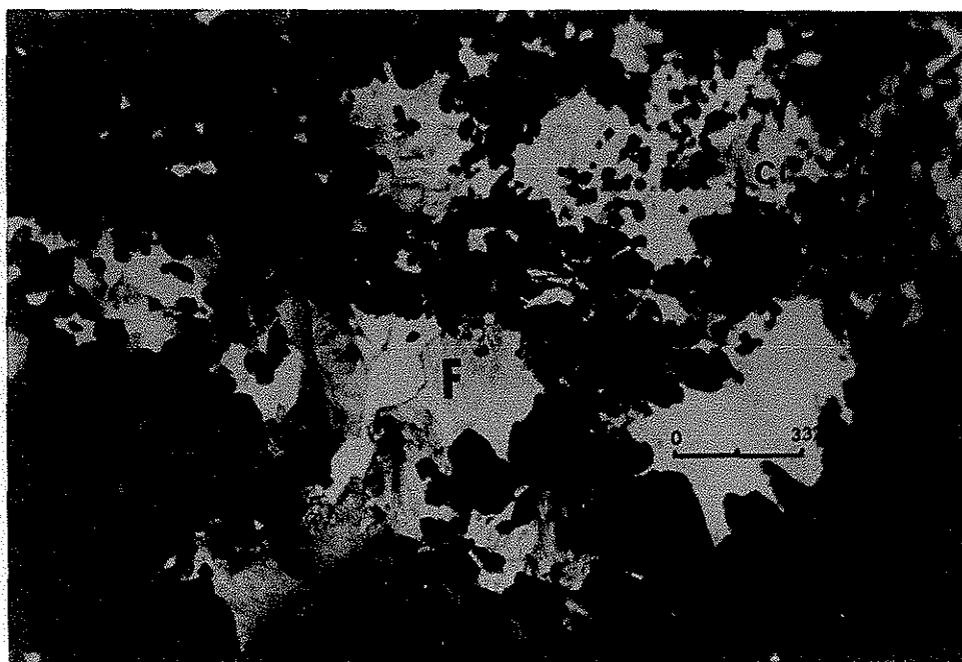
7.7.2. Descripción Microscópica.

Microtextura.- Reemplazamiento a través de fracturas e intersticios formando finalmente un intercrecimiento intergranular entre la magnetita y la clorita principalmente.

Mineralogía.- Se estudiaron en lámina delgada diferentes zonas del mineral “amorfo”, distinguiéndose en algunas de ellas (muy escasas láminas), un contacto gradual mineralógico y textural a mineral “normal”. Sin embargo el mineral “amorfo” típico, presenta diferencias marcadas con respecto al mineral “normal”. Por esta razón se considera una zona de contacto gradual entre ambos minerales.

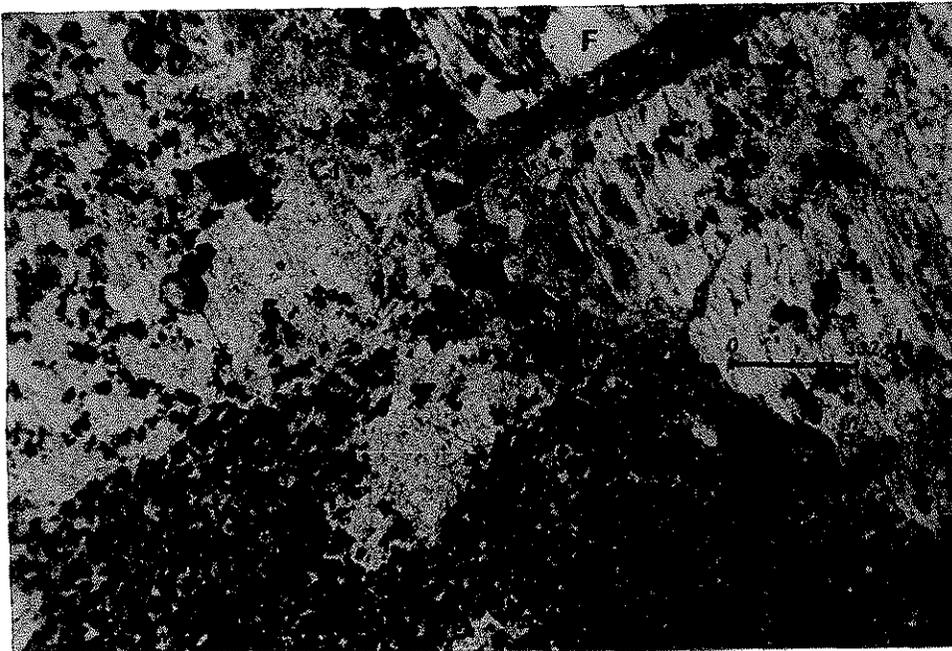
Está zona de contacto entre el mineral "normal" y "amorfo" se caracteriza por magnetita de grano fino (tamaños comprendidos entre 350 y 50 micrómetros), se presenta en agregados granulares con bordes subredondeados a subangulosos, rodeando abanicos o mosaicos de plagioclasas completamente recristalizadas con remanentes de piroxenos, estos están principalmente alterándose a epidota y clorita verde pistache, que en forma incipiente penetran también a través de los planos recristalizados y sensibles de las plagioclasas.

En algunas áreas se observa una proporción importante de calcita, la cual se deposita en huecos y vetillas que cortan a la magnetita y plagioclasas, de igual forma en estas zonas aumenta considerablemente la clorita característica del mineral "amorfo" cortando a través de fisuras las vetas de calcita y remanentes de plagioclasas cloritizadas y epidotizadas (ver fotomicrografía No 12).



Fotomicrografía No. 12. Mineral "Amorfo" de la zona de contacto con el mineral "normal". Caracterizándose por magnetita granular (en color negro) rodeando abanicos de andesina recristalizada (F) y parcialmente reemplazadas por clorita (Cl).

La clorita característica del mineral "amorfo" tiende a fluir y reemplazar a los remanentes de roca hornfésica feldespática (plagioclasas) ya de por sí fuertemente cloritizados, a través de planos de debilidad y fracturas preexistentes en la roca, donde se encuentran alojados los agregados granulares de magnetita, provocando que la clorita al llegar, fluya a través de los microespacios preexistentes entre los granos de magnetita, logrando que éstos se separen y junto con la clorita se desplacen, así también ocurre un ataque químico de la clorita alrededor de los granos de magnetita y la removilización de ambos minerales, provoca que los granos de magnetita presenten bordes corroídos y redondeados, como se ilustra en la fotomicrografía No. 13.



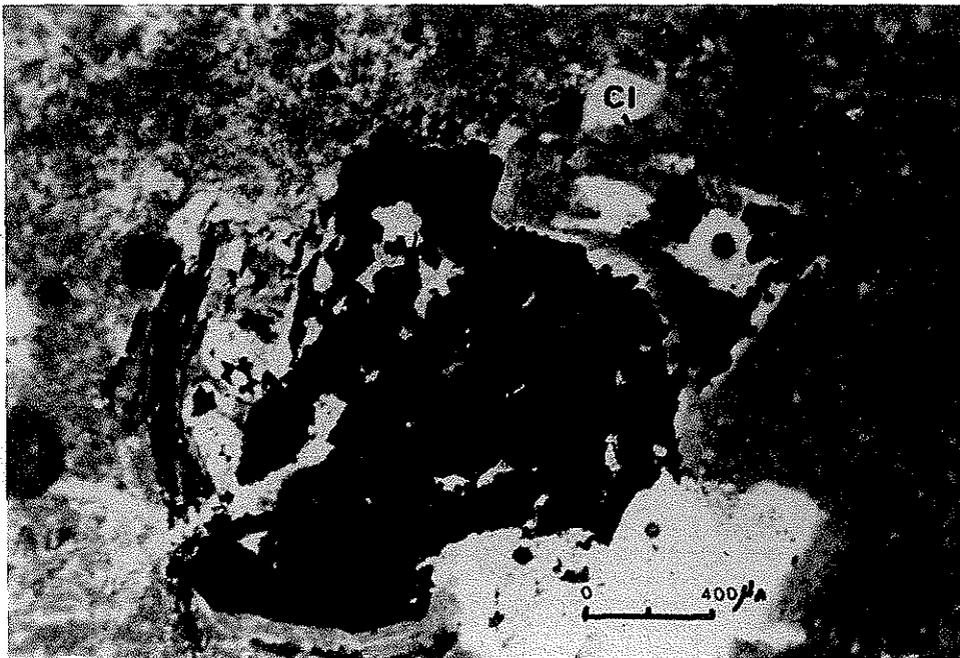
Fotomicrografía No.13. Roca brechada de composición hornfésica constituida por plagioclasas (F), donde se distinguen fracturas que cortan a la roca, estas fracturas están rellenas por agregados granulares de grano fino de magnetita (en negro), los cuales han sido disgregados por clorita (Cl) que fluye en una dirección preferencial.

El mineral "amorfo" típico se caracteriza por magnetita que sobresale principalmente por su tamaño de grano, forma de grano y su asociación con clorita. El tamaño de grano de la magnetita, gradúa de fino (150 a 50 micrómetros) a muy fino, que llega a ser hasta menos de un micrómetro. Tiene bordes subredondeados a redondeados, intercrecidos intergranularmente y homogéneamente distribuidos en una sabana de clorita,

provocando que exista una estrecha relación entre ambos minerales y por lo tanto una disminución en el grado de liberación de la magnetita en los concentrados magnéticos.

La clorita característica del mineral "amorfo" difiere notablemente de la clorita del mineral "normal" por su textura y grado de cristalinidad; en este caso tiene un color verde más oscuro que cambia a café hacia los contactos con la magnetita.

En algunos casos sobre todo en el amorfo con magnetita de grano muy fino, predomina más una clorita café, como se muestra en la fotomicrografía No. 14. Tiene principalmente una forma criptocristalina que gradúa ligeramente a plumosa; cuando esta clorita fluye a través de las fracturas preexistentes en la magnetita, llega a adquirir formas botroidales, tiene un índice de refracción alto y una birrefringencia de baja a muy baja. Estas características ópticas particulares de la clorita del mineral "amorfo" la diferencian notablemente de la clorita del mineral "normal".

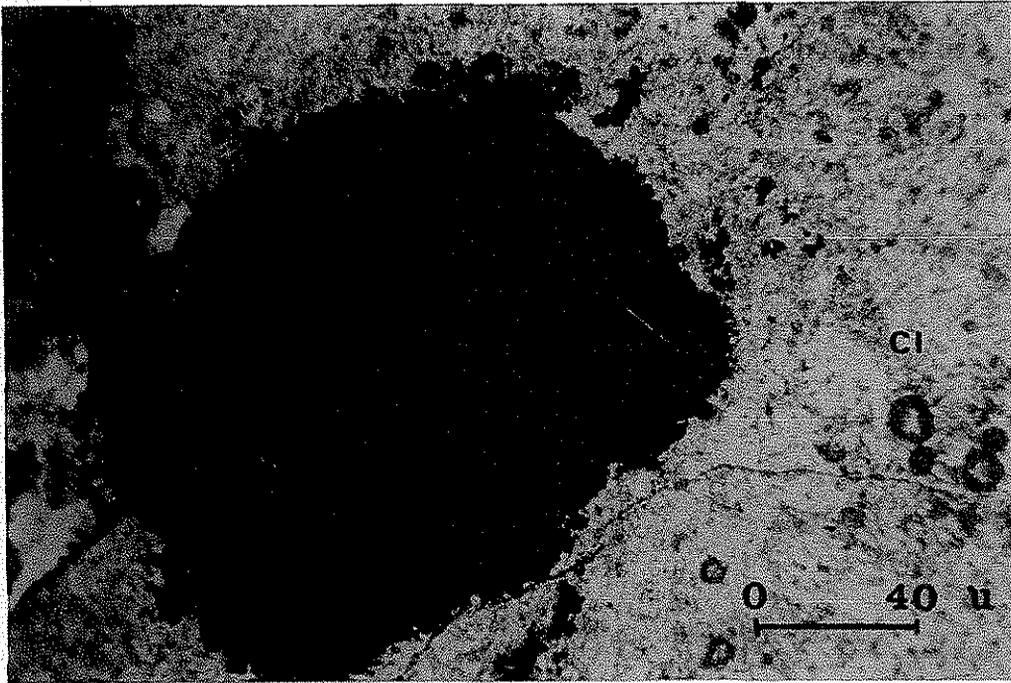


Fotomicrografía No.14. Grano de pirita rodeando a magnetita (en negro) , ambos giran sobre su eje en sentido a las manecillas del reloj, debido a un flujo de clorita en color café (CI) que viaja en una dirección preferencial y al fluir a través de una fractura preexistente en la roca, desplaza el grano de pirita - magnetita, provocando que ambos giren sobre su eje, se rompan y redondeen.

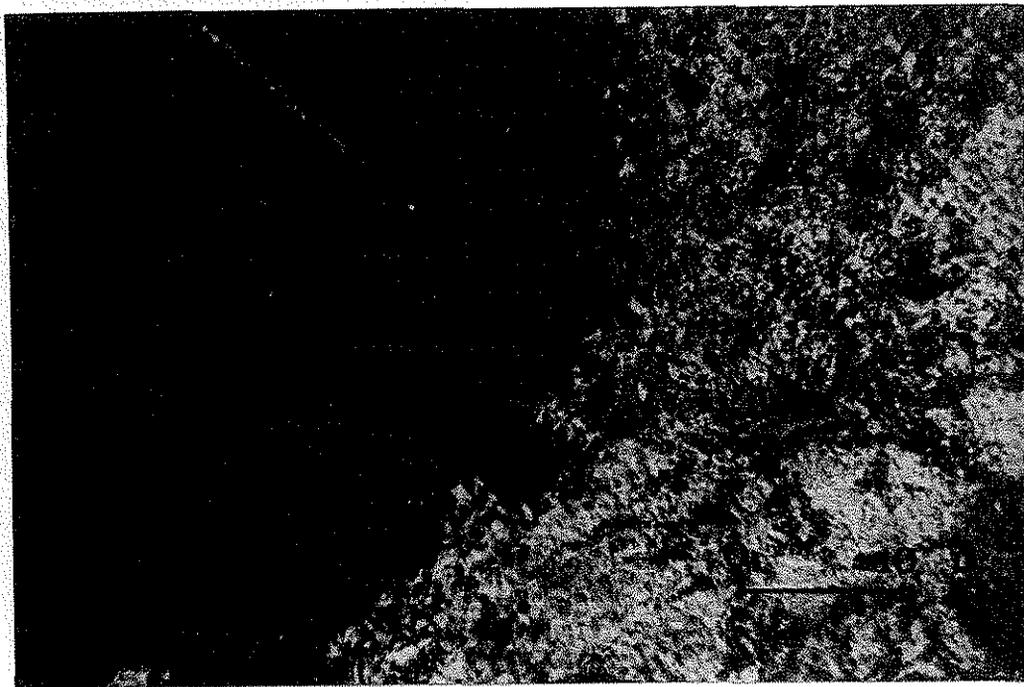
La clorita al fluir entre los agregados granulares de magnetita, separa los granos de ésta, removiendo estos en sentido a las manecillas del reloj (ver fotomicrografía No. 14), provocando que los granos ya separados individualmente adquieran bordes redondeados

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

y subredondeados, así como corroídos por reacción con la clorita, en este caso hacia los bordes del grano de magnetita la clorita adquiere un color café, finalmente a causa de ésta removilización. Los granos individuales de magnetita quedan distribuidos homogéneamente en una sabana de clorita, como se ilustra en la fotomicrografías 15 a, b.



Fotomicrografía No. 15 a. Mineral "Amorfo" de grano muy fino. Grano de magnetita (en negro) con bordes redondeados y corroídos por reacción con la clorita (Cl). La clorita se presenta en forma laminar plumosa.

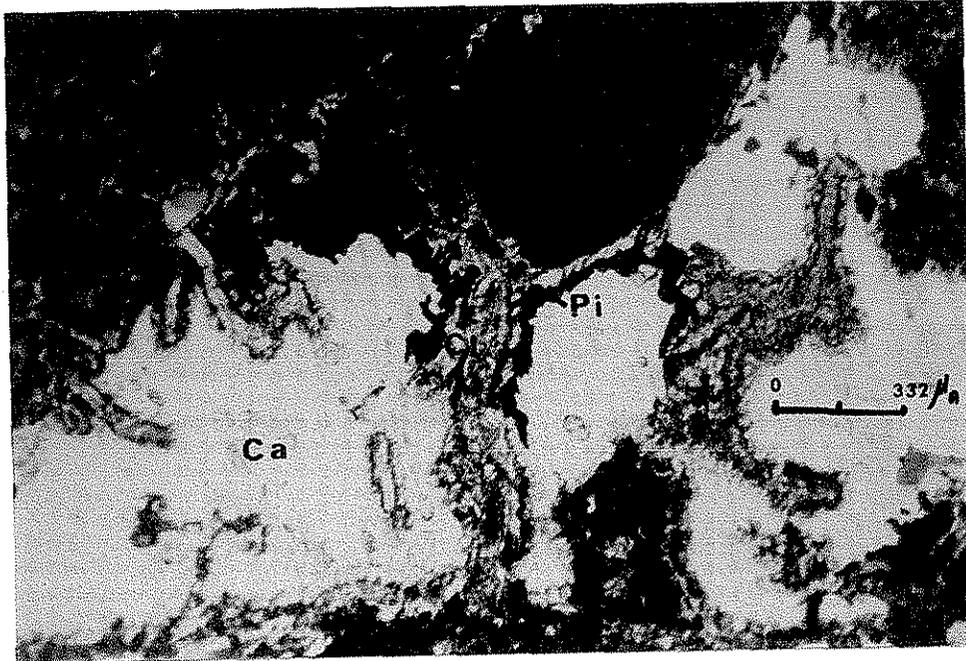


Fotomicrografía No. 15 b. Campo igual al anterior pero a mayor amplificación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por la importancia de este tipo de clorita y por el comportamiento que adquiere al ser procesada metalúrgicamente, se requiere llegar a su clasificación, con el fin de conocer sus características de depósito, para tener mayor información sobre las condiciones de formación de este mineral y su relación genética con la magnetita.

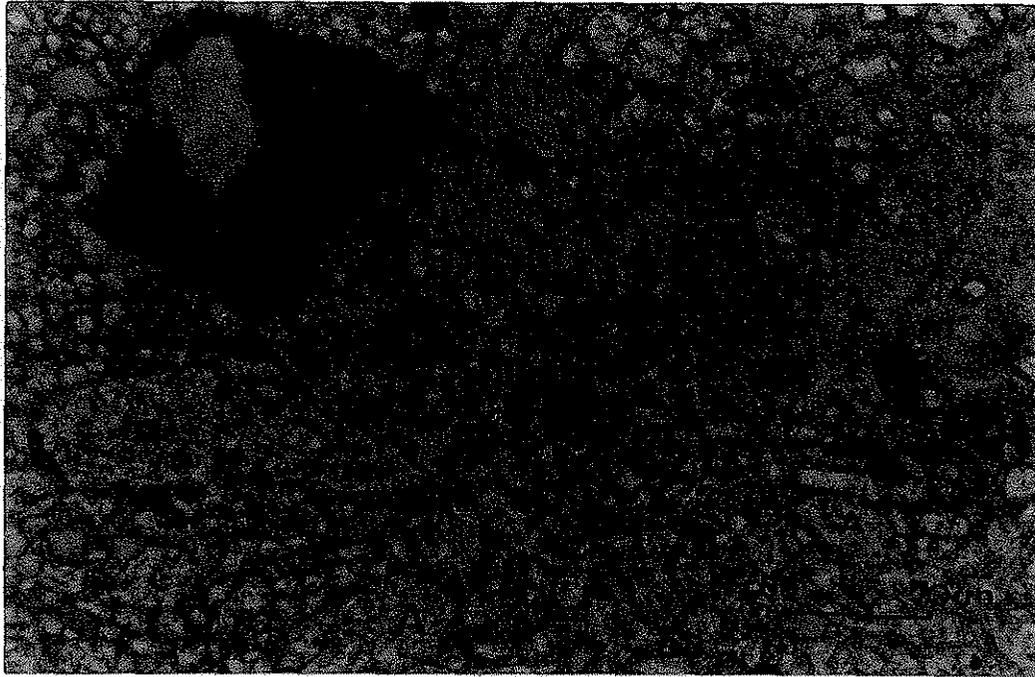
Es común observar en el mineral "amorfo" magnetita y pirita con huecos y fracturas rellenos de calcita, estos minerales son cortados por vetas de clorita verde oscuro, la cual forma texturas de cordones botroidales bien orientados, es decir que siguen una dirección preferencial, como se indica en la fotomicrografía No. 16.



Fotomicrografía No.16. Magnetita (en negro) rodeada por calcita (Ca) seguida de pirita (Pi). También la pirita rodea a calcita (Ca) seguida de clorita coloforme (Cl). En estos casos ya no se observan las plagioclasas, solo se conserva la calcita y aumentan los sulfuros, como pirita y pirrotita.

En algunas zonas muy localizadas se observan vetas de cuarzo granular hasta de 500 micrómetros de espesor, las cuales cortan a la magnetita en varias direcciones, la mayoría de estas vetas están muy asociadas a apatito, el cual se identifica en cristales eudrales homogéneamente diseminados e incluidos en el cuarzo, su tamaño varía de 2 a 15 micrómetros.

El apatito también se observó asociado fuertemente a algunas vetas de calcita, como se observa en la fotomicrografía No. 17.



Fotomicrografía No.17. Cristales subedrales y euedrales de apatito (A) incluidos en calcita (Ca).

Origen.- Hidrotermal, asociado a un ambiente acuoso.

Solo en la zona de contacto es posible distinguir reliquias de una roca semejante a la del mineral normal; en este caso las plagioclasas están completamente alteradas a minerales arcillosos y reemplazadas por clorita y escasa epidota, corresponde esta zona a un metamorfismo de contacto asociado a hidrotermalismo.

Clasificación.- Mena de magnetita. Roca formada principalmente por magnetita con clorita en intercrecimiento intergranular y en menor proporción calcita y pirita; solamente en la zona de contacto es posible diferenciar reliquias de una roca hornfésica de composición feldespática, semejante a la del mineral "Normal", completamente reemplazada por clorita.

7. 8. Estudio mineragráfico del Mineral "Amorfo".

Se analizaron diferentes muestras de mena pertenecientes al mineral "amorfo", las cuales se prepararon en superficies pulidas que se estudiaron al microscopio de polarización con luz reflejada. Los resultados obtenidos se anotan a continuación:

Los minerales metálicos identificados son enumerados en orden de su proporción estimada: magnetita, pirita y escasas: calcopirita, marmatita, pirrotita y hematita.

La descripción mineragráfica de los minerales metálicos identificados es como sigue:

7.8.1. Descripción Microscópica.

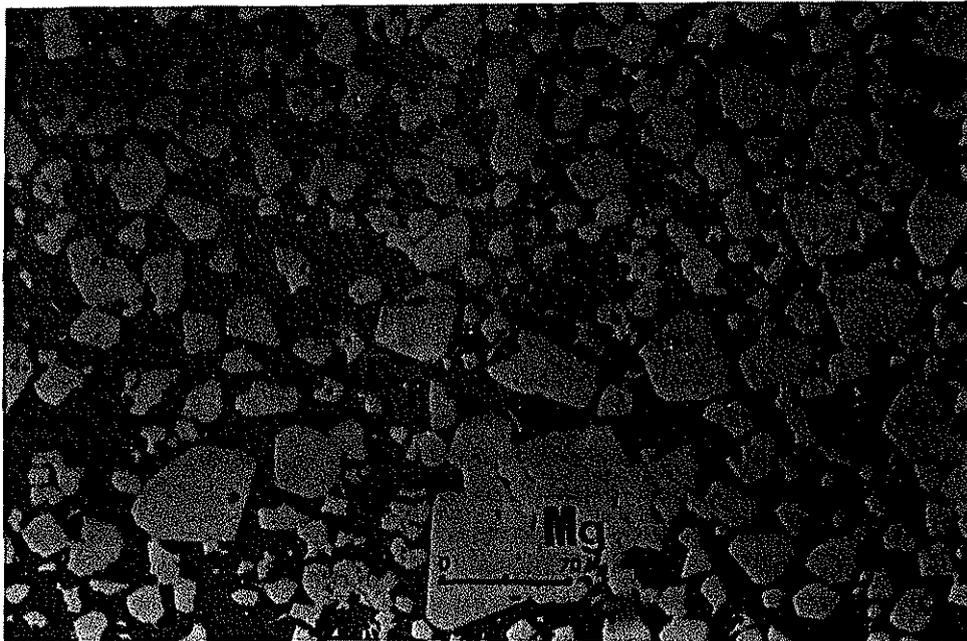
Magnetita

La relación textural de la magnetita del mineral “amorfo” tiene características muy particulares y definidas con respecto al mineral “normal”, se destaca en todas las muestras del mineral “amorfo”, una textura de intercrecimiento intergranular de la magnetita con los minerales de ganga, que son principalmente clorita y calcita.

La magnetita del mineral “amorfo” se caracteriza principalmente por la relación estrecha que existe con la clorita, es decir que existen diferentes grados de asociación y estrechez textural de la magnetita - clorita.

La magnetita se observa principalmente en forma granular de grano fino a muy fino formando un intercrecimiento intergranular con clorita, la relación tan estrecha entre ambos minerales, asemeja microscópicamente a una sabana de clorita con abundantes granos de magnetita homogéneamente distribuidos, donde la magnetita es revestida por la clorita. Los granos de magnetita tienen bordes predominantemente subredondeados y en menor proporción subangulosos, tienen un tamaño que varía de menos de 1 micrómetro a 150 micrómetros, destacando los tamaños muy finos, es decir entre menos de 1 micrómetro a 50 micrómetros, ver fotomicrografía 18.

El tipo de clorita asociada a la magnetita es criptocristalina y en el contacto con los granos de magnetita forma bordes de reacción provocando que la clorita adquiera un color café verdoso.



Fotomicrografía No.18. Granos de magnetita (M) con bordes subredondeados y subangulosos contenidos en clorita (en negro).

La magnetita se encuentra asociada a sulfuros como pirita, calcopirita, pirrotita, marmatita, galena y covelita.

La pirita y calcopirita forman vetillas dentro de la magnetita, las cuales tienen espesores que varían de 5 a 50 micrómetros; generalmente ambos minerales rodean a la magnetita (ver fotomicrografía 18).

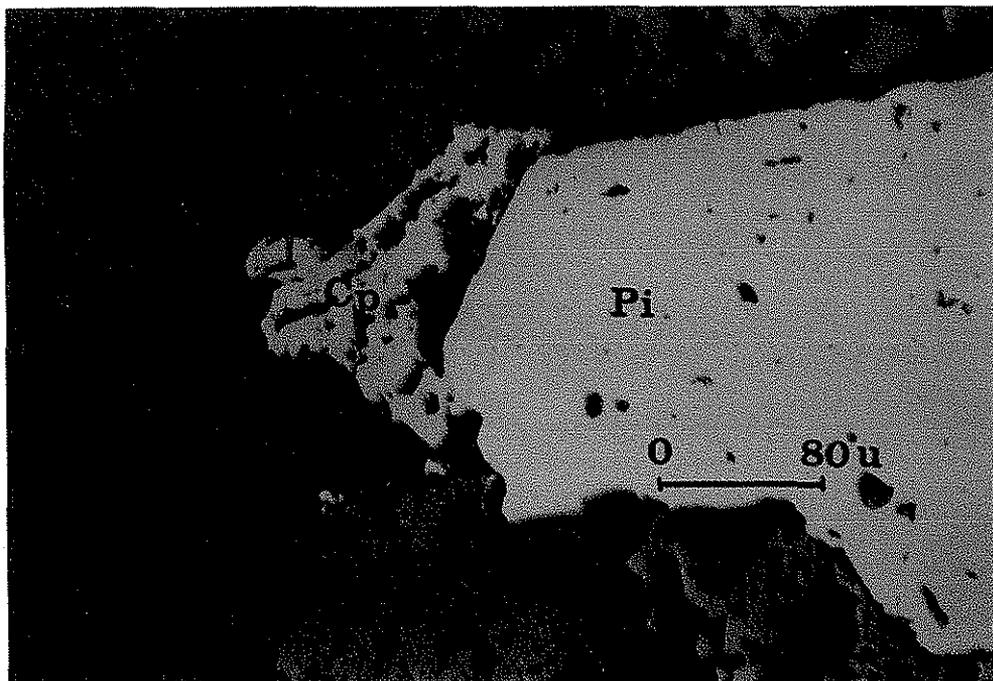
La pirrotita se observó relleno de huecos en la magnetita, los huecos llegan a medir hasta 5 micrómetros.

La marmatita, galena y covelita, se encuentran en pequeña proporción y su asociación con la magnetita es limitada.

Pirita

Generalmente se observa en pequeñas masas rodeando a la magnetita a través de sus bordes y a través de fracturas (formando vetillas en magnetita); en forma aislada también en cristales anedrales diseminados en la clorita.

Las masas de pirita llegan a medir hasta 3 cm. El tamaño de los cristales individuales varía de 1 a 25 micrómetros, como se observa en la fotomicrografía No. 19.



Fotomicrografía No.19. Pirita (Pi) relleno de una fractura en magnetita (gris oscuro) y calcopirita (Cp) rodeando a la pirita.

Calcopirita

Rellena fracturas en la pirita con espesores hasta de 5 micrómetros, ver fotomicrografía 19. La calcopirita también se observa en forma de exsolución tipo emulsión en la marmatita, las exsoluciones tienen un tamaño de menos de 1 a 10 micrómetros.

Marmatita

En cristales anedrales aislados incluidos en clorita; generalmente presenta exsoluciones de calcopirita en forma de emulsión.

El tamaño de la marmatita varía de 10 a 20 micrómetros.

Pirrotita

Se observa rellenando huecos en la pirita y tiene un tamaño que varía de 2 a 5 micrómetros.

Ocasionalmente se observa rodeando a la magnetita.

Covelita

Es un mineral escaso y se encuentra alterando a la calcopirita, formando márgenes en este mineral hasta de 6 micrómetros..

Hematita

Altera en forma aislada a la magnetita formando una textura laminar.

Origen.- Hidrotermal ocurrido en un ambiente acuoso.

Clasificación.- Mena de magnetita con mineralización incipiente de plomo, zinc, cobre y plata.

7.9. Paragénesis del Mineral “Amorfo”

Para poder explicar la paragénesis del mineral “Amorfo”, hay que partir del conocimiento de la paragénesis de la magnetita del mineral “Normal”, la cual por sus características texturales y mineralógicas observadas, nos presenta de inicio una magnetita euedral y subedral homogéneamente diseminada en la roca encajonante, formada en el evento pirometasomático. Posterior a este evento ocurrió una fase hidrotermal con el inicio de la depositación de magnetita masiva, que rellena fracturas en una roca hornfésica parcialmente cloritizada; en algunos casos, cuando las fracturas en la roca son más abiertas,

la magnetita masiva forma agregados cristalinos con buen desarrollo de sus estructuras cristalinas, algunos de estos cristales llegan a medir hasta 7 mm de tamaño. Este tipo de magnetita característica del mineral "Normal" no se observa en el mineral "amorfo" típico, depositado en un ambiente acuoso.

Después del evento pirometasomático que dio lugar al mineral "Normal" sobrevino un evento hidrotermal, con depositación inicial de magnetita en las fracturas preexistentes en la roca. En el caso del mineral "Amorfo" la magnetita también tuvo un origen hidrotermal, correspondiendo al mismo periodo en tiempo, al ocurrido en el mineral "Normal", la diferencia radica; que en el evento hidrotermal que dio lugar a la magnetita del mineral "Amorfo", este ocurrió en un medio ambiente acuoso.

Después de la depositación de la magnetita continuó la depositación de calcita, cuarzo y apatito, para continuar con la depositación de sulfuros representados inicialmente por pirita, la cual se deposita en masas masivas que cortan a la magnetita, calcita y cuarzo. La pirita también se observa en cristales individuales bien desarrollados, diseminados en la clorita.

Posteriormente a la pirita se deposita calcopirita y marmatita, seguida de galena y pirrotita, las cuales rellenan vetillas en la magnetita. En una fase final e incipiente, ocurre el reemplazamiento de calcopirita a covelita y de magnetita a hematita.

La magnetita del mineral "Amorfo" de origen hidrotermal, se distingue de la magnetita del mineral "normal" por presentarse en agregados granulares unidos entre sí o separados en granos individuales, generalmente de tamaños muy finos (tamaños menores de 56 micrómetros), estos granos son subredondeados y están contenidos en una masa de clorita criptocristalina de color verde oscuro, formando ambos una textura de intercrecimiento intergranular, no se observan ya remanentes de roca y solo predominan la magnetita y la clorita. Así también se observan los minerales típicos de hidrotermalismo que caracterizan también al mineral "Normal", como son: calcita – cuarzo – apatito de una fase hidrotermal inicial, para continuar con la depositación de pirita seguida de calcopirita, marmatita, galena y pirrotita, así como cantidades mínimas de covelita y hematita, estos minerales son mas abundantes en el mineral "Amorfo".

Tanto la calcita como el cuarzo y los sulfuros forman vetas en los agregados granulares de magnetita, que son posteriormente cortados por una clorita verde oscuro, criptocristalina y coloforme (bertierina).

En la etapa final del hidrotermalismo ocurre la emanación en un medio acuoso de soluciones ricas en SiO_2 , FeO , MgO , que se precipitan y enriquecen con el Fe al contacto con la magnetita, por intercambio iónico entre el magnesio y el hierro de la magnetita, dando lugar a la formación de la clorita variedad chamosita – bertierina.

La bertierina es típica del mineral "Amorfo" y se caracteriza por una masa criptocristalina en agregados y coloforme, de color verde oscuro que varía a un café oscuro hacia los bordes y en contacto con la magnetita, esto por reacción entre ambos minerales,

observándose la magnetita con bordes corroídos y redondeados. La clorita al precipitarse en contacto con la magnetita, rodea y corroe sus bordes, ver fotomicrografías Nos. 15 a, 15 b y 18. Ambos minerales; magnetita y clorita se desplazan juntos, con la magnetita granular suspendida y con vetas de calcita, cuarzo y sulfuros, la magnetita va separándose en granos individuales por acción del movimiento y girando, redondeándose sus bordes, quedando en granos individuales subredondos homogéneamente distribuidos en la sabana de clorita, también éstos con huellas de reacción al contacto con la clorita, formándose márgenes alrededor de la magnetita, adquiriendo la clorita un tono café muy oscuro.

Por este movimiento también la calcita asociada a la magnetita, queda distribuida homogéneamente en la clorita, el cuarzo al igual que los sulfuros permanecen asociados a magnetita, por relleno de microfisuras ó rodean a los granos de magnetita principalmente pirita y calcopirita, también estos se observan como granos aislados contenidos en la masa de clorita.

En la secuencia paragenética se propone un evento de origen hidrotermal, que dio lugar a la depositación de la magnetita en un medio acuoso, el cambio brusco de temperatura y presión provocó en la magnetita del mineral "amorfo", el tamaño de grano tan fino, así como su asociación textural estrecha con la clorita de la variedad bertierina, mineral diagenético asociado únicamente a la magnetita del mineral "amorfo", lo que sugiere; como ya se indicó, un medio ambiente de depositación acuoso, donde las condiciones de reducción prevalecieron con un pH mayor a 7, y en un medio reductor favorecido por la descomposición de materia orgánica.

Existe una zona de contacto entre la magnetita del mineral "Normal" y la magnetita del mineral "amorfo", la cual se caracteriza por una asociación textural y mineralógica intermedia entre el mineral "Normal" y "Amorfo", es decir; se observa un agregado granular de magnetita de grano fino a muy fino (entre menos de 1 micrómetro a 100 micrómetros) con bordes subredondeados, rellenando fracturas en la roca hornfésica brechada, formada principalmente por plagioclasas muy alteradas, a su vez esta magnetita granular es arrancada de su acomodo inicial por un flujo de clorita criptocristalina de color verde oscuro, que invade los espacios intergranulares existentes entre los granos de magnetita, separando estos y transportándolos, cubriendo ambos, las reliquias de la roca original ya muy alterados, cuyo brechamiento y alteración favorece la redepositación de la magnetita y reemplazamiento de la bertierina.

Conforme va aumentando la magnetita en forma de agregados granulares de grano muy fino, aumenta también el contenido de clorita verde oscuro, ambos minerales avanzan y reemplazan fuertemente a la roca hornfésica, quedando ésta como reliquias rectangulares.

La Tabla 2, ilustra la secuencia paragenética propuesta para el mineral "Amorfo". En este caso la depositación de la mineralización se indica a través de líneas horizontales que representan tiempos relativos de depositación mas no tiempos absolutos; así una línea corta podría representar un tiempo mas largo con respecto a una línea larga y viceversa.

| MINERALIZACIÓN | HIDROTHERMALISMO | DIAGENESIS |
|--|------------------|------------|
| MAGNETITA CALCITA CUARZO APATITO PIRITA CALCOPIRITA MARMATITA GALENA PIRROTITA COVELITA BERTIERINA | | |

Tabla No. 2
Secuencia paragenética propuesta para el mineral "amorfo" del yacimiento de Peña Colorada

8. ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS.

Con el fin de tener una mejor idea del ambiente de depósito en el cual se formó la magnetita y la clorita, por su estrecha relación entre ambas, se realizaron estudios complementarios, que sirvieran de apoyo para un mayor conocimiento del mineral “amorfo”, que nos permita correlacionar los eventos geológicos – genéticos que le dieron lugar con la génesis del mineral “normal”, entender porque existen diferencias de comportamiento de ambas magnetitas, al ser tratadas metalúrgicamente.

Estos estudios complementarios son:

8.1. Difracción de Rayos X de las cloritas.

Con el fin de clasificar las variedades de clorita características de los minerales “normal” y “amorfo”.

8.2. Análisis al Microscopio de polarización con luz transmitida.

Se pretende identificar el mayor número de propiedades ópticas de la clorita típica del Mineral “normal” y “amorfo” y de esta forma corroborar lo determinado por difracción de rayos x.

8.3. Difracción de Rayos X de los dos diferentes tipos de magnetita.

Con el objeto de comparar los difractogramas obtenidos entre la magnetita del mineral “amorfo” y “normal”.

8.4. Análisis Térmico diferencial y gravimétrico.

Tiene como fin corroborar los estudios de difracción de rayos x, en el estudio de las cloritas, determinando la temperatura en que pierden agua de cristalización, para conocer su contenido en %, así como otros datos adicionales en cuanto su estructura. Esta técnica también se aplicará en el estudio y comportamiento térmico y gravimétrico de la magnetita de ambos tipos de mineral “normal” y “amorfo”.

8.5. Análisis por Espectroscopia de Mössbauer.

Esta técnica permite conocer el grado de oxidación de la magnetita y clorita, Permitiendo de esta forma obtener datos y diferencias sobre su estructura, se aplicará para ambos tipos de mineral “normal” y “amorfo”.

8.6. Análisis por Microsonda Electrónica de Barrido.

Con objeto de apoyar y corroborar los análisis por difracción de rayos X y efecto de Mössbauer.

8.7. Análisis al Microscopio de Fuerza Atómica.

Con el fin de identificar diferencias en los dominios magnéticos de la magnetita en ambos tipos de Minerales.

8.1. Difraccion de Rayos X de las Cloritas.

8.1.1. Antecedentes

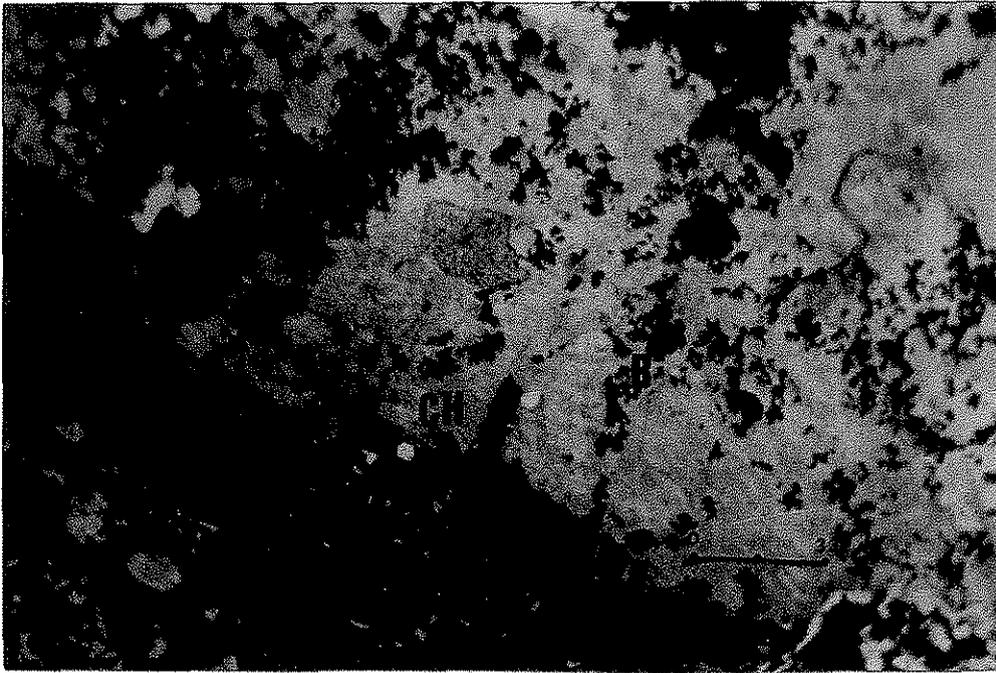
Inicialmente se distinguen dos tipos de clorita que difieren mucho en color y textura.

La primera asociada al mineral “normal” se caracteriza por un color verde pistache y una textura predominantemente laminar, se le identifica en algunas zonas reemplazando a la roca encajonante que en este caso es un hornfels de composición feldespática (ver fotomicrografía 20).

8.1.2. Objetivo.

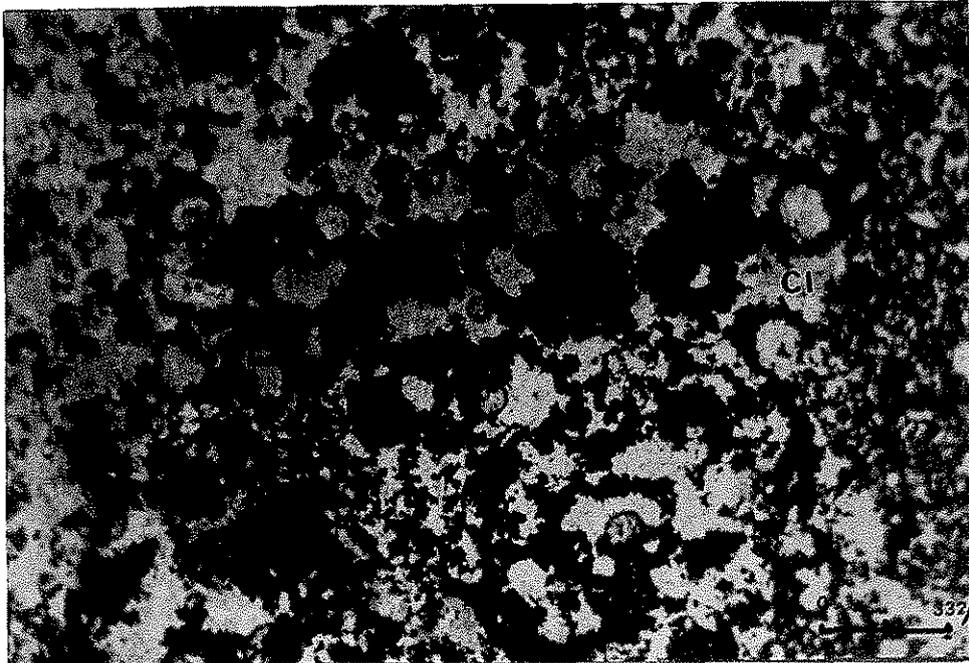
La realización del estudio por Difracción de Rayos X se decide con el fin de identificar las variedades de clorita, presentes en ambos tipos de mineral y encontrar diferencias entre las mismas que proporcionen información sobre su origen.

De igual forma se pretende encontrar diferencias estructurales entre los dos tipos de magnetita del mineral “normal” y “amorfo”.



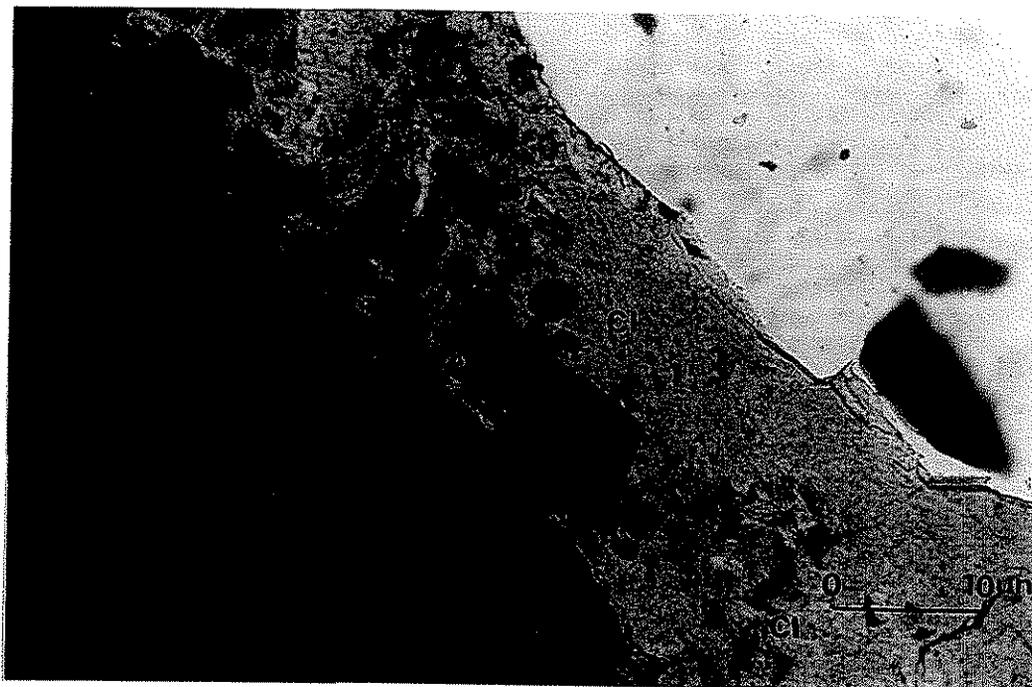
Fotomicrografía No. 20. Clorita típica del mineral “Normal” en color verde pistache (Ch), reemplazando a la roca hornféslica. Así como clorita verde oscuro (B) típica del mineral “amorfo” relleno junto con magnetita (en negro) fracturas en la roca.

La clorita asociada al mineral “Amorfo” es de un color verde más oscuro, como se ilustra en la fotomicrografía 20 e identificada con la letra B, aparece en forma de grandes placas, formadas por agregados criptocristalinos, plumosos y granulares, asociada a abundante magnetita en granos redondeados con bordes corroídos de tamaño fino a muy fino, homogéneamente distribuidos en ésta clorita (fotomicrografía 20). Además se distingue un borde de reacción muy marcado entre la clorita y la magnetita, provocando que la clorita adquiera un color café, ver fotomicrografías 21, 22 y 23.

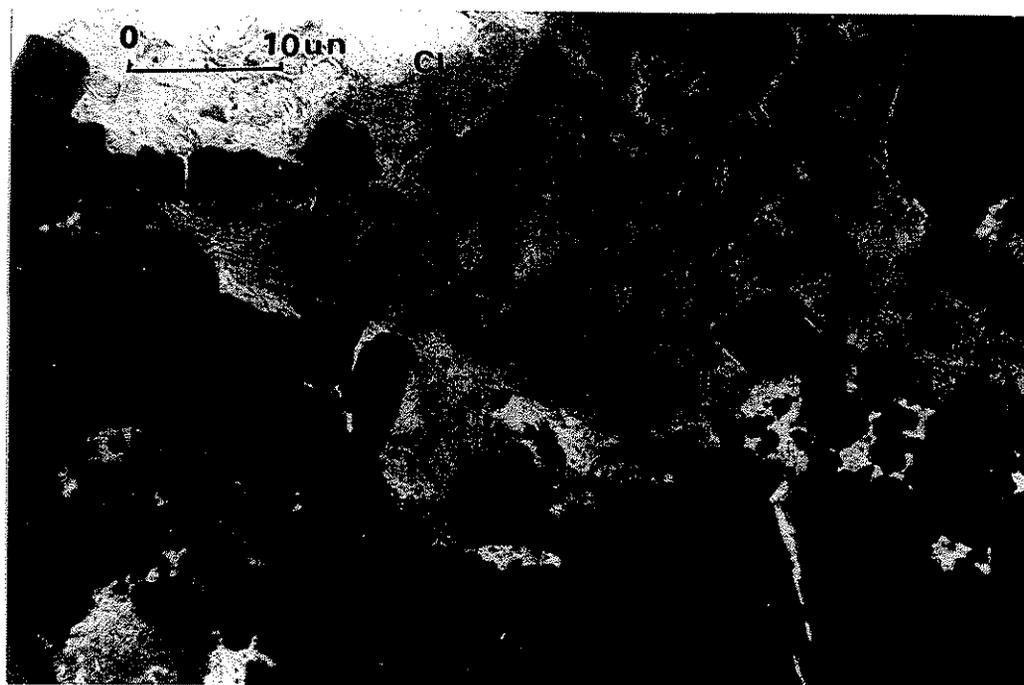


Fotomicrografía No.21. Clorita del mineral “Amorfo” en color verde – café oscuro (Cl), con abundante magnetita granular (en negro) homogéneamente distribuida.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotomicrografía No.22. Clorita (Cl) del mineral “amorfo” en color verde con un matiz café claro, que cambia drásticamente a un color café translúcido en contacto con magnetita (en negro).



Fotomicrografía No. 23. Clorita del mineral “amorfo” en color café translúcido por reacción con la magnetita.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

8. 1. 3. Método de trabajo y desarrollo

Para poder estudiar tanto la clorita como la magnetita en ambos tipos de mineral, se emplearon productos metalúrgicos obtenidos a partir de las cabezas del mineral "normal" y mineral "amorfo", los cuales fueron obtenidos a partir de la siguiente secuencia de tratamiento y condiciones de operación, como se indica a continuación:

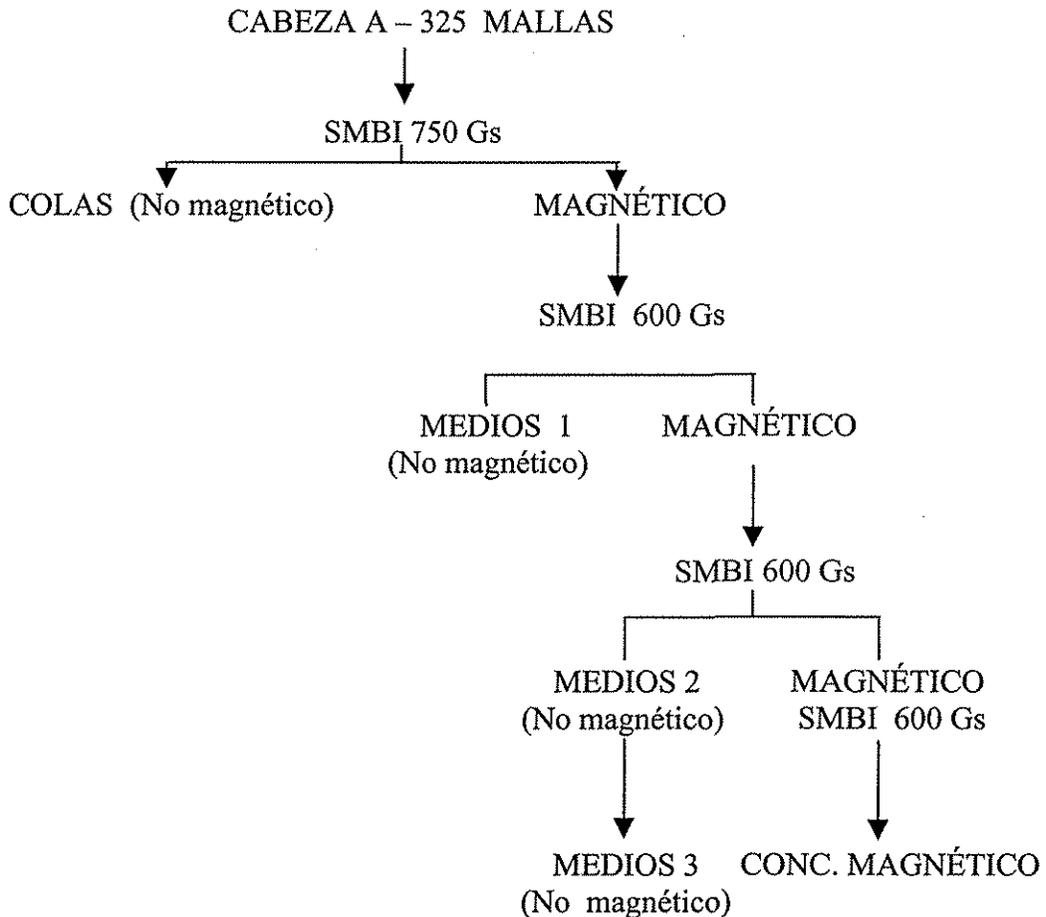


Figura No. 3

Secuencia de tratamiento y condiciones de operación

Nota.- SMBI.- Separación magnética con núcleo magnético de imán permanente.

Con el fin de identificar el tipo de clorita se corrió por difracción de rayos x los productos de colas (producto no magnético), del mineral "normal" y mineral "amorfo".

Se eligieron estos productos porque al ser analizados por microscopía óptica de polarización, presentaron una concentración importante de clorita característica tanto del mineral "normal" como "amorfo".

Los resultados obtenidos en ambas gráficas reportan la reflexión $d = 7.18 \text{ \AA}$, la gráfica del mineral "normal" reporta además el valor de reflexión 14.4 \AA , valores principales de la clorita, ver gráficas Nos. 1 y 2, que confirma la presencia de clorita para el mineral "normal", **no así para el mineral "amorfo"**, ya que los valores de reflexión asemejan mas a una caolinita, contrario a lo observado por microscopía de polarización para el caso de la clorita del mineral "amorfo".

En el difractograma del mineral "amorfo" esta indefinida la reflexión $d = 14.4 \text{ \AA}$, por esta razón se sospecha que la estructura de la clorita podría ser semiamorfa por alteración, ó tener un comportamiento estructural diferente. Esta situación nos lleva a realizar nuevos estudios por difracción de rayos x, pero ahora alterando la estructura de la clorita.

Brown y Bailey (1962), reportan que en las variedades de clorita ocurren variaciones en la composición química, debido a estructuras que denominaron politipos, donde el 80 % de las cloritas tienen una estructura cristalina en placas similar a la mica, que alternan con placas tipo brucita a las que llaman POLITIPO 11b, en las cuales la estructura que se forma es una celda unidad monoclinica.

Otro tipo de cloritas remanentes (Brown y Bailey, 1962) les llaman del POLITIPO 1b, basadas en una celda unidad ortohexagonal (u orthorrómbica).

De acuerdo con Brown y Bailey, 1962, el término politipos está en función de la composición de las placas y no en la secuencia del acomodo de las mismas. La formación de politipos es debida tanto a condiciones de equilibrio, como a la energía disponible con relación al ambiente de formación. La clorita que se forma en condiciones estables en un grado normal de metamorfismo en condiciones de mediana y alta temperatura, es siempre del politipo 11b.

La clorita diagenética formada en sedimentos marinos es del politipo 1b, tiene una pobre cristalinidad y un alto contenido de fierro ferroso (Brow y Bailey, 1962).

Estructuralmente el grupo de las chamositas se caracterizan por dos tipos diferentes de acomodo estructural en sus celdas cristalinas (Brown y Bailey, 1962).

Brindley y otros (1968) reconocen también dos tipos de chamositas; una tiene un valor 2:1:1 y es una clorita llamada "chamosita" y otra con valores 1 : 1 llamada "bertierina", se diferencian porque la primera es monoclinica y la segunda ortorrómbica, Brindley (1961).

Ambas chamositas se caracterizan por un alto contenido de fierro ferroso (FeO), James, 1966, p. W5.

8. 1. 4. Clasificación de la clorita del mineral “normal” y mineral “amorfo”

La bertierina es un mineral autígeno generalmente del politipo clorita 1b con una cantidad importante de Fe O, tiene un color verde que se mantiene en condiciones reductoras y la presencia de materia orgánica en descomposición (Dorothy Carrol, 1970).

En este caso la bertierina del politipo 1 b, tiene una estructura de pobre cristalinidad y los difractogramas dan solamente un valor de reflexión $d = 7 \text{ \AA}$ (001). Por efecto de la oxidación; el Hierro ferroso va hacia el Hierro férrico y el patrón de difracción asemeja al de una caolinita desordenada (Dorothy Carrol, 1970).

La bertierina tiene datos de Rayos X y un modelo de calentamiento semejante a la caolinita, la chamosita ó clorita ferrosa tiene datos de Rayos X y un patrón de calentamiento semejante o igual a la clorita común, esto es; que la estructura de la bertierina por calentamiento colapsa alrededor de los 550 °C, apareciendo el difractograma con un espectro amorfo y la estructura tipo clorita, no colapsa a 550 ° C, por el contrario, aumenta la intensidad de la reflexión $d = 14 \text{ \AA}$ y decrece también el valor $d = 7 \text{ \AA}$ (Dorothy Carrol, 1970).

En un estudio a detalle que realizo S. W. Bailey en 1991, sobre la composición y estructuras de otros filosilicatos trioctahedrales 1:1, hace énfasis sobre el término de bertierina, que preferentemente debe aplicarse a un “**silicato rico en hierro de grano fino**”, con un acomodo estructural en placas 1:1, comúnmente presente en formaciones de hierro sedimentario no metamorfoseadas. Bailey explica que en el pasado este mineral solía llamarse “chamosita”, pero que este nombre se usa también para llamar a una clorita rica en hierro ferroso, con una reflexión de 14 Å y un valor 2:1:1, la clorita de este tipo se localiza en Chamoson, Francia, si ahora conocemos el verdadero origen del nombre de la clorita ferrosa, si podemos llamarla con el término chamosita, pero no; para el mineral con placas 1:1 llamado bertierina.

La bertierina esta formada por dos formas estructurales a menudo íntimamente intercaladas, una es aparentemente de simetría trigonal y la otra aparentemente de simetría monoclinica. La forma monoclinica de la bertierina aparece con mas contenido de Al₂O₃ y la forma trigonal aparece con bajo Al₂O₃ pero con alto contenido de SiO₂ (Bailey, 1991).

Por lo anteriormente expuesto por Bailey, 1991, llamare “Chamosita” a la clorita ferrosa presente en el mineral “normal” y como “bertierina” a la clorita de grano fino a muy fino presente en el mineral “amorfo”.

Ocurrencia de la chamosita y la bertierina.

La chamosita del politipo 11 b corresponde a una clorita ferrosa, reportada de origen hidrotermal en el trabajo de Robin Offler y David J. Whitford, 1992. Así también la chamosita se forma por metamorfismo de bajo grado Dorothy, 1970. 57

La bertierina es un mineral autígeno, con alto contenido de FeO, se forma en condiciones de reducción y la presencia de materia orgánica en descomposición (Dorothy Carrol, 1970). También ocurre en sedimentos marinos no metamorfosados (Bailey, 1991), donde la bertierina es probablemente formada por diagénesis en mares someros.

8. 1. 5. Resultados de la clasificación de la clorita del mineral “normal” y mineral “amorfo” por Difracción de Rayos X.

El difractograma del producto no magnético del mineral “normal”, está constituido aproximadamente por un 60 % de clorita y en menor proporción por feldespatos, hematita y cuarzo. En la gráfica No. 1 se aprecian las reflexiones características de la clorita, es decir los valores $d = 7.18 \text{ \AA}$ (100 %), $d = 14.4 \text{ \AA}$ (30%) y el valor $d = 3.57 \text{ \AA}$ (70%).

El difractograma del producto no magnético del mineral “amorfo”, tiene como principal componente; clorita (aprox. 95 %) y escasa proporción de calcita, hematita y magnetita, presenta una gráfica con los valores de reflexión de la bertierina; $d = 7.18 \text{ \AA}$ (100 %) como principal y 3.57 \AA (80 %), no presenta el valor $d = 14.4 \text{ \AA}$, es importante hacer notar que el gráfico presenta mucho ruido de fondo, efecto característico que producen los materiales semiamorfos, ver gráfica No. 2.

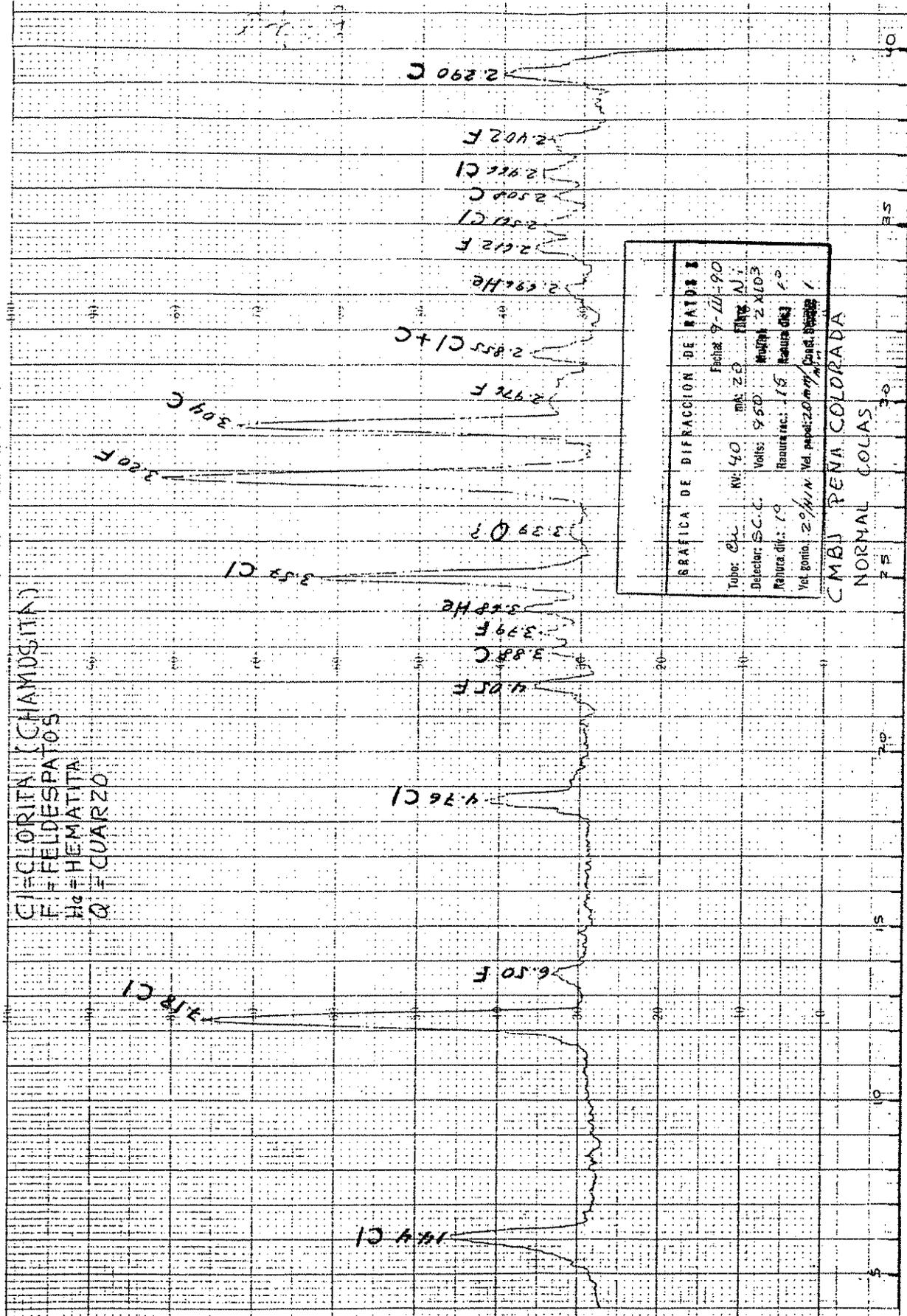
Tomando como referencia la bibliografía consultada, Carroll (1970), se sometieron ambas muestras a una temperatura de $550 \text{ }^\circ\text{C}$ por un tiempo de una hora, con el fin de clasificar ambas especies de clorita, de tratarse de una clorita típica, al ser calcinada a esta temperatura, solo sufrirá un desorden en la intensidad de sus reflexiones.

De tratarse de una bertierina, al ser calcinada se convertirá en amorfa.

Ambos productos calcinados se corrieron por Difracción de Rayos X, los difractogramas obtenidos reportan lo siguiente:

En el difractograma del mineral “normal” se intensifica el valor de la clorita; $d = 14 \text{ \AA}$ y decrece el valor $d = 7 \text{ \AA}$, perdiéndose el orden de intensidad de los picos, como se ilustra en la gráfica No. 3.

En el difractograma de la bertierina del mineral “amorfo” desaparecen todas las reflexiones, indicando que la muestra se transformó en un producto amorfo al perder su cristalinidad, como se ilustra en la gráfica No. 4.

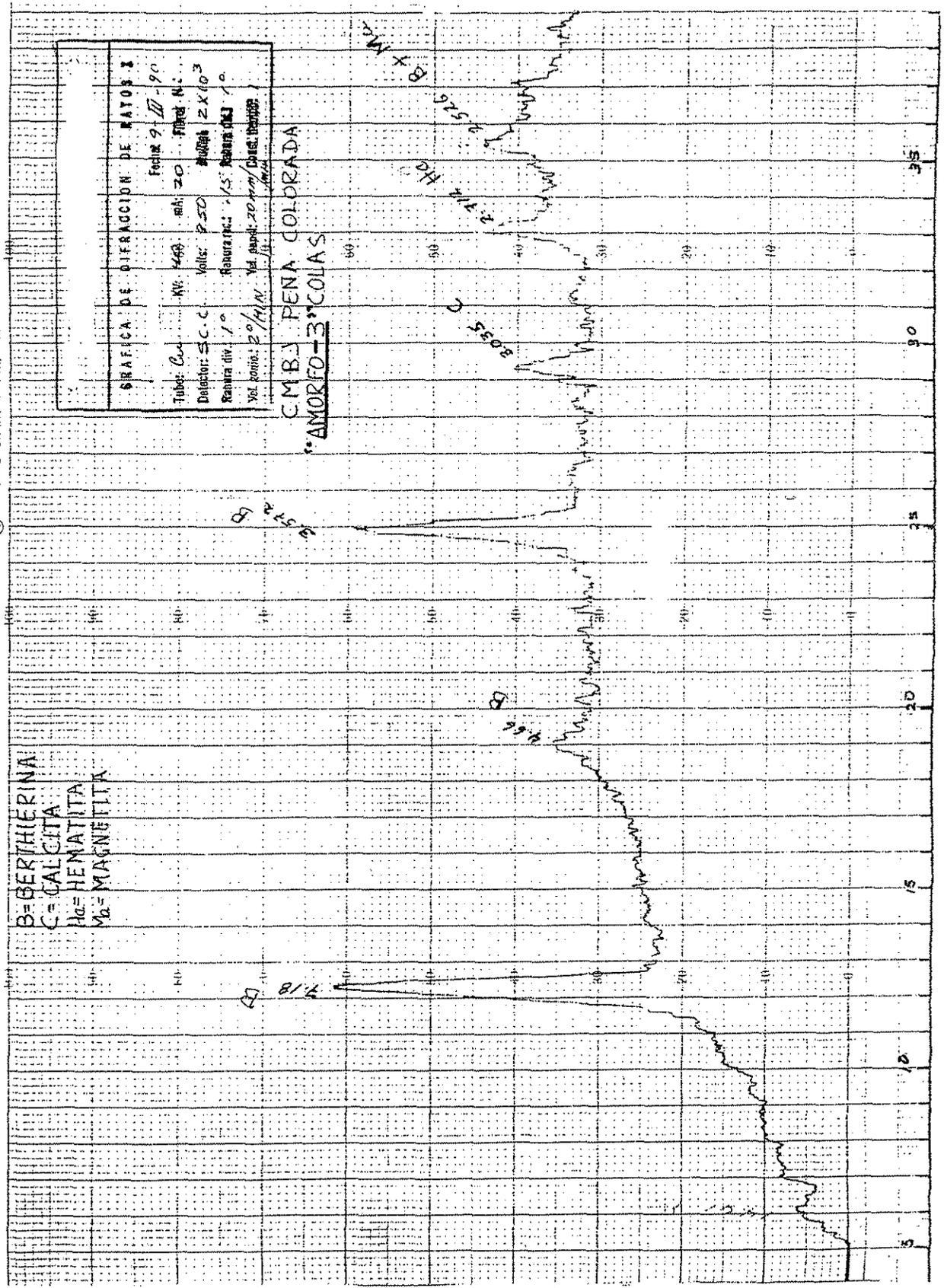


| GRAFICA DE DIFRACCION DE RAYOS X | |
|----------------------------------|---------------------------|
| Tubo: Cu | KV: 40 |
| Detector: S.C.C. | Volts: 5500 |
| Rejilla difr.: 1.0 | Rejilla rec.: 1.5 |
| Vel. goniom.: 2.0°/min | Vel. paso: 20 mm/min |
| Fecha: 9-10-90 | Filtro: Al |
| | Wavelength: 2.28 Å |
| | Sample: CMBJ |
| | Preparation: Normal Colas |

Cl = CLORITA (CHAMUSCITA)
 F = FELDSPATOS
 Hc = HEMATITA
 Q = CUARZO

GRAFICA NO. 1

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

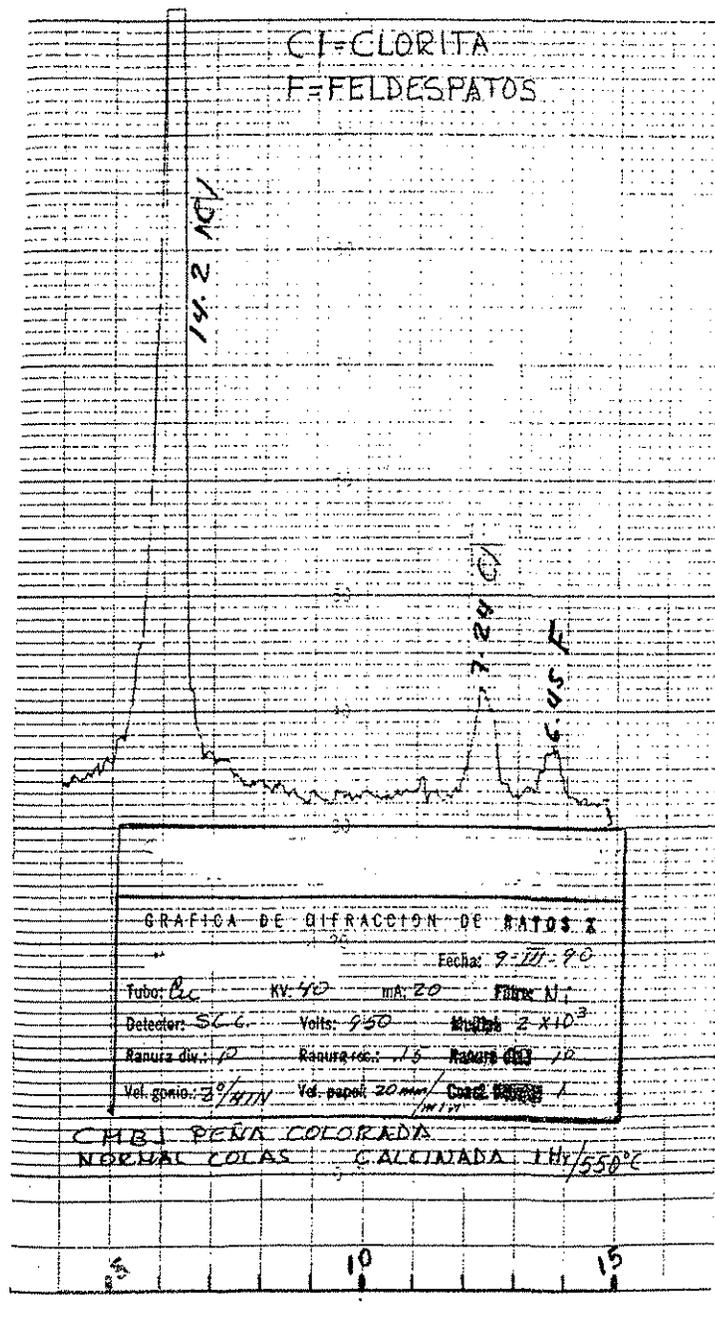


B = BERTHIERINA
 C = CALCITA
 Hd = HEMATITA
 Mg = MAGNETITA

GRAFICA DE DIFRACCION DE RAYOS X
 Fecha: 9/11/90
 Tubo: Cu K α Volt: 400 mV: 20 Filtrado: Ni
 Detector: S.C.C. Volt: 250 Multiplicador: ZX10³
 Resol. div: 1 $^\circ$ Resol. esp.: 1/5 $^\circ$ Resol. ang: 1 $^\circ$
 Vel. goni: 2 $^\circ$ /MIN. Vel. papel: 20 mm/Grado. Escala: 100%

CMBJ PENA COLORADA
 AMORFO-3 COJAS

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

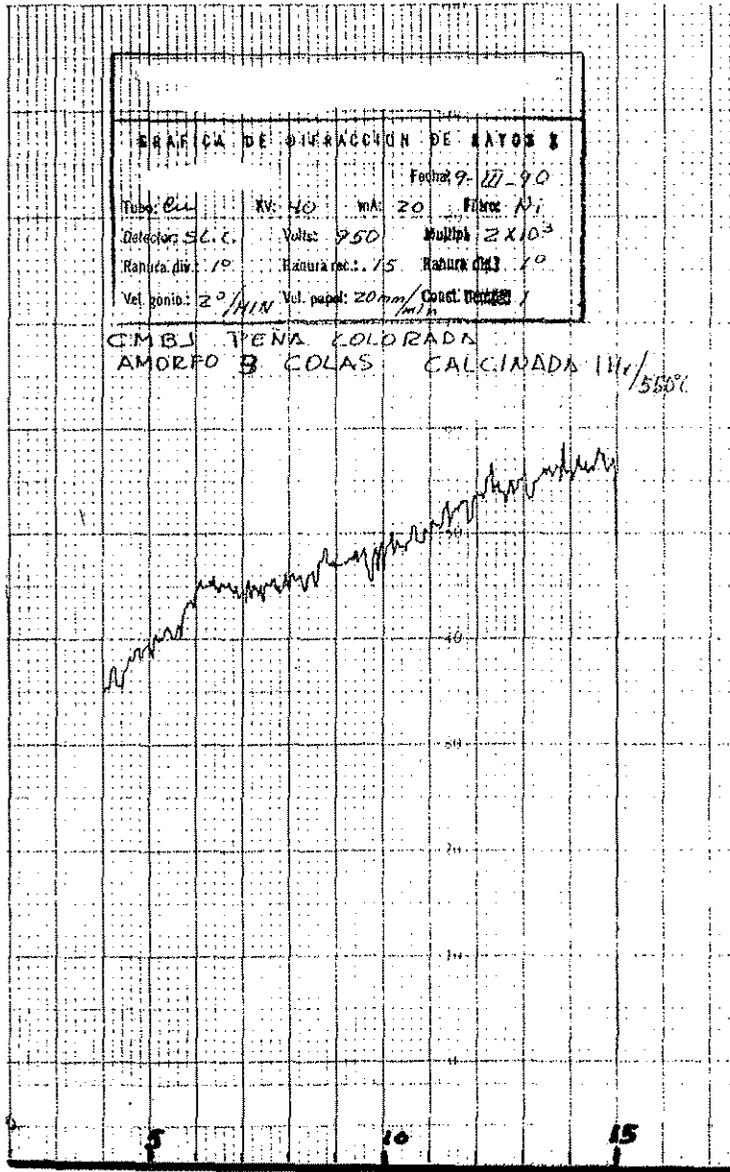


Gráfica No. 3

Difractograma de rayos x de la muestra de clorita del mineral "Normal", calcinada por una hora a una temperatura de 550⁰ C

Fuente: Consorcio Minero Benito Juárez, Peña Colorada, Inf. No. 90, laboratorio del Centro Experimental México, Comisión de Fomento Minero (C. F. M.), 1988.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Gráfica No. 4

Difractograma de rayos x de la muestra de clorita del mineral "Amorfo", calcinada por una hora a una temperatura de 550 °C

Fuente: Consorcio Minero Benito Juárez, Peña Colorada, Inf. No. 90, laboratorio del Centro Experimental México, Comisión de Fomento Minero (C. F. M.), 1988.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

8.1.6. Conclusiones de la clasificación de la clorita del mineral “normal” y mineral “amorfo” por Difracción de Rayos X

La clorita del mineral “normal” pertenece al politipo 11 b, con una estructura cristalina monoclinica, identificandose por difracción de rayos x como una clorita típica, los resultados de análisis químico reportaron en esta clorita un alto contenido de fierro ferroso, por lo que este mineral se clasificó como una chamosita.

La chamosita no colapsa al ser calentada a una temperatura de 550 °C, en este caso solo aumenta la intensidad del valor de la reflexión $d = 14 \text{ \AA}$ y se pierde el orden de intensidad de los picos, cumpliéndose para la clorita del “mineral normal” lo mencionado en la bibliografía (Carroll, 1970), lo que muestra que tiene un valor 2:1:1.

La clorita del mineral “amorfo” pertenece al politipo 1 b, tiene una estructura cristalina ortorrómbica semejante al caolín, identificándose por Difracción de Rayos X como una bertierina. El difractograma presenta la reflexión $d = 7 \text{ \AA}$ y carece de la reflexión $d = 14.4 \text{ \AA}$, colapsa al ser calcinada a 550 °C, apareciendo el difractograma amorfo, como indica la bibliografía consultada (Carroll, 1970).

Así también la chamosita perteneciente a una clorita ferrosa es del politipo 11b, da una reflexión basal clara $d(001) = 14 \text{ \AA}$, en cambio la bertierina politipo 1 b, tiene una estructura semejante al caolín (ortorrómbica), su mayor reflexión equivalente al 100 % será $d = 7 \text{ \AA}$, como sucede en el caolín.

Desde el punto de vista paragenético la chamosita del mineral “normal” se forma por alteración hidrotermal, sin embargo la bertierina del mineral “amorfo” ocurre diagenéticamente en un ambiente marino de aguas someras, donde prevalecen las condiciones de reducción y la presencia de materia orgánica en descomposición.

8. 2. Análisis al Microscopio de Polarización con Luz Transmitida de las Cloritas del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo”

8. 2. 1. Antecedentes

La chamosita del mineral “normal” se observó en todas las muestras analizadas asociada a la roca encajonante, es decir; se encuentra reemplazando al hornfels feldespático. En algunas muestras el reemplazamiento es parcial y en otras es total. En ambos casos la chamosita se observa como un pseudomorfo de la roca, conservando la forma original del fragmento de roca que reemplaza (ver fotomicrografías Nos. 24 a, b).

La bertierina del mineral “amorfo” se observa en una proporción mayor a la chamosita del mineral “normal”. Se presenta principalmente asociada a la magnetita formando ambos minerales un intercrecimiento intergranular, que da origen a una roca masiva de grano fino a muy fino, ocasionalmente la bertierina también rellena fracturas en la roca hornfésica del mineral “normal” en contacto con el mineral “amorfo”. El fracturamiento y la alteración hidrotermal por chamosita que afecta parcial o totalmente a la roca hornfésica, facilita la depositación de la bertierina. La bertierina también rellena fracturas en los sulfuros, calcita y cuarzo (ver fotomicrografías Nos: 14 y 16).

8. 2. 2. Objetivo

Determinar las propiedades ópticas de la chamosita del mineral “normal” y bertierina del mineral “amorfo”, con el fin de apoyar los resultados obtenidos por Difracción de Rayos X.

8. 2. 3. Método de trabajo

El análisis por microscopía de polarización se realizó en láminas delgadas que mostraron los dos diferentes tipos de cloritas, las muestras correspondían tanto al mineral “normal” como al “amorfo”.

Así también se analizaron los productos no magnéticos que contienen una gran cantidad de clorita, con el fin de obtener partículas individuales que nos permitan observar su estructura.

8. 2.4. Propiedades Ópticas de la Chamosita del mineral “Normal”.

Las propiedades ópticas se obtuvieron en un microscopio de polarización con luz transmitida, marca Leitz, modelo SM – LUX - POL.

Las propiedades ópticas de la chamosita del mineral “normal” (ver fotomicrografías Nos: 24 a y 24 b) se describen a continuación:

Nombre.- Chamosita

Color.- Verde pistache.

Pleocroismo.- Alto a muy alto, cambia de verde pistache a transparente y amarillento.

Forma.- Laminar con líneas de exfoliación bien definidas.

Sistema de Cristalización.- Monoclínico, (ver fotomicrografía No. 25)

Exfoliación.- En una dirección.

Índice de Refracción.- 1.64 – 1.65 n.

Relieve.- Alto a partir del bálsamo de Canada.

Extinción.- Paralela con una ligera elongación.

Birrefringencia.- Baja con un valor de 0.009.

Orientación.- Largo – lento.

Figura de interferencia.- Biáxica negativa

8.2.5. Composición Química de la Chamosita del mineral "Normal", basándose en los análisis químicos cuantitativos obtenidos de los productos seleccionados no magnéticos.

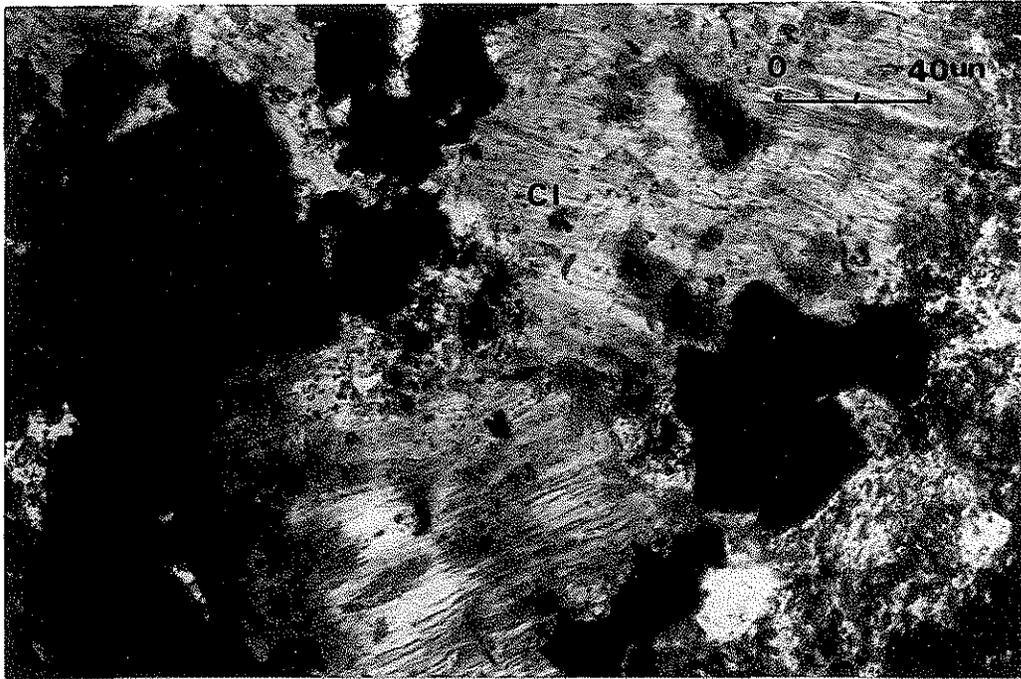
Fórmula Química.- $(\text{Fe, Mg, Al})_6(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

Contenido de Óxidos.-

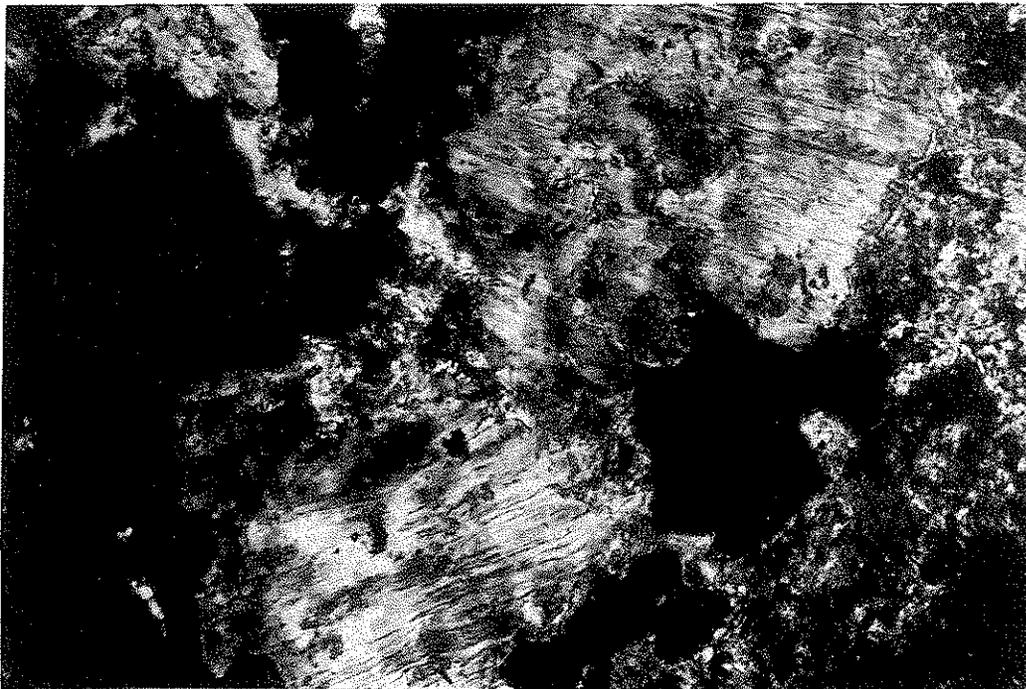
| | |
|-----------------------------------|---------|
| SiO ₂ .- | 27.4 % |
| Al ₂ O ₃ .- | 16.2 % |
| MgO.- | 11.19% |
| FeO.- | 26.81 % |
| Fe ₂ O ₃ .- | 8.8 % |
| H ₂ O.- | 9.6 % |

TOTAL DE ÓXIDOS.- 100.0 %

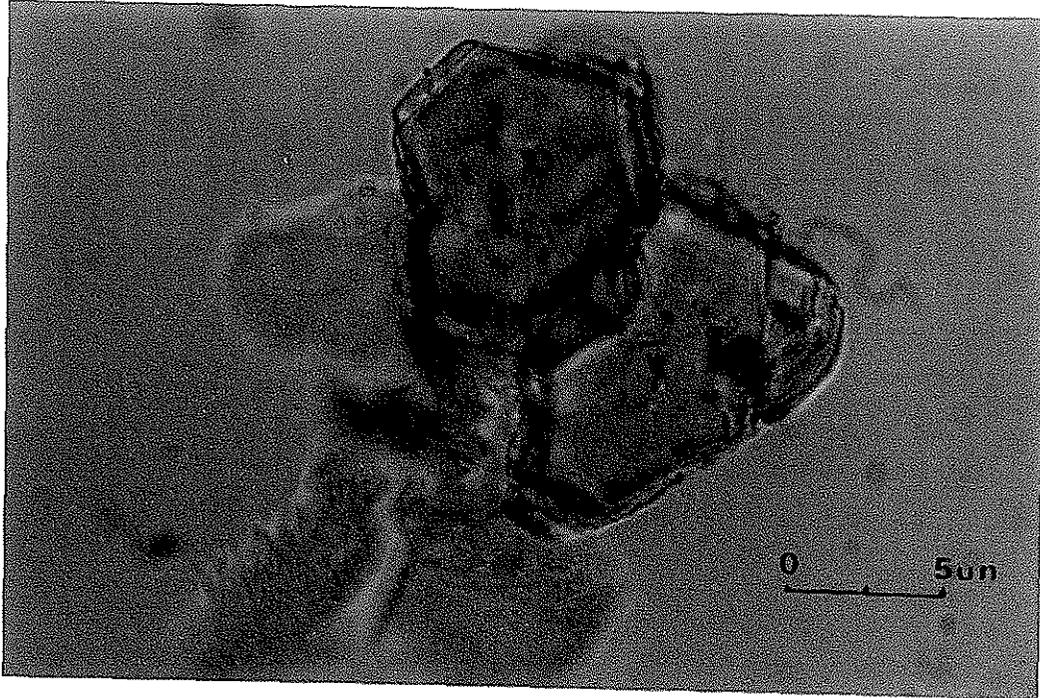
Observaciones.- El primer reporte de la presencia de chamosita en el yacimiento, esta en el informe No. 26/1991, del Consorcio Minero Benito Juárez "Peña Colorada", trabajo realizado en el Laboratorio Experimental México, de la Comisión de Fomento Minero por Rivas M. L., 1991.



Fotomicrografía No. 24 a. Láminas de clorita (Cl) típica del mineral “normal”.
Campo tomado al microscopio de polarización con luz transmitida con nicoles paralelos.



Fotomicrografía No. 24 b. Campo igual al anterior pero tomado con nicoles cruzados.



Fotomicrografía No. 25 . Cristal monoclinico de clorita del mineral "normal"
Campo tomado al microscopio de polarización con luz transmitida con nicoles paralelos.

8 .2. 6. Propiedades Ópticas de la Bertierina del mineral “Amorfo”.

Las propiedades ópticas se obtuvieron en un microscopio de polarización con luz transmitida, marca Leitz, modelo SM – LUX - POL.

Las propiedades ópticas de la bertierina del mineral “amorfo” (ver fotomicrografías Nos: 26 a , 26 b y 27 a , 27 b) se describen a continuación:

Nombre.- Bertierina.

Color.- Verde oscuro y verde oscuro con un matiz café.

Pleocroismo.- Bajo a alto.

Bajo, en las masas granulares verde oscuro.

Alto, en las placas verde oscuro a café.

Forma .- Granular – criptocristalina, en ocasiones plumosa o en placas.

Sistema de Cristalización.- No diferenciado por microscopía óptica, difracción de rayos x lo reporta como ortorrómbico, con una pobre cristalización, como se ilustra en la fotomicrografía No. 28, observándose una placa semiamorfa (ver fotomicrografía No. 28).

Exfoliación- No se observa.

Índice de Refracción.- 1.64 – 1.65 n.

Relieve.- Alto a partir del bálsamo de Canadá.

Extinción.- Anómala.

Birrefringencia.- Baja con un valor de 0.007, en los agregados criptocristalinos llega a ser nula.

Orientación.- No fue posible determinarla por falta de orientación de los granos.

Figura de interferencia.- Por el tamaño tan fino del mineral no fue posible medir su figura de interferencia.

8.2.7. Composición Química de la Bertierina del mineral "Amorfo".

Fórmula Química más cercana.- $(\text{Fe, Mg, Al})_6(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

Fórmula Química de la tarjeta de Difracción de Rayos X, No. 31 – 0618, JCPDS-International Centre for Diffraction Data, 1997.- $(\text{Fe, Al})_3(\text{Si, Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

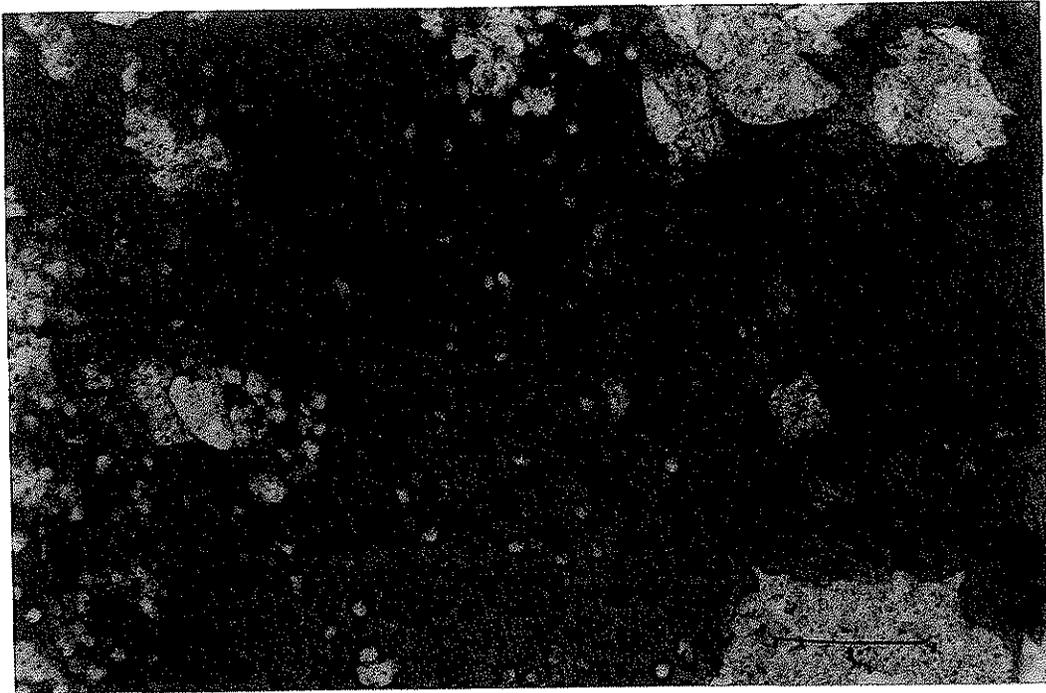
El siguiente contenido de óxidos fue obtenido a partir de los análisis químicos cuantitativos realizados en el producto no magnético, los resultados de análisis se obtuvieron a través de técnicas por vía húmeda y técnicas instrumentales, los resultados obtenidos y calculados para la bertierina se reportan a continuación:

| | | |
|------------------------------|-----------------------------------|---------|
| Contenido de Óxidos.- | SiO ₂ .- | 23.72 % |
| | Al ₂ O ₃ .- | 17.62 % |
| | MgO.- | 7.66 % |
| | FeO.- | 35.24 % |
| | Fe ₂ O ₃ .- | 6.51 % |
| | * H ₂ O.- | 9.25 % |
| <hr/> | | |
| TOTAL DE ÓXIDOS.- | | 100.0 % |

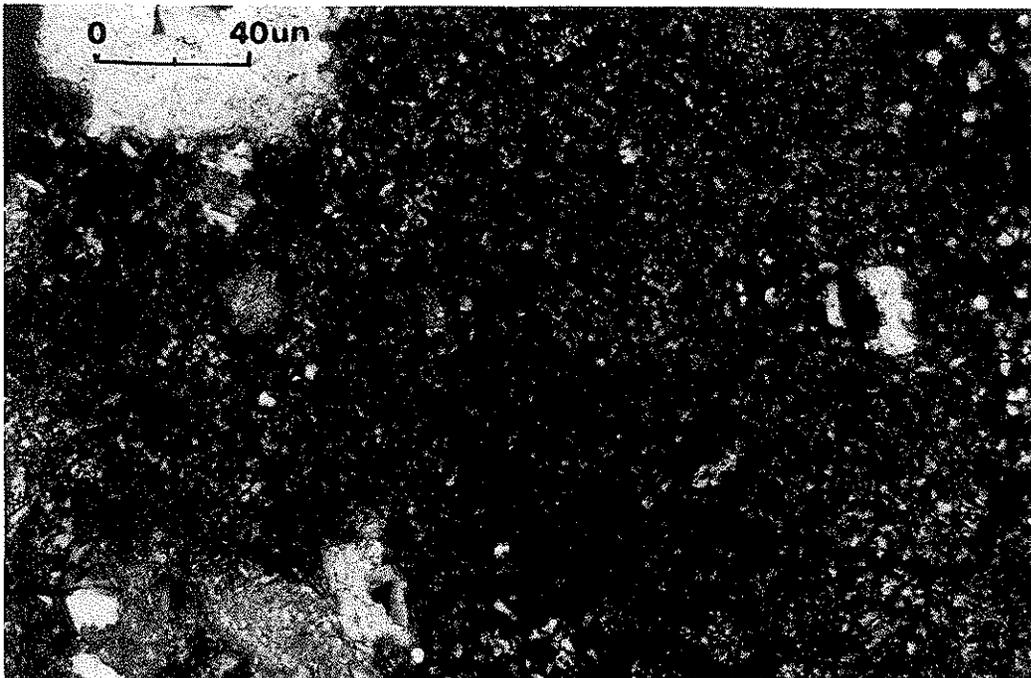
* El agua de cristalización fue determinada por análisis térmico diferencial y gravimétrico.

OBSERVACIONES.- La bertierina en contacto con la magnetita cambia a un color café - marrón, por reacción con la magnetita, formando en esta última bordes de reacción, como se ilustra en las fotomicrografías Nos: 21, 22 y 23. Por Microsonda Electrónica de Barrido se realizó un análisis semicuantitativo de estas áreas, reportando una disminución de Aluminio y Magnesio, así como un aumento de Hierro, donde el Fe⁺³ substituye al Al, y el Fe⁺² substituye al Mg, ver cuadro No. 6, p. 98.

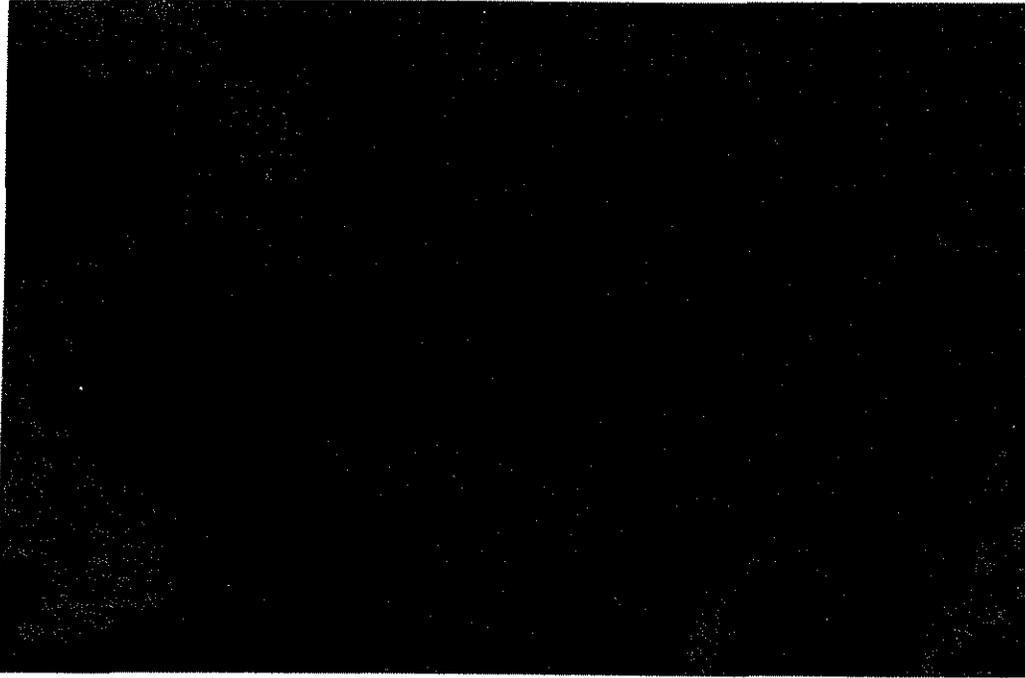
El primer reporte de la presencia de bertierina en el yacimiento, esta indicado en el informe No. 26/1991, del Consorcio Minero Benito Juárez "Peña Colorada", trabajo realizado en el Laboratorio Experimental México, de la Comisión de Fomento Minero por Rivas M. L., 1991.



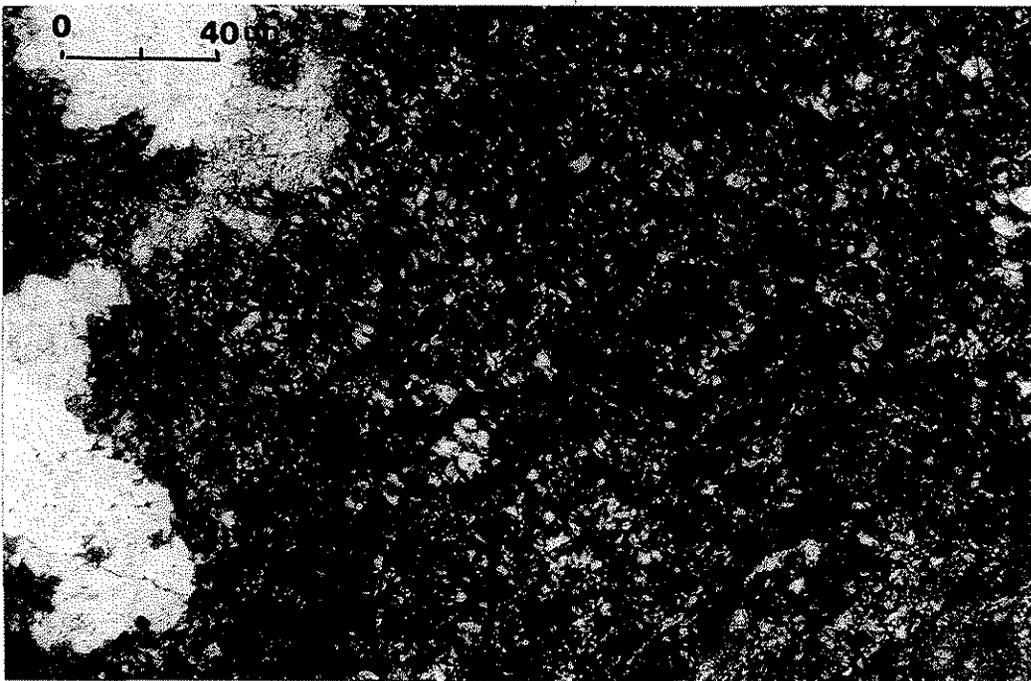
Fotomicrografía No. 26 a. Masa criptocristalina de clorita verde oscuro con matiz café. Campo tomado al microscopio de polarización con luz transmitida con nicoles paralelos.



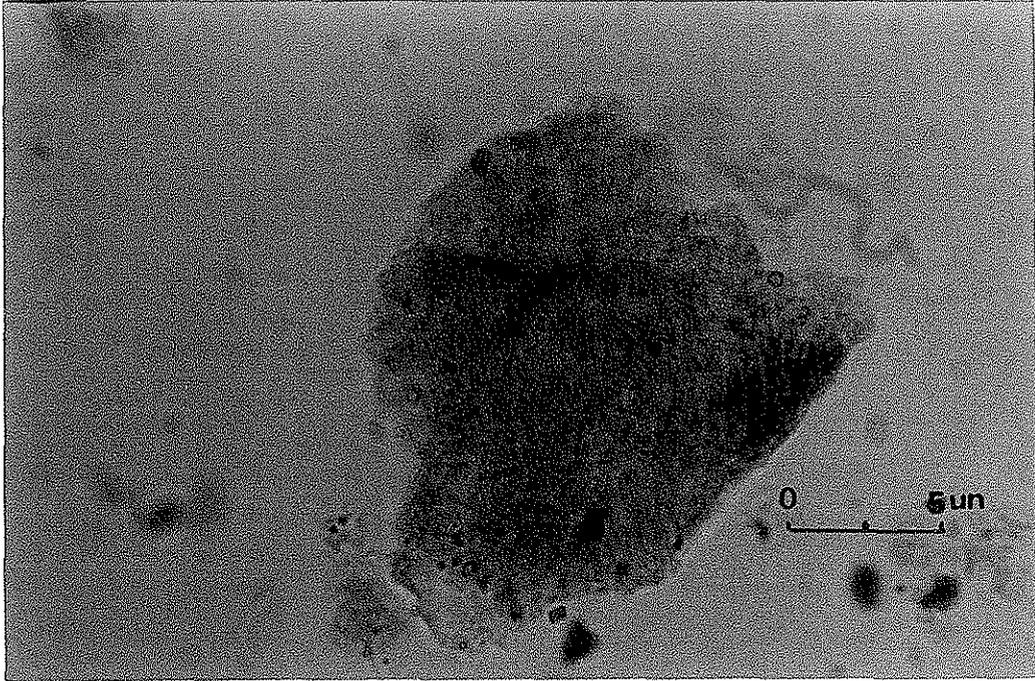
Fotomicrografía No. 26 b. Campo igual al anterior pero tomado con nicoles cruzados.



Fotomicrografía No. 27 a. Masa granular plumosa verde oscuro con matiz café.
Campó tomado al microscopio de polarización con luz transmitida con nicoles paralelos.



Fotomicrografía No. 27 b. Campo igual al anterior pero tomado con nicoles cruzados.



Fotomicrografía No. 28. Placa semiamorfa, criptocristalina del mineral "amorfo"
Campo tomado al microscopio de polarización con luz transmitida con nicoles paralelos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

8. 2. 8. Conclusiones del Análisis al Microscopio de Polarización con Luz Transmitida de la Chamosita del Mineral “Normal” y Bertierina del Mineral “Amorfo”

Existen diferencias ópticas marcadas entre la chamosita del mineral “normal” y la bertierina del mineral “amorfo” entre las que destacan:

- a) El color verde más oscuro de la bertierina del mineral “amorfo” con respecto a la chamosita del mineral “normal”.
- b) La forma laminar de la chamosita del mineral “normal” diferente a la forma granular criptocristalina de la bertierina del mineral “amorfo”
- c) La estructura cristalina monoclinica de la chamosita del “normal” contra la estructura semiamorfa de la bertierina del “amorfo”, como se ilustra en la fotomicrografía No. 28 para ambas cloritas.
- d) La birrefringencia de la chamosita “normal” es mas alta que el de la bertierina del “amorfo”.
- e) La única propiedad óptica en común entre ambas cloritas es el índice de refracción de 1.64 a 1.65 n.
- f) La bertierina del mineral “amorfo” contiene más FeO y menos Fe₂O₃ con respecto a la chamosita del mineral “normal”, el contenido de Mg, Al y Si, disminuye hacia los bordes de reacción de la bertierina con la magnetita.
- g) La bertierina del mineral “amorfo” forma micromárgenes de reacción al contacto con la magnetita, evidenciado por un color café marrón y un enriquecimiento de Fe hacia los bordes de la bertierina, así como una perdida de Mg, Al y Si. En la magnetita se determinó hacia sus bordes una disminución en la proporción de fierro, como se reporto por microsonda electrónica de barrido.

8.3. Difracción de Rayos X de la Magnetita del Mineral “Normal” y la Magnetita del mineral “Amorfo”.

8.3.1. Objetivo.

Identificar diferencias en cuanto a las intensidades de las reflexiones $d = 2.5$, 2.1 y 1.6 en A° de la magnetita del mineral “normal” y “amorfo”.

8.3.2. Método de trabajo.

Para realizar estas pruebas se emplearon productos de concentrados magnéticos de ambos tipos de mineral, molidos a un tamaño de menos 200 mallas.

El estudio de Difracción de Rayos X se realizó en un difractómetro marca RIGAKU, Modelo Geiger – Flex, en las condiciones: 40 Kv, 30 mA, ánodo de Cu.

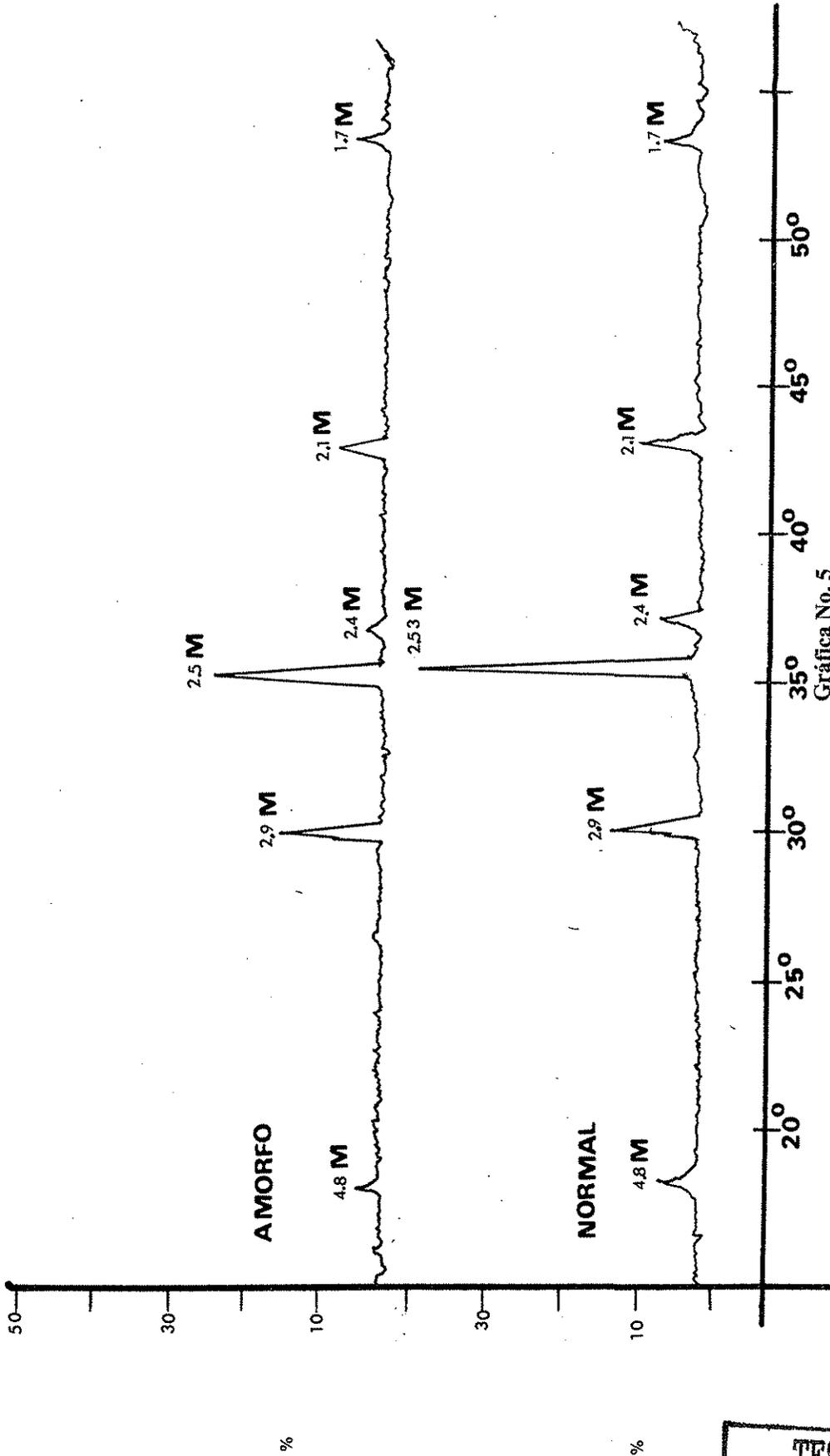
8.3.3. Resultados.

Ambos difractogramas presentan los valores de las reflexiones principales $d = 2.5 A^\circ$, $d = 2.1 A^\circ$ y $d = 1.6 A^\circ$ de la magnetita, sin embargo la magnetita del mineral “amorfo” presenta intensidades más bajas con respecto a la magnetita del mineral “normal”, como se muestra en las gráfica Nos. 5.

8.3.4. Conclusiones de la Difracción de Rayos X de la Magnetita del mineral “normal” y la magnetita del mineral “amorfo”.

La diferencia en las intensidades de sus reflexiones en ambos tipos de magnetita, sugiere diferentes estados de oxidación, lo cual se corroborará a través de los análisis de termoanálisis por medio del térmico gravimétrico y térmico diferencial y la técnica del efecto Mössbauer.

M = magnetita



Gráfica No. 5

Difractogramas del mineral "Normal" y del mineral "Amorfo" en ambos existe una diferencia marcada en la intensidad de sus reflexiones, siendo más intensas las del mineral "Normal"

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

8. 4. Análisis Térmico Diferencial y Gravimétrico de la Clorita y Magnetita del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo”

8. 4. 1. Objetivo

Diferenciar cambios estructurales importantes tanto en la chamosita del mineral “normal” como en la bertierina del mineral “amorfo”, así como en ambos tipos de magnetita.

8. 4. 2. Método de trabajo

Se analizaron por esta técnica diferentes productos magnéticos y no magnéticos, los cuales previamente también se corrieron por Difracción de Rayos X con el fin de conocer su composición mineralógica.

Para realizar este análisis se utilizó un equipo de termoanálisis marca Shimatsu. Para llevar a cabo esta prueba se pesó en un crisol de platino 100 miligramos de muestra. El crisol se colocó en el horno del equipo de termoanálisis, programando este para funcionar de temperatura ambiente (17 °C) hasta 1100 °C, este aumento de temperatura fue de 1 °C por minuto.

A través de esta técnica se obtuvo una gráfica que presenta los cambios estructurales que sufrió la muestra a cierta temperatura, a través del análisis térmico diferencial. La pérdida o ganancia de peso se detectó en el análisis térmico gravimétrico.

Los productos analizados por termoanálisis son:

Productos de colas (producto no magnético), del mineral “normal”.

Productos de colas (producto no magnético), del mineral “amorfo”.

Producto magnético, concentrado final del mineral “normal”.

Producto magnético, concentrado final del mineral “amorfo”.

8.4.3. Resultados del Análisis Térmico Diferencial y Gravimétrico de la Clorita y Magnetita del Mineral "Normal" y Mineral "Amorfo"

Producto No Magnético del mineral "Normal" constituido por más del 80 % de clorita y en pequeña proporción calcita.

Clorita del mineral "Normal"

El termograma obtenido de esta muestra (gráfica No. 6) reporta la siguiente información:

La chamosita del mineral "normal" tuvo un comportamiento térmico anormal, como sigue:

Reacción exotérmica anormal a 495 °C de la clorita, no reportada en la bibliografía consultada, como reacción típica de las cloritas, posible reacción de deshidratación del $\alpha \text{Fe}_2 \text{O}_3 \cdot \text{H}_2 \text{O}$ a $\alpha \text{Fe}_2 \text{O}_3$.

Otros autores (R. Mackenzie, 1957), atribuyen esta reacción exotérmica a un material sintético de $\alpha \text{Fe}_2 \text{O}_3 \cdot \text{H}_2 \text{O}$.

En base a lo reportado por la técnica de Difracción de Rayos X, se tiene el difractograma de la chamosita, el cual presenta las reflexiones características de la clorita, es decir los valores $d = 7.18 \text{ \AA}$ que corresponde al valor principal del 100 %, $d = 14.4 \text{ \AA}$ (70 %) y el valor $d = 3.57 \text{ \AA}$ (100 %), como se ilustra en la gráfica No. 1.

Al someterse ésta muestra a la temperatura de 495 °C y el producto correrse por Difracción de Rayos X, se intensifica el valor de 14 \AA y decrece el valor $d = 7.18 \text{ \AA}$, perdiéndose el orden de intensidad de los picos, esto se puede explicar como un cambio en las distancias interplanares del cristal de chamosita, debido a la pérdida de agua en su sistema cristalino, ver gráfica No. 3, como se corrobora en el análisis térmico diferencial y térmico gravimétrico.

La muestra también presentó una cantidad mínima de calcita, identificada por su reacción endotérmica como sigue:

Reacción endotérmica de la calcita a 810 °C, por desprendimiento de CO_2 de la calcita.

El contenido de calcita es del 15.23 %, con una pérdida de peso entre 20 °C y 1100 °C, del 11%.

Producto No Magnético del Mineral “Amorfo” constituido por más del 95 % de clorita y una pequeña proporción de calcita.

Clorita del mineral “amorfo”

Este análisis mostró en una forma clara la estructura tipo caolín de la clorita, variedad bertierina, corroborando lo visto por Difracción de Rayos X, ver gráfica No. 2.

El resultado por Difracción de Rayos X para este producto reportó una mayor proporción de la especie mineral bertierina, así como una cantidad menor de calcita.

El termograma obtenido de esta muestra (gráfica No. 6) reporta la siguiente información:

La clorita del mineral “amorfo” tuvo un comportamiento térmico anormal, semejante al caolín, con las siguientes reacciones.

Reacciones exotérmicas anormales de la bertierina a 360 °C y 495 °C, posible reacción de deshidratación del $\alpha \text{Fe}_2 \text{O}_3 \cdot \text{H}_2 \text{O}$ a $\alpha \text{Fe}_2 \text{O}_3$

Reacción endotérmica del caolín a 430 °C, por deshidratación

Reacción endotérmica larga del caolín a 510 °C, por deshidratación.

Reacción endotérmica larga del caolín a 980 °C, por cambio estructural.

Con el fin de identificar los materiales que se están formando al calentar la muestra a estas temperaturas, se procedió a obtener productos calcinados a las temperaturas reportadas por termoanálisis y reproducidas en una mufla, para posteriormente ser analizados por difracción de rayos x, los resultados obtenidos son:

En base a lo reportado por la técnica de Difracción de Rayos X, se tiene el difractograma de la bertierina del mineral “amorfo” representado por una gráfica con los valores de reflexión $d = 7.18 \text{ \AA}$ (100 %) como valor principal, y 3.55 \AA (100 %) y 2.53 también con un valor del 100 %, el segundo valor en importancia es 2.15 (70 %), ver estudio por Difracción de Rayos X.

Los resultados obtenidos se describen a continuación:

- a) Producto calcinado a 360 °C, han decrecido ligeramente las intensidades de las reflexiones 7.1 \AA y 3.5 \AA , la clorita sufre su primera deshidratación, como se ilustra en la gráfica No. 7.
- b) En el producto calcinado a 495 °C, han decrecido fuertemente la intensidad de la reflexión 7.1 \AA y la reflexión 3.5 \AA ver gráfica No. 7.

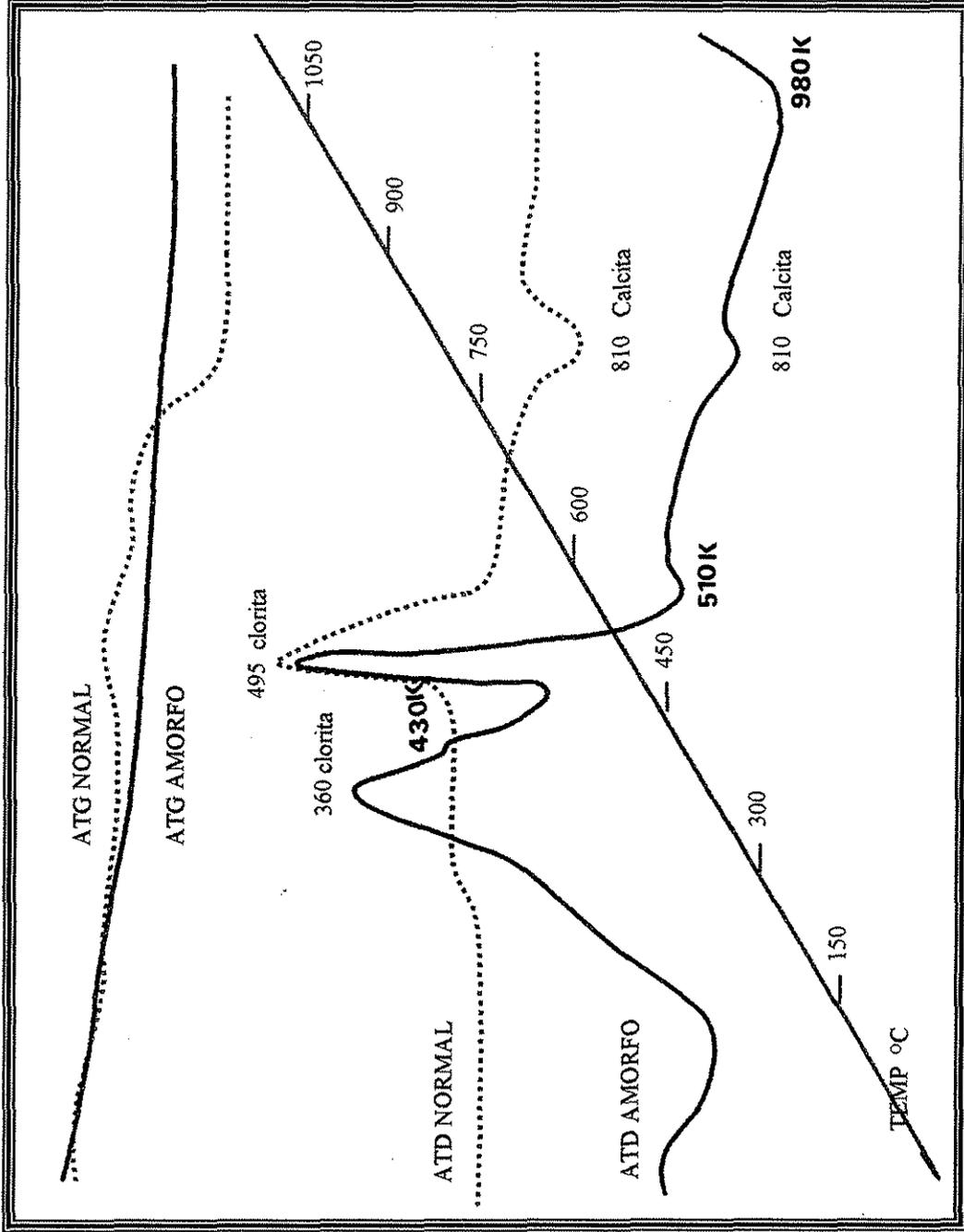
- c) Producto calcinado a 510°C , ha desaparecido las reflexiones 7.1 \AA y 3.5 \AA , se distingue solo la reflexión 3.3 \AA y 3.05 \AA de mica y calcita respectivamente, ver gráfica No. 7.
- d) Producto calcinado a 570°C , IDEM, ver gráfica No. 7.
- e) Producto calcinado a 650°C . La gráfica muestra en general un patrón de difracción amorfo solo se distingue al final del difractograma la reflexión 3.05 \AA de la calcita, ver gráfica No.7.

La muestra también contenía una cantidad mínima de calcita, identificada como sigue:

- a) Reacción endotérmica de calcita a 810°C por desprendimiento de CO_2
- b) El contenido de calcita es del 1.52 % con una pérdida de peso a una temperatura de 20°C a 1100°C , del 8.70 %.

La clorita del mineral “amorfo” presenta importantes cambios estructurales con el aumento de calor, comportándose térmicamente como lo hace un caolín, ocasionando una reacción endotérmica por deshidratación a una temperatura de 510°C al igual que ocurre con el caolín, provoca un cambio estructural, que afecta las distancias interplanares de los cristales de clorita, así la estructura cristalina se pierde, volviéndose amorfa.

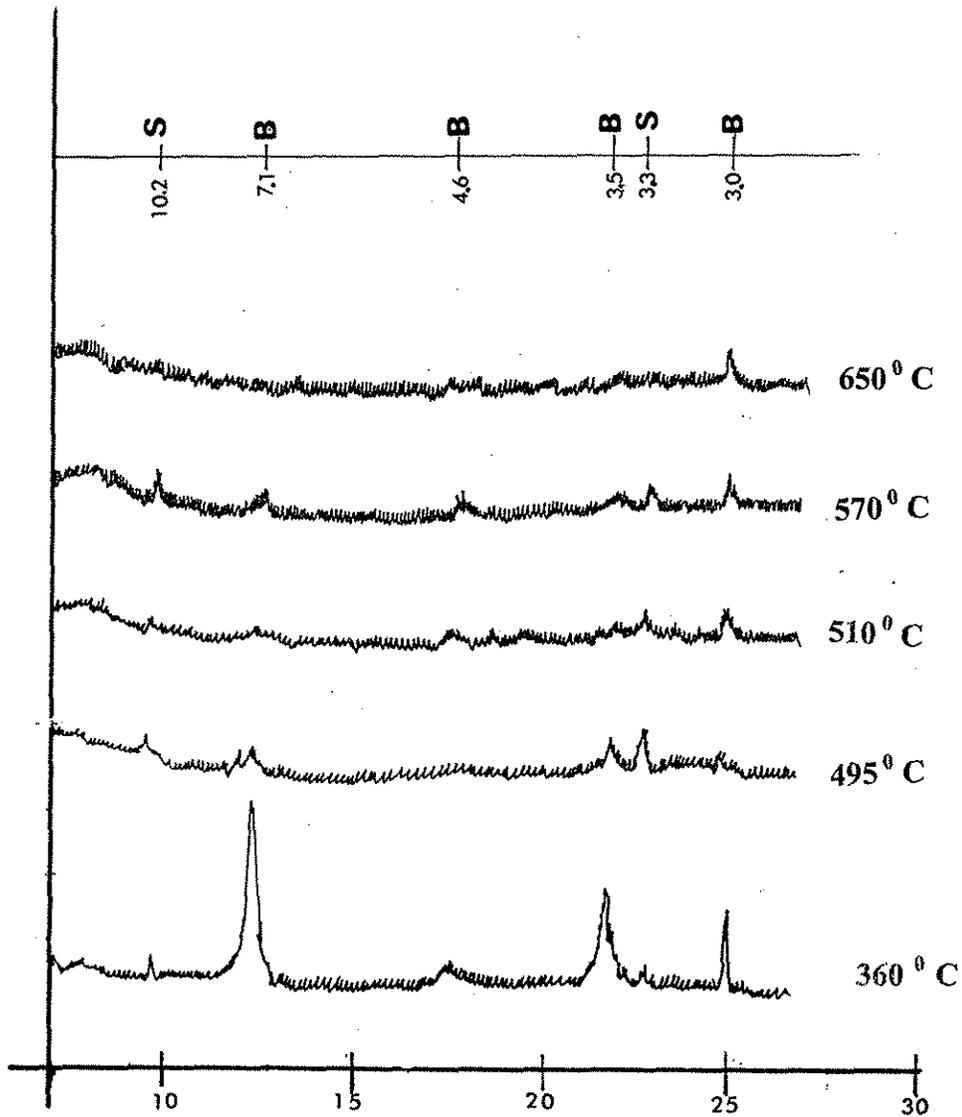
Por esta técnica también fue posible determinar el contenido de agua de cristalización de la bertierina del mineral “amorfo”, el valor fue de 6.22 %.



Gráfica No. 6

PERDIDA DE PESO Y REACCIONES EXOTERMICAS DE LA CLORITA EN LOS ANÁLISIS TÉRMICO GRAVIMÉTRICO Y DIFERENCIAL, RESPECTIVAMENTE, CORRESPONDIENTES AL MINERAL "NORMAL" Y MINERAL "AMORFO".

B = Bertierina
S = Mica (Sericita)



Gráfica No. 7

Difractogramas de Rayos X de la muestra de clorita, variedad chamosita y subvariedad bertierina, calcinada a diferentes temperaturas. Se observa en el primer difractograma a una temperatura de 360 °C un decaimiento en las intensidades de la reflexión principal $d = 7.1 \text{ \AA}$ y $d = 3.56 \text{ \AA}$ conforme va aumentando la temperatura a 495 °C siguen decreciendo las intensidades de las reflexiones indicadas, perdiéndose también su orden de intensidad, hasta desaparecer a partir de los 510 °C, temperatura a la cual la estructura del caolín se colapsa por deshidratación, confirmándose también a través del análisis térmico diferencial, por la reacción endotérmica producida a esta temperatura.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Producto magnético (concentrado) del Mineral "Normal", constituido por magnetita

Por Difracción de Rayos X solo se identificó magnetita en el producto de concentrado magnético, ver gráfica No. 9.

El resultado obtenido por el análisis térmico diferencial reportó dos reacciones exotérmicas a 375 °C y 615 °C, ambas reacciones corresponden a la oxidación normal de la magnetita, donde ésta se transforma gradualmente a hematita, ver gráfica No.8.

Con el fin de conocer prácticamente el grado de transformación que va sufriendo la magnetita, se prepararon productos obtenidos a estas temperaturas, calentando el mineral en una mufla y posteriormente los productos obtenidos fueron analizados por difracción de rayos x, reportando lo siguiente:

A una temperatura de 360 °C y 375 °C, ocurre la primera oxidación de la magnetita y se transforma a hematita, el contenido de hematita en este producto es del 16.0 % aprox.

Al aumentar la temperatura a 615 °C, el contenido de magnetita a decrecido considerablemente y la intensidad de las reflexiones principales de la magnetita – hematita se mantienen 1 : 1 Oxidándose y transformándose completamente a hematita alrededor de los 650 °C, como se ilustra en la gráfica No. 9.

Las reacciones de la magnetita ocurren a las temperaturas indicadas, no se observa nada diferente.

Producto magnético (concentrado) del Mineral "Amorfo", constituido por magnetita

El difractograma obtenido por Difracción de Rayos X reportó magnetita.

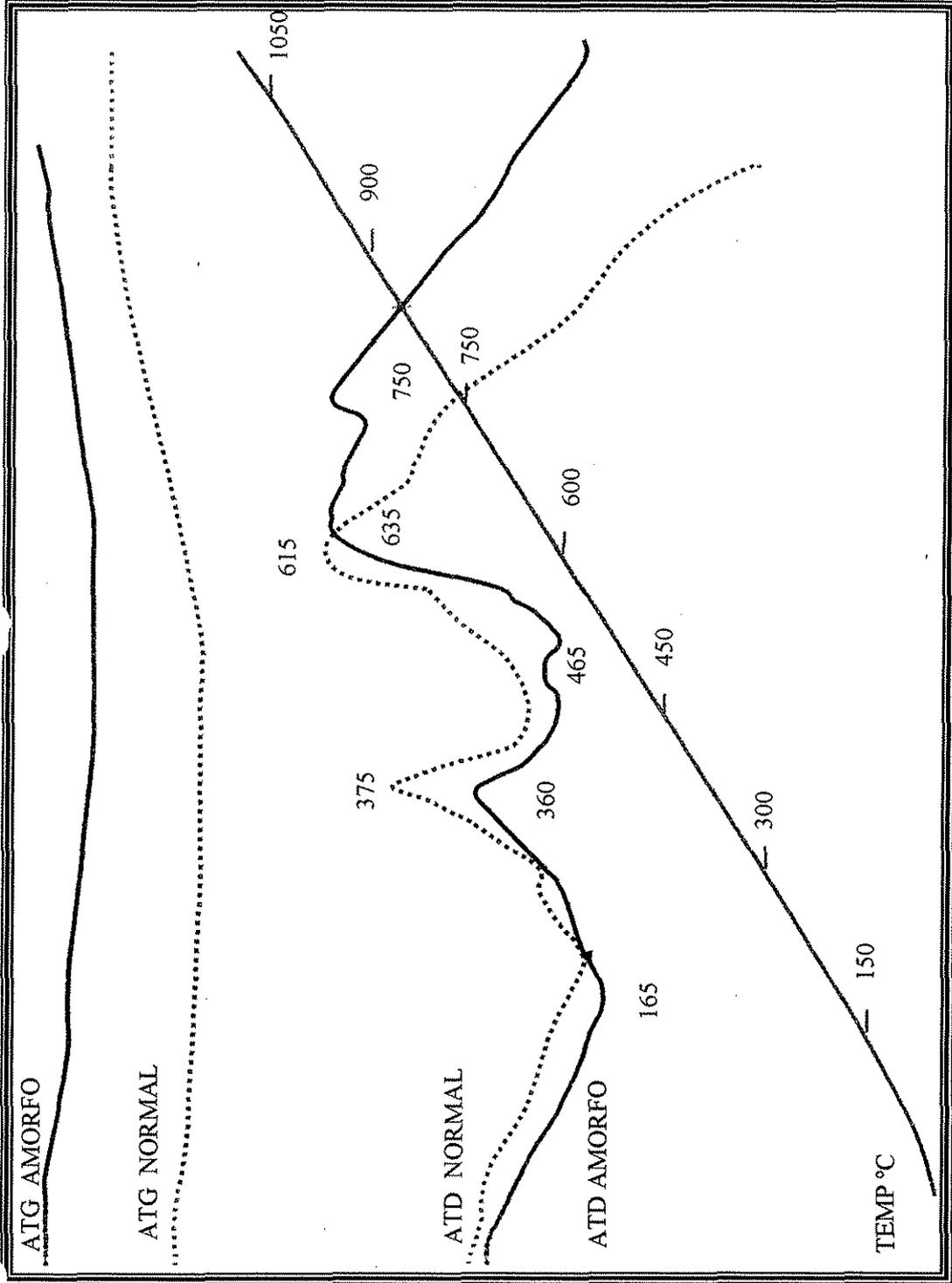
El resultado obtenido por termoanálisis reportó cuatro reacciones exotérmicas a las siguientes temperaturas: 360 °C, 465 °C, 635 °C y una temperatura de 750 °C, correspondiendo las reacciones a 360 °C y 635 °C a la oxidación de la magnetita, sin embargo; las reacciones a 465 °C y 750 °C, no están reportadas como reacciones propias de oxidación de la magnetita.

La muestra de concentrado magnético "amorfo" fue sometida a las temperaturas indicadas en una mufla, con el fin de obtener productos para su análisis por difracción de rayos x, los resultados obtenidos se describen a continuación:

En la muestra calcinada a 360°C la oxidación de la magnetita es ligera, formándose un 14.0 % aprox. de hematita, a esta temperatura la magnetita tiene un comportamiento térmico diferencial semejante a la magnetita del mineral "normal", ocurriendo nuevamente una reacción exotérmica a 465°C , tal vez por oxidación más tardía de la magnetita, ver gráfica No.10.

La magnetita sigue oxidándose y cuando alcanza la temperatura de 635°C ya se formó un 71.0 % aprox. de hematita. A partir de ésta temperatura la transformación de magnetita a hematita va haciéndose más lenta, produciéndose una última reacción exotérmica al llegar a una temperatura de 750°C , aumentando el contenido de hematita a 80.0 % aproximadamente, ver gráfica No. 10.

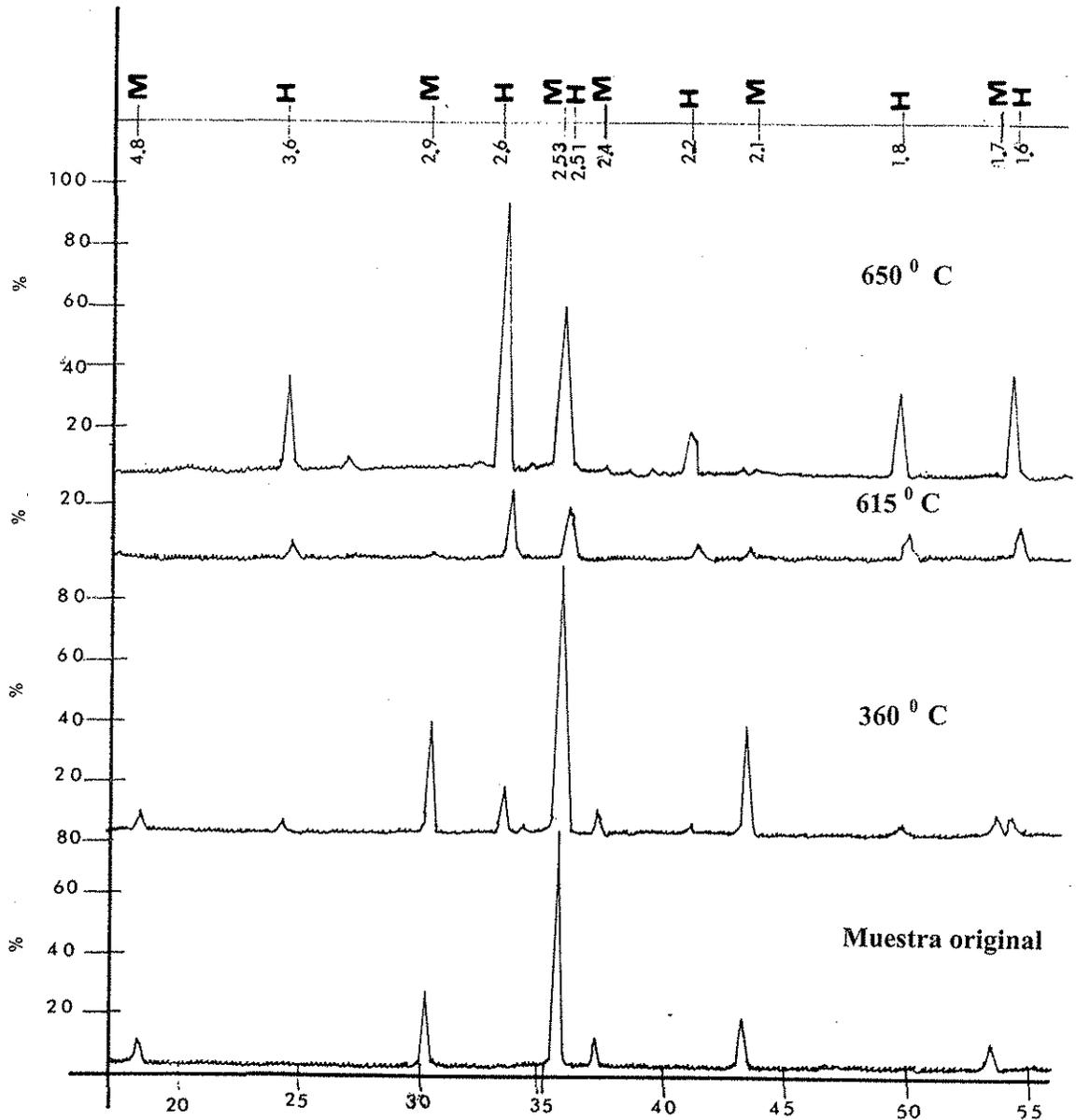
Finalmente la magnetita termina de oxidarse y transformarse completamente a hematita a partir de los 750°C , como se ilustra en la gráfica No. 10.



Gráfica No. 8

PERDIDA DE PESO Y REACCIONES EXOTERMICAS DE LA MAGNETITA EN LOS
 ANÁLISIS TÉRMICO GRAVIMÉTRICO Y DIFERENCIAL RESPECTIVAMENTE,
 CORRESPONDIENTES AL MINERAL "NORMAL" Y MINERAL "AMORFO".

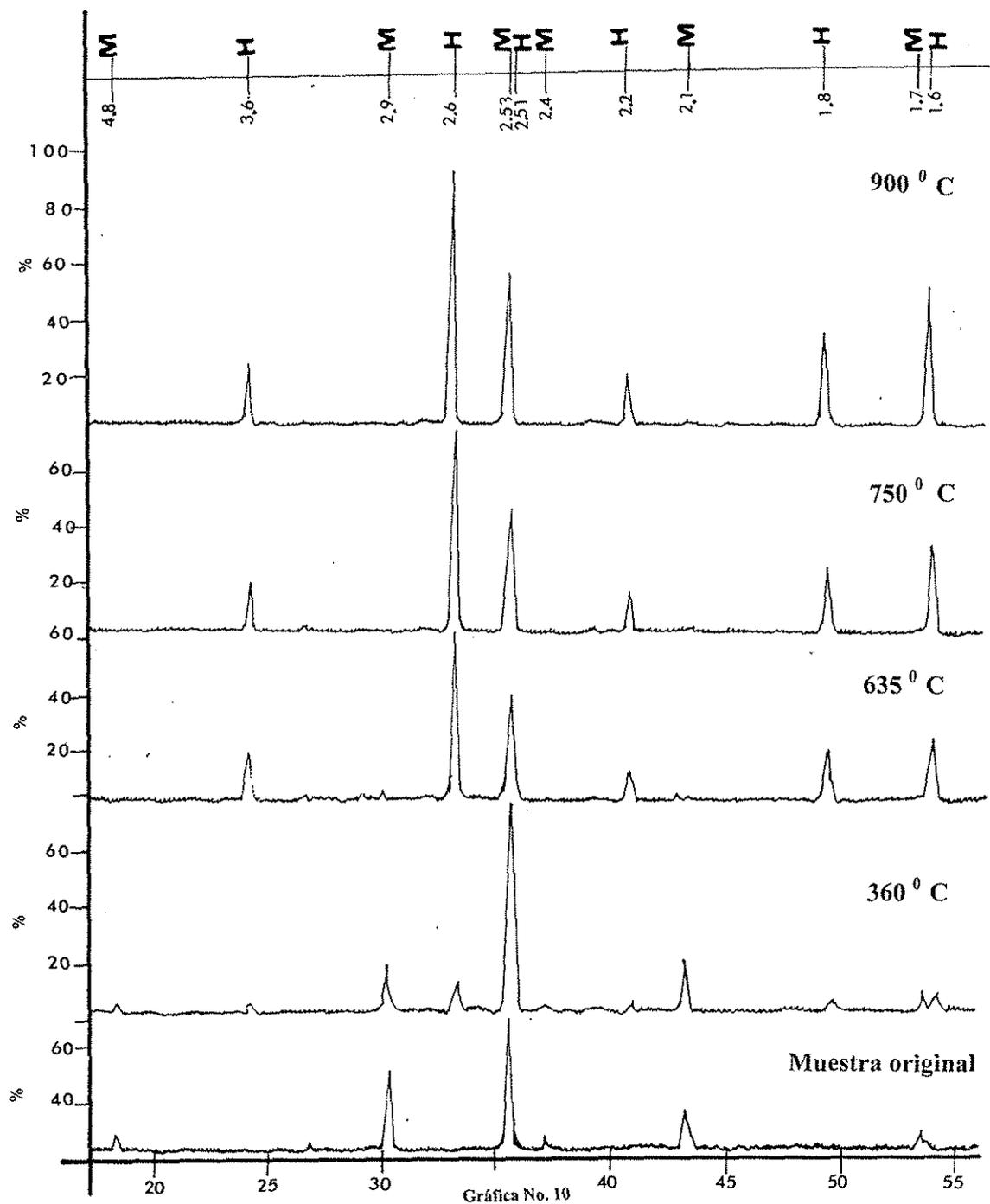
M = magnetita
H = hematita



Gráfica No. 9

Magnetita del mineral "normal". La gráfica inicial muestra el difractograma de la magnetita sin calcinar, conforme aumenta la temperatura a 360°C se va produciendo la oxidación de la magnetita, llegando a su primera reacción exotérmica a los 375°C por el análisis térmico diferencial (ATD). Se produce una segunda reacción exotérmica a los 615°C , temperatura a la cual ocurre la última reacción exotérmica importante de la magnetita por oxidación, observe en la figura como disminuyen las intensidades de las reflexiones de la magnetita y aumentan las intensidades de las reflexiones de la hematita, hasta transformarse completamente la magnetita a hematita a los 650°C .

M = magnetita
H = hematita



Magnetita del mineral "amorfo". El difractograma inicial corresponde a magnetita sin calcinar, al aumento de la temperatura a 360 ° C se produce la primera oxidación de magnetita a hematita, representada por una reacción exotérmica en el análisis térmico diferencial, a 635 ° C y 750 ° C, ocurren reacciones exotérmicas de la magnetita por oxidación, observe como disminuyen las intensidades de las reflexiones de la magnetita y aumentan las intensidades de las reflexiones de la hematita, la magnetita pasa completamente a hematita a los 900 ° C.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

8.4.4. Conclusiones del Análisis Térmico Diferencial y Gravimétrico de la Clorita y Magnetita del mineral "Normal" y el mineral "Amorfo"

- a) La clorita del mineral "normal" presenta una reacción exotérmica anormal que la coloca como una chamosita típica.
- b) Por medio de este estudio se corrobora que la clorita del mineral "amorfo" si corresponde a la especie mineral bertierina, una variedad de chamosita, con estructura cristalina ortorrómbica, por presentar reacciones endotérmicas y exotérmicas típicas de una estructura tipo caolín, como lo indica el estudio de Difracción de Rayos X.
- c) La magnetita del mineral "normal" presenta reacciones exotérmicas características de este mineral, completando su transformación total a hematita a partir de los 650⁰ C.
- d) La magnetita del mineral "amorfo" produce una última reacción exotérmica a 750 °C, sin lograr todavía a esta temperatura una oxidación total, esta situación particular de oxidación de la magnetita, de debe al reemplazamiento que sufre la magnetita por la clorita, esta forma una patina o delgado margen con un espesor de micrómetros alrededor de la magnetita, que la hace mas resistente a la oxidación, aun a altas temperaturas.

8. 5. Estudio por Espectroscopía Mössbauer.

8. 5. 1. Antecedentes

Con las técnicas analíticas e instrumentales utilizadas para el estudio del mineral de “Peña Colorada” se han identificado y clasificado diferentes tipos de magnetita y clorita, reportando hasta este momento una información muy valiosa, sobre el conocimiento de las características mineralógicas, texturales y asociaciones de la magnetita con la ganga.

Se tiene evidencia por la técnica de termoanálisis de diferencias marcadas en los estados de oxidación, entre la magnetita del mineral “normal” y mineral “amorfo”, desconociéndose sus causas.

Por esta razón se consideró importante emplear la Espectroscopía Mössbauer que ofrece una alternativa de investigación, permitiendo encontrar la causa o causas que producen los cambios de oxidación de la magnetita del mineral “amorfo”, con respecto a la magnetita “normal”. Además permitirá estudiar los diferentes tipos de clorita, con el fin de encontrar evidencias que ayuden a establecer condiciones geoquímicas y ambientales de formación y su relación genética con la magnetita. Al respecto la espectrometría Mössbauer puede dar estimaciones cuantitativas de las diversas proporciones de los distintos minerales magnéticos en una muestra. La fuerza relativa de cada tipo de espectro es aproximadamente proporcional a la cantidad de material correspondiente (i. e., al número de átomos en una configuración dada); eliminando así el problema inherente de tratar de determinar ensamblajes minerales usando parámetros magnéticos que oscilan por varios órdenes de magnitudes (e. g., $J_s = 90 \text{ Am}^2 / \text{kg}$ para magnetita y $J_s = 0.4 \text{ Am}^2 / \text{kg}$ para hematita, Hunt, 1992).

Comparando los espectros Mössbauer, podemos determinar las proporciones relativas de átomos de hierro en condiciones diversas (i. e., podemos ver la cantidad de magnetita contra hematita presente en una muestra dada, o el número relativo de átomos de Fe^{3+} en un sitio X por compararlo con otro sitio Y).

A una temperatura dada entre 4°K y la temperatura ambiente, los granos magnéticos suficientemente pequeños pueden cambiar, de estar teóricamente estables (dando un espectro con multi-líneas) a ser superparamagnéticos – Mössbauer (dando un espectro uni – línea). Así los resultados obtenidos a partir de mediciones de espectros en función de la temperatura pueden ser deconvolucionados en una distribución de tamaños de grano.

8. 5. 2. Introducción.

Rudolf Mössbauer (1958) descubrió la “absorción resonante gamma sin retroceso”, recibiendo por ello el Nobel de Física en 1961.

Para describir la absorción resonante gamma sin retroceso, es conveniente explicar el concepto de resonancia, tomando como ejemplo lo siguiente:

Imagine que se dispone de dos guitarras idénticas (igual tipo de madera, humedad, capa de barniz, tensión y grosor de sus cuerdas, etc.) y ambas perfectamente afinadas; si al colocarse una guitarra frente a la otra, se hiciera en una de ellas sonar sus cuerdas, la otra guitarra “resonaría” sin tocarla.

Si un músico con oído muy fino conociera como suena la guitarra emisora y se colocara detrás de la “guitarra resonante”, el músico escucharía el mismo sonido. Pero si alguna condición no fuera exactamente igual, el educado oído del músico detectaría la diferencia y podría decir lo siguiente “la tercera cuerda está sobrada de tensión” o “la madera de la guitarra resonante es mas dura que la de la madera emisora”. Con este tipo de información tal vez el músico podría determinar quien construyó la guitarra resonante, cuando, con que materiales, etc.

El mismo principio tiene el efecto Mössbauer, solo que aquí la guitarra emisora es el núcleo de un átomo conocido (estándar); la guitarra resonante es el núcleo de otro átomo de la misma masa (muestra problema), por lo tanto el sonido emitido es radiación gamma y el oído entrenado es un detector de radiación.

En la reacción Mössbauer, el núcleo emisor emite radiación gamma de energía constante; si el núcleo resonante se encuentra en el mismo estado energético que el emisor, absorberá esta radiación (de ahí el nombre de “absorción resonante”) no dejando pasar la radiación al detector, ver figura No. 4.

Cualquier variación en el estado energético del núcleo absorbedor le impide absorber la radiación llegando a detectarse cambios tan pequeños que rayan con los límites impuestos por el principio de incertidumbre de Heisenberg. Por ejemplo en el caso del ^{57}Fe , se detectan cambios del orden de 1 en mil billones (uno seguido de 15 ceros), lo que equivaldría a medir la distancia de la tierra a la luna con precisión de micrómetros.

Finalmente moviendo suavemente el emisor se alterará el “tono” de la energía emitida como consecuencia del efecto Doppler, tal como sucede cuando, por ejemplo; una ambulancia haciendo sonar su sirena se oye más aguda cuando se acerca y más grave cuando se aleja. Graficando la velocidad de acercamiento que se imprime al emisor contra la intensidad de la radiación medida por el detector, se obtiene un “espectro Mössbauer”.

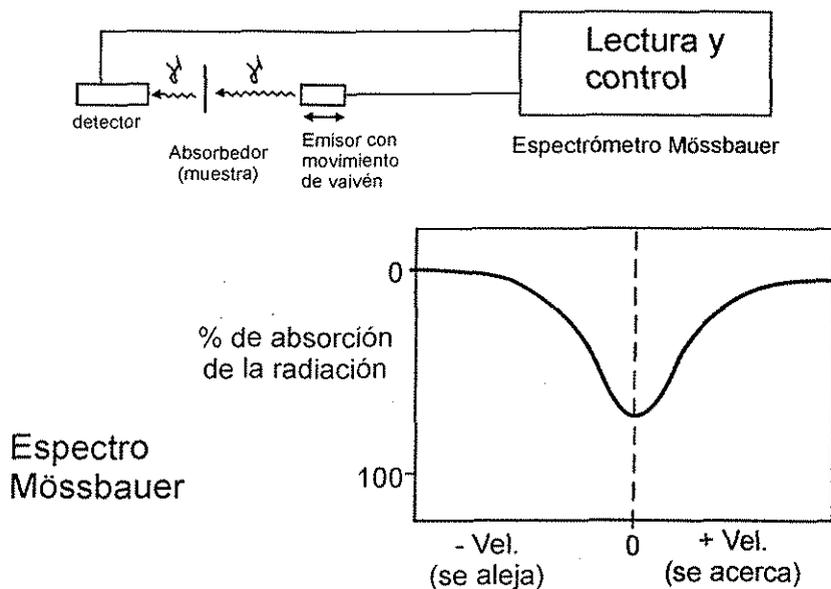


Figura No. 4

La extraordinaria potencia del método radica en que si el núcleo absorbedor se encuentra rodeado por una “atmósfera” fisicoquímica diferente que el emisor, esto se revelará en cambios de forma y absorción en el espectro correspondiente, como sucede en los cambios del estado de oxidación del Fe que son fácilmente cuantificados, en este caso, así fue como se elucidó el mecanismo químico de la hemoglobina, ya que su molécula contiene hierro.

Si un átomo de hierro se encuentra rodeado por elementos distintos, su núcleo cambiará ligeramente su estado energético; es decir, no estará igual si tiene como vecino al silicio, que si tiene al cloro, estos cambios de estado son los que la espectrometría Mössbauer detecta.

8. 5. 3. Objetivos.

La espectroscopia Mössbauer ha encontrado numerosas aplicaciones en el estudio de los materiales, por esta razón se consideró esta técnica viable para determinar los estados de oxidación del hierro, posibles diferencias y sus causas, así como sus efectos en la estructura, tanto para la magnetita del mineral “normal” como para la magnetita del mineral “amorfo”. El determinar diferencias en sus estados de oxidación, permitirá elucidar sobre las condiciones ambientales y genéticas que prevalecieron durante su formación.

Este mismo concepto se empleará para el estudio de la clorita, que es el mineral de ganga dominante en el mineral “amorfo”, cuya estrecha relación con la magnetita marca fuertes diferencias en sus estados de oxidación.

8. 5. 4. Método de trabajo.

Los espectros de Mössbauer fueron obtenidos a temperatura ambiente y con un analizador de 512 multicanales y una aceleración constante. La velocidad de calibración fue controlada con un laser, tomando como referencia hierro metálico. Se utilizó una fuente de $^{57}\text{Co/Rh}$.

La técnica de espectroscopia Mössbauer se empleó sobre productos de concentrados magnéticos de ambos minerales “normal” y “amorfo”.

Para el caso específico de la clorita del mineral “amorfo” se empleó un producto No magnético, que también se analizó por la técnica de difracción de rayos X, correspondiendo en un porcentaje aproximado del 98.0 % a clorita, el resto es calcita.

De igual forma se analizó la clorita del mineral “normal” en un producto no magnético.

8. 5. 5. Resultados

Este estudio permitió identificar diferencias de comportamiento en los estados de oxidación de la magnetita y clorita de los minerales “normal” y “amorfo”. Los resultados obtenidos se describen a continuación:

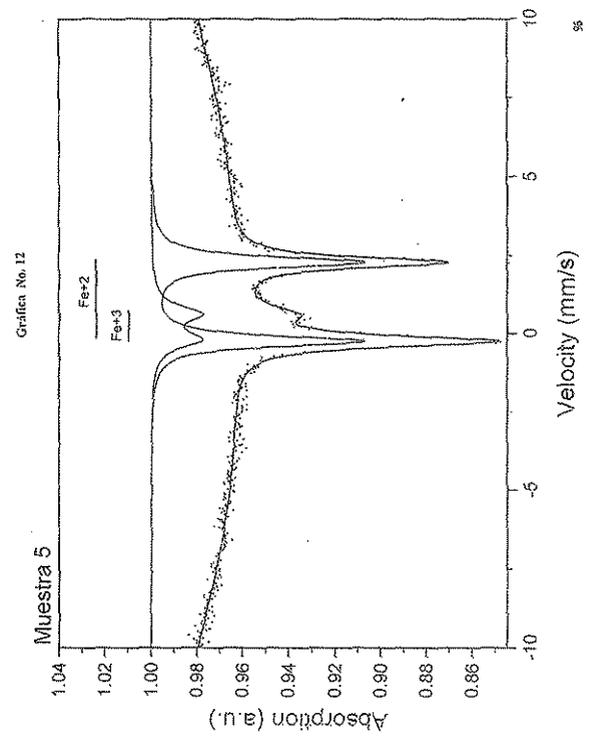
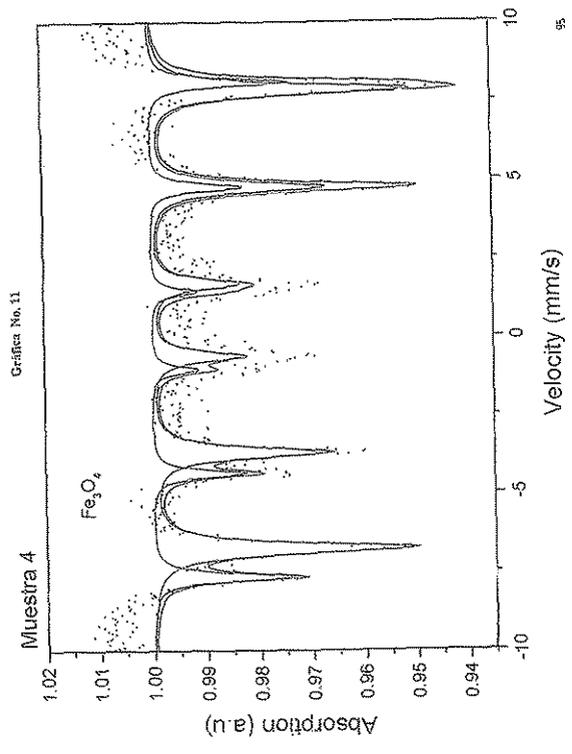
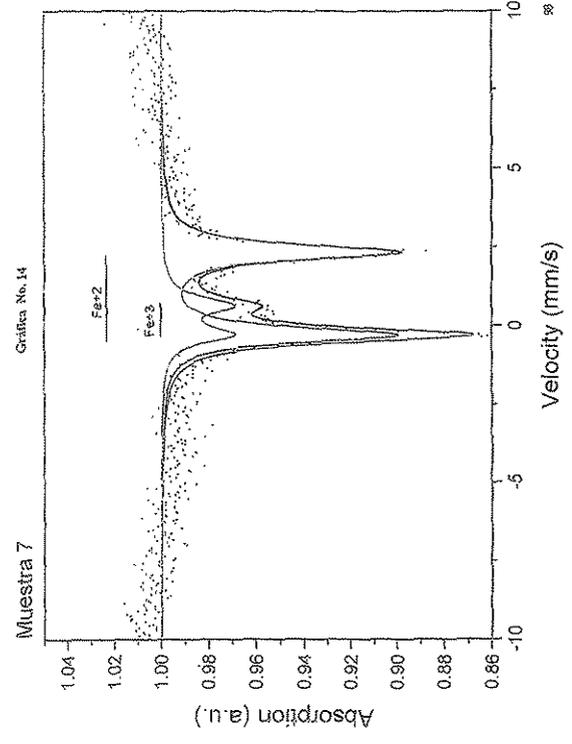
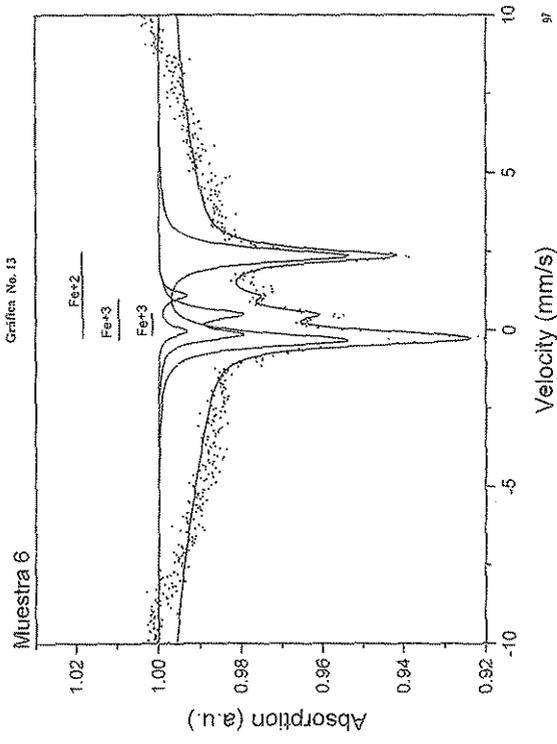
Análisis de Espectros Mössbauer

Magnetita del mineral “Normal” y magnetita del mineral “Amorfo”.

El espectro de la magnetita del mineral “normal” (gráfica No. 11), exhibe el desdoblamiento espectral séxtuple típico de la magnetita, representado por seis picos correspondientes a la molécula Fe_3O_4 , con dos estados de oxidación FeO y Fe_2O_3 .

El espectro de magnetita del mineral “amorfo” (gráfica No. 13), revela un desdoblamiento cuadrupolar del FeO y dos desdoblamientos cuadrupolares diferentes para el Fe^{+3} , que indican el estado de oxidación del Fe_2O_3 y un estado de oxidación compartido y fluctuante $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Este tipo de espectro también es característico de moléculas de Fe_3O_4 de tamaños ultrafinos, caracterizadas por presentar una propiedad magnética particular de dominio simple. Para la magnetita, un dominio simple se refiere a un tamaño de partícula crítico, de alrededor de 0.05 micrones (Fuerstena, 1996).

La presencia de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, permite considerar que se trata de una sustitución iónica de la magnetita con la clorita asociada a tamaños ultrafinos, por microscopia óptica de polarización se observaron micromárgenes de reacción entre la magnetita y la clorita. El alto grado de resolución de la técnica Mössbauer, nos permite vislumbrar que el tamaño de grano de la magnetita del mineral “amorfo” en algunos casos muy específicos, podría llegar



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

a medir por debajo de un micrón, lo que repercutiría también en el margen de alteración o de reacción con la clorita, de ahí la detección de radicales oxhídricos substituyendo iones de Fe^{3+} .

Clorita (Chamosita) del mineral “Normal” y “Amorfo”.

El espectro de la clorita (chamosita) del mineral “normal” (gráfica No. 12) exhibe el desdoblamiento típico de los estados de oxidación del Fe^{2+} y Fe^{3+} bien definidos. El espectro de la clorita (chamosita-bertierina) del mineral “amorfo” (gráfica No. 14), es semejante al espectro de la clorita del mineral “normal”.

8. 5. 6. Perspectiva Metalogenética del yacimiento de Fierro de Peña Colorada.

Las características texturales de la magnetita del mineral “amorfo” constituida por granos muy finos con morfología redonda a subredonda asociada con clorita de la variedad chamosita, aunadas a las condiciones de oxidación y substitución reveladas por la espectroscopía de Mössbauer, permiten vislumbrar que el ambiente geológico y geoquímico prevaeciente durante la formación del yacimiento “Peña Colorada” incluía la presencia y el contacto con un ambiente acuoso y un pH mayor a 7. Esto explicaría el enfriamiento drástico que da origen al pequeño tamaño de grano de la magnetita, así como el transporte en un medio acuoso de la magnetita, a través de la clorita (chamosita), lo que provocó el redondeamiento de sus granos, congruente con un ciclo geoquímico atípico que podría atribuirse al mineral “amorfo”, diferente a la formación de la magnetita del mineral “normal”.

James (1960), atribuye el origen de la clorita variedad chamosita, a una formación diagenética, que ocurre en mares profundos, donde las condiciones de reducción prevalecen por descomposición de la materia orgánica, donde las arcillas son inestables y susceptibles a oxidación. Esto sugiere el origen acuoso del mineral “amorfo”.

8. 5. 7. Conclusiones.

La magnetita presente en el mineral “amorfo” se caracteriza por un tamaño de grano muy fino, con bordes de reacción por sustitución iónica al entrar en contacto con la clorita, dando lugar a un margen de alteración formado por una combinación compleja de óxidos e hidróxidos de Fe.

La coexistencia de una zona de mineral “amorfo” con una de mineral “normal” es indicativa de un origen común, pero una evolución en un ambiente geoquímico diferente.

8. 6. Análisis por Microsonda Electrónica de Barrido de la Magnetita y Clorita del Mineral “Normal” y Mineral “Amorfo”

8. 6. 1. Objetivo

Con el fin de conocer la relación magnesio, aluminio, silicio con respecto al fierro y contar con una proporción estimada, se sometieron ambas muestras de clorita a un análisis por energía dispersiva de rayos X en microscopía electrónica de barrido, esto para observar si cumplen con lo indicado por Brown y Bailey (1962), en donde una chamosita típica 11 b a mayor contenido de magnesio disminuye su contenido de fierro, sucediendo lo contrario en las chamositas politipo 1 b.

Las diferencias en intensidad del valor principal $d = 2.53 \text{ \AA}$, en ambas magnetitas, hace sospechar una diferencia importante en el contenido de fierro, por esta razón se realizará un análisis semicuantitativo de fierro en ambos tipos de magnetita. Por espectroscopía Mössbauer se detectó en la magnetita del mineral “amorfo” una substitución iónica del Fe^{+3} por radicales OH – a tamaños ultrafinos, atribuidos a una substitución iónica entre la magnetita y la clorita, por esta razón se pretende que la técnica de microsonda electrónica de barrido proporcione información sobre diferencias en el contenido de fierro y la detección de otros elementos trazas que estén interactuando, para tal fin de realizarán análisis semicuantitativos en diferentes microáreas en un grano de magnetita, desde su periferia en contacto con la clorita, hasta el centro del grano. Así como observar a una mayor amplificación el tamaño y grado de intercrecimiento existente entre la magnetita y la clorita.

8. 6. 2. Método de trabajo

Este estudio se inició con análisis cualitativos en un microscopio electrónico de barrido marca JEOL, J - 35, adaptado a un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS), marca KeveX. Se empleó una corriente de 25 kv y un tiempo de análisis de 15 segundos.

Finalmente los análisis semicuantitativos de las fases elementales, se realizaron en el Instituto de Geofísica de la UNAM, en una microsonda electrónica de barrido, marca JEOL, JXA 8900-R y un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) multi-elemental, con un voltaje de aceleración de 20 kv y un tiempo de adquisición de 20 segundos.

El tipo de preparaciones que se utilizaron fueron las siguientes:

Para las cloritas.

En láminas delgadas del mineral “normal” y “amorfo” se marcaron diferentes microáreas que contienen clorita, esta selección y señalamiento se realizó al microscopio de polarización con luz transmitida, considerando para su identificación las propiedades ópticas y texturales de los diferentes tipos de clorita.

Las cloritas seleccionadas corresponden a la variedad chamosita color verde pistache, identificada en la roca horfésica feldespática, presente en el mineral "normal" y la variedad bertierina de color verde oscuro a café, muy asociada a la magnetita característica del mineral "amorfo".

Las microáreas respectivas fueron analizadas por energía dispersiva de rayos X (EDS) por microsonda electrónica de barrido, los resultados obtenidos para ambas cloritas se reportan en los espectros Nos. 1 y 2.

Para las magnetitas

Al microscopio de polarización con luz reflejada, se marcaron diferentes microáreas en las superficies pulidas del mineral "normal" y "amorfo". Las microáreas seleccionadas se analizaron por energía dispersiva de rayos x a través de la microsonda electrónica de barrido, los resultados obtenidos en ambos minerales se reportan en el cuadro No.7.

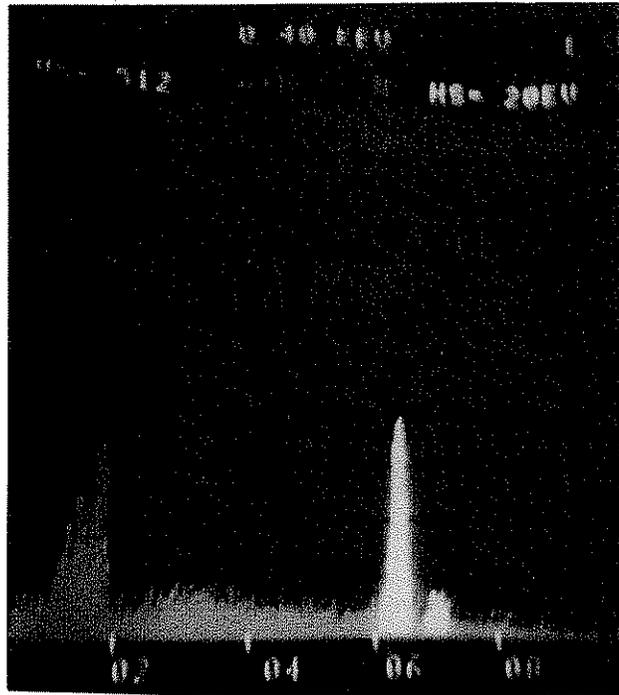
8. 6. 3. Resultados por Microsonda Electrónica de Barrido

En las cloritas

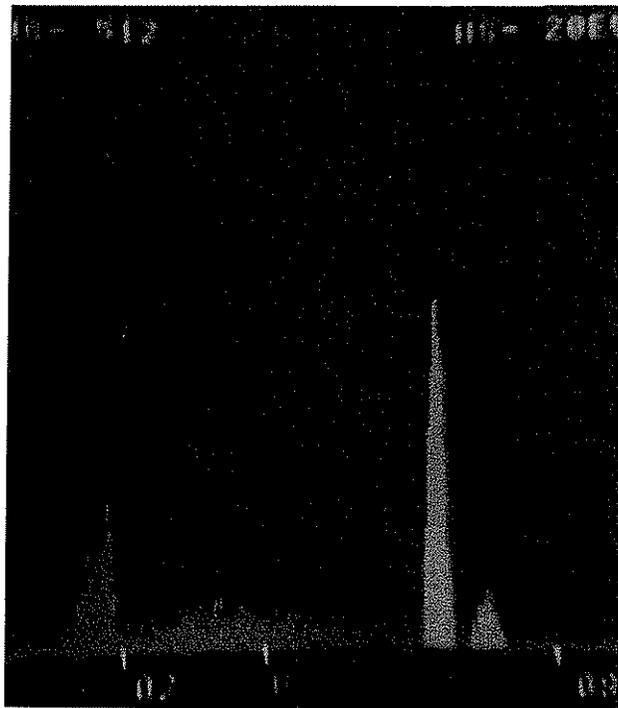
Una vez que se han obtenido resultados por difracción de rayos X y se confirma la presencia de dos variedades de clorita; una bien cristalina que corresponde a chamosita y otra variedad semiamorfa llamada bertierina, ambas con diferencias texturales importantes. Por energía dispersiva de rayos X presentan espectros con proporciones diferentes en el contenido de sus óxidos, los cuales se muestran en los espectros Nos: 1 y 2.

En el espectro de EDS No. 1, corresponde a la chamosita, clorita típica del mineral "normal", se observa una relación en proporción con el hierro, concordante con el aluminio, sílice y magnesio, que corresponden en proporción al contenido de óxidos, en este tipo de cloritas. Sin embargo en el espectro No. 2 obtenido en las mismas condiciones de operación que el espectro No. 1, corresponde a la bertierina del mineral "amorfo", se distingue que aumenta significativamente el pico $K\alpha$ del hierro, con una disminución de los picos del sílice, aluminio y principalmente magnesio, debido a la sustitución iónica del Fe por Mg, cumpliéndose la condición de Brown y Bailey (1962), para la bertierina del tipo 1b.

El análisis semicuantitativo de la bertierina y de la zona de reemplazamiento de la clorita hacia la magnetita, se reporta en el cuadro No. 6. En las imágenes 2, 3, y 4 se observa la estrecha relación entre la bertierina y la magnetita.



ESPECTRO No. 1
ANÁLISIS CUALITATIVO POR EDS DE LA CHAMOSITA TIPICA DEL MINERAL "NORMAL"



ESPECTRO No. 2
ANÁLISIS CUALITATIVO POR EDS DE LA BERTIERINA DEL MINERAL "AMORFO"

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

| COMPUESTO Y ELEMENTOS | CONTENIDO EN % BERTIERINA | CONTENIDO EN % DE BERTIERINA EN CONTACTO CON MAGNETITA |
|----------------------------------|---------------------------|--|
| Mg O | 7.82 | 6.26 |
| Si O ₂ | 27.45 | 20.22 |
| Al ₂ O ₃ | 18.11 | 12.69 |
| CaO | 0.70 | 1.48 |
| V ₂ O ₃ | 0.00 | 0.14 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.33 | 0.78 |
| MnO | 0.00 | 0.00 |
| * FeO | 34.72 | 48.15 |
| * Fe ₂ O ₃ | 6.41 | 8.89 |
| CoO | 1.53 | 1.36 |
| NiO | 2.90 | 0.00 |
| P ₂ O ₃ | 0.03 | 0.03 |
| TOTAL | 100.00 | 100.00 |

Cuadro No. 6

Análisis Semicuantitativo de la bertierina del Mineral "Amorfo"

* Calculado a partir del resultado reportado por microsonda electrónica.

En las magnetitas

Al analizar los espectros de rayos x en ambas muestras se observa lo siguiente:

La magnetita del mineral "normal" tiene un contenido de hierro, adecuado a la formula ideal de una magnetita mas pura.

Sin embargo el contenido de hierro de la magnetita del mineral "amorfo" disminuye, explicando de esta forma la disminución por Difracción de Rayos X de la intensidad de las reflexiones d principales de la magnetita. Es importante destacar que hacia la periferia de los granos de magnetita del mineral "amorfo" en contacto con clorita, existe la presencia de sílice, magnesio, azufre y calcio.

En ambos tipos de magnetita se detectan trazas de: V, Cr, Mn, Co, y Ni, encontrándose en mayor proporción en la magnetita del mineral "amorfo" a excepción del V y Cr que tienden a predominar en el mineral "normal", en algunos casos no se detectó Mn y Co en la magnetita del mineral "normal" y en otros casos en el mineral "amorfo" tampoco se detectó Cr, Mn, Co y ó Ni.

En el cuadro No. 7 se anotan los resultados del análisis semicuantitativo del mineral "normal" y "amorfo", obtenido por microsonda electrónica de barrido.

| ELEMENTO Y COMPUESTOS | CONTENIDO EN % EN LA MAGNETITA DEL MINERAL "NORMAL" | CONTENIDO EN % EN LA MAGNETITA DEL MINERAL "AMORFO" |
|----------------------------------|---|---|
| * Fe ₂ O ₃ | 67.64 | 28.88 |
| * FeO | 30.38 | 64.28 |
| CaO | 0.27 | 0.24 |
| V ₂ O ₃ | 1.31 | 0.52 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.24 | 1.56 |
| MnO | 0 | 0.61 |
| CoO | 0 | 3.16 |
| NiO | 0.16 | 0.76 |
| TOTAL | 100.00 | 100.00 |
| <i>Fe</i> | <i>70.96</i> | <i>68.56</i> |

Cuadro No. 7

Análisis Semicuantitativo de las magnetitas del Mineral "Normal" y Mineral "Amorfo"

Así también se realizó un análisis semicuantitativo en diferentes microáreas a lo largo de un grano de magnetita del mineral "amorfo", cubriendo desde su periferal al centro del grano, ver imagen No. 4, los resultados obtenidos se anotan en el cuadro No. 8.

| ELEMENTO Y COMP. | MICROÁREA ANALIZADA EN LA MAGNETITA DEL MINERAL "AMORFO" | | | | | |
|----------------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| * Fe ₂ O ₃ | 65.91 | 65.12 | 63.98 | 63.64 | 64.28 | 65.26 |
| * FeO | 29.61 | 29.25 | 28.45 | 28.58 | 28.88 | 28.63 |
| MgO | 0 | 0 | 2.88 | 0 | 0 | 0 |
| SiO ₂ | 3.76 | 1.23 | 0.52 | 0.97 | 0 | 1.46 |
| CaO | 0.23 | 0.22 | 0 | 0.58 | 0.24 | 0.76 |
| V ₂ O ₃ | 0 | 0.94 | 0.76 | 0 | 0.52 | 0.82 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.08 | 0.58 | 0 | 0 | 1.56 | 1.09 |
| MnO | 0.41 | 0.09 | 0 | 2.09 | 0.61 | 0 |
| CoO | 0 | 0 | 3.66 | 4.14 | 3.16 | 3.51 |
| NiO | 0 | 2.57 | 0.39 | 0 | 0.76 | 0 |
| TOTAL | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| <i>Fe</i> | <i>69.09</i> | <i>68.27</i> | <i>66.40</i> | <i>66.70</i> | <i>68.56</i> | <i>66.82</i> |

Cuadro No. 8

Análisis Semicuantitativo de diversas microáreas en magnetita del mineral "amorfo" de acuerdo a la imagen No. 4

* Datos calculados estequiométricamente a partir de los análisis proporcionados por microsonda electrónica de barrido.

Ganga mineral "Normal"

Como se ha indicado, la magnetita del mineral "Normal" está contenida en una matriz granoblástica de plagioclasas sódicas recristalizadas, las cuales han perdido su maclado, así como piroxenos homogéneamente distribuidos, ver imagen No. 1, los análisis semicuantitativos son los siguientes:

| COMPUESTOS | CONTENIDO EN % EN PLAGIOCLASA SÓDICA |
|--------------------------------|---|
| Si O ₂ | 70.956 |
| Al ₂ O ₃ | 20.273 |
| Na ₂ O | 8.520 |
| Ca O | 0.011 |
| K ₂ O | 0.240 |
| TOTAL | 100.00 |

Cuadro No. 9

Análisis Semicuantitativo de la plagioclasa sódica del Mineral "Normal"

| ELEMENTOS | CONTENIDO EN % EN EL PIROXENO |
|------------------|--|
| Mg | 9.340 |
| Al | 7.088 |
| Si | 39.218 |
| Ca | 33.687 |
| Fe | 10.668 |

Cuadro No. 10

Análisis Semicuantitativo del piroxeno del Mineral "Normal"

MINERAL "NORMAL"

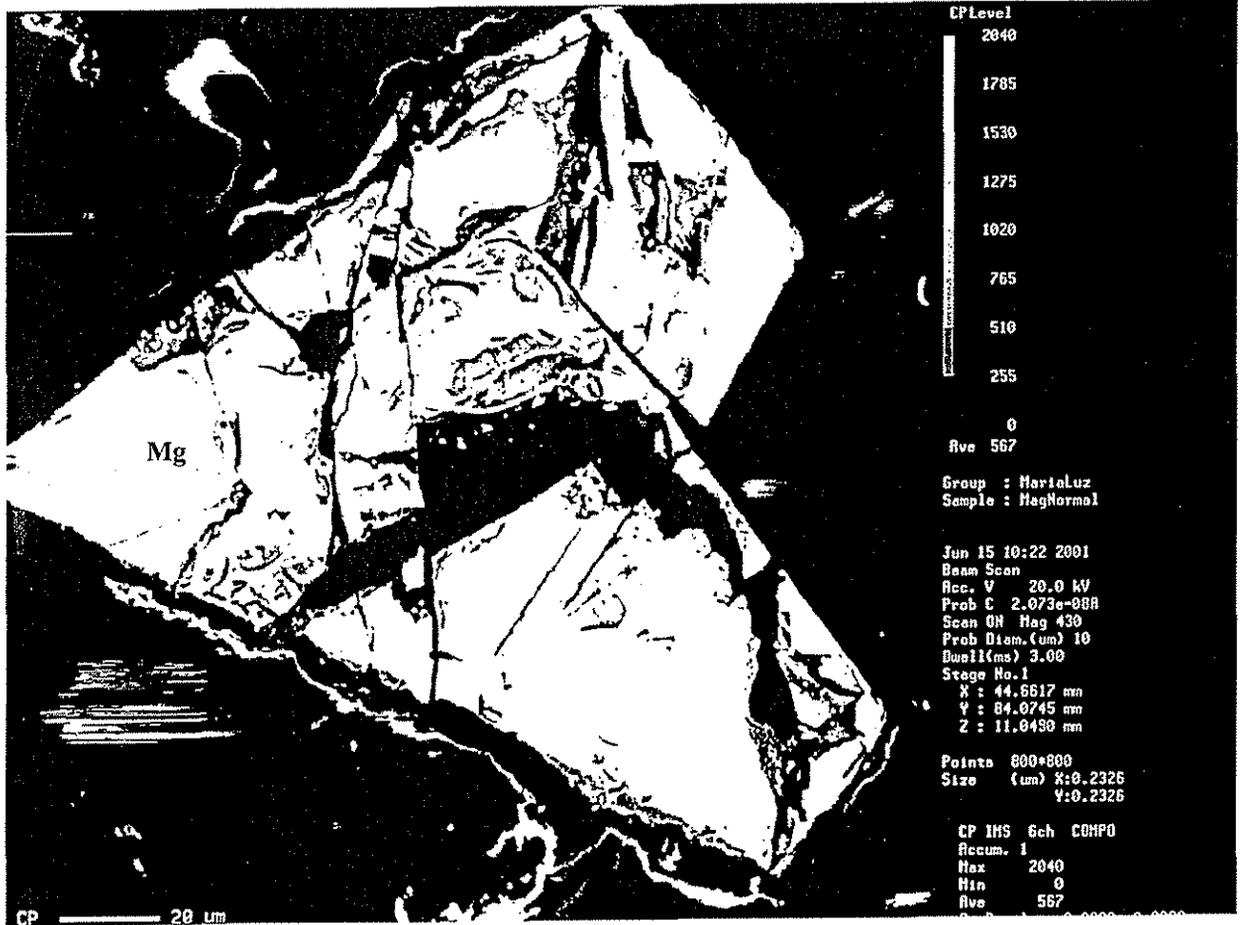


Imagen No. 1. Cristal de magnetita (Mg) incluido en plagioclasas sódicas fuertemente recrystalizadas (en color negro).

MINERAL "AMORFO"

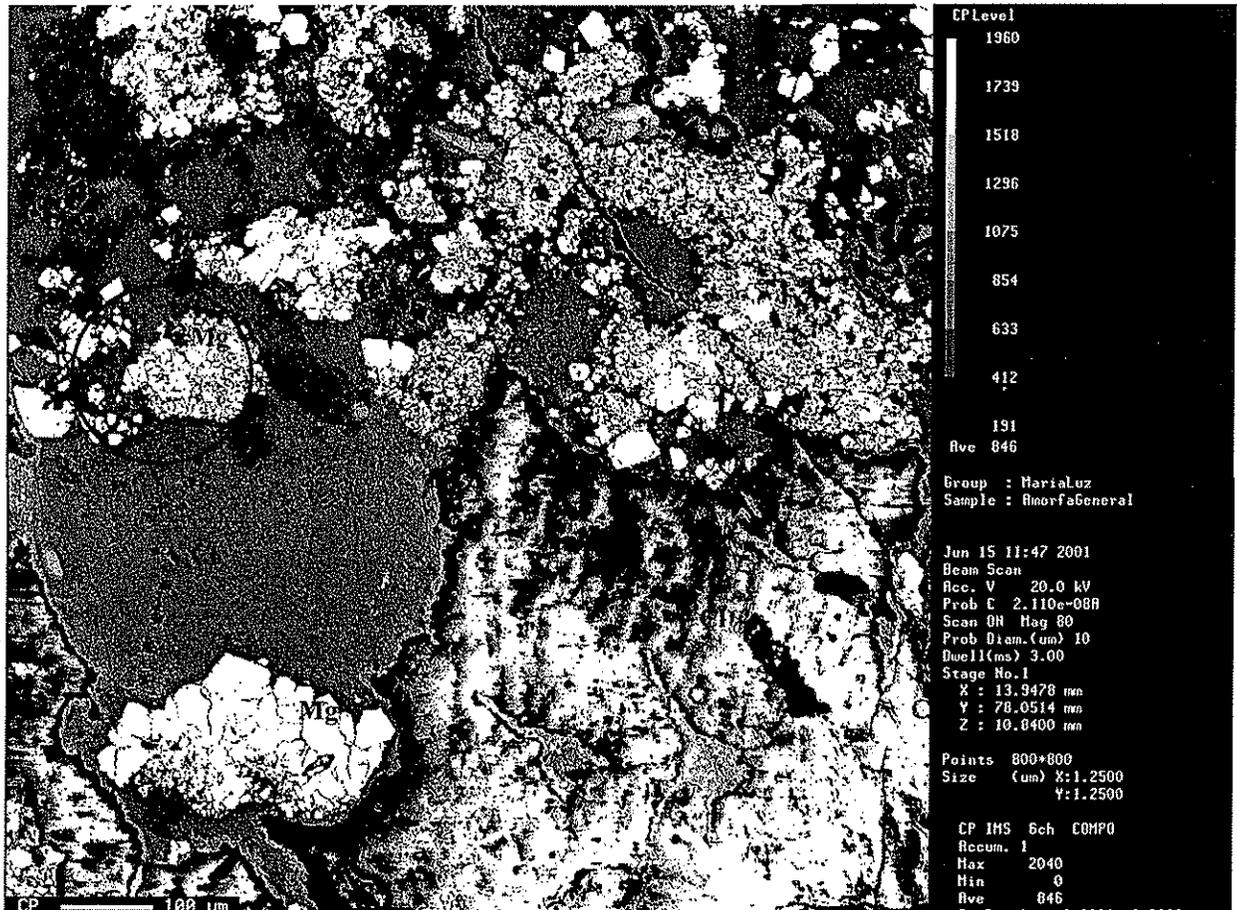


Imagen No. 2. Magnetita (Mg) granular intercrecida intergranularmente con clorita (Cl). Esta imagen muestra un campo amplio de la relación textural entre la magnetita y la clorita, en este se señala con un círculo un área que será ampliada y se muestra en la imagen No.3.

MINERAL "AMORFO"

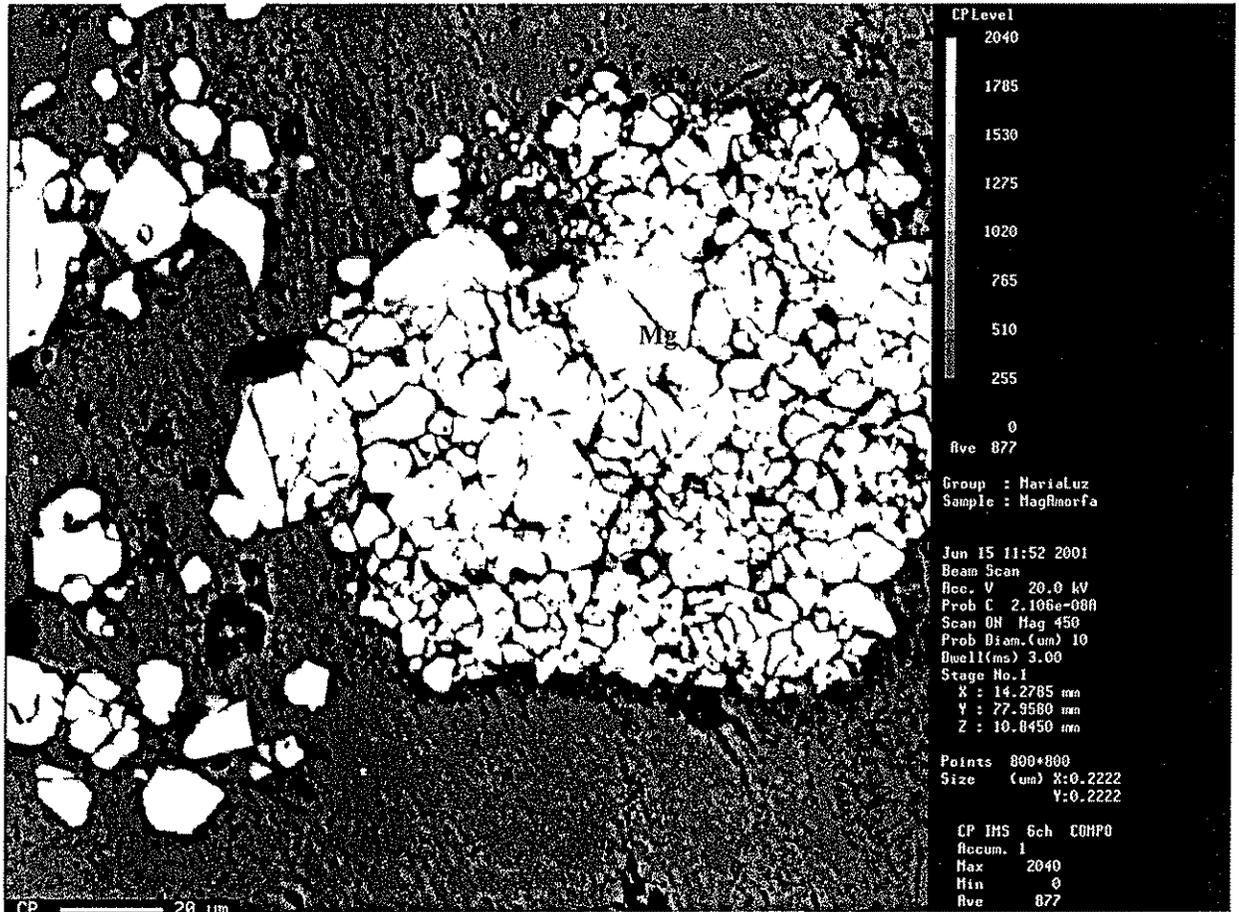


Imagen No. 3. Campo a mayor amplificación limitado por un círculo en la imagen No. 2. Se observa con mayor claridad un agregado granular de magnetita (Mg) de grano muy fino, intercrecida intergranularmente con clorita.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MINERAL "AMORFO"

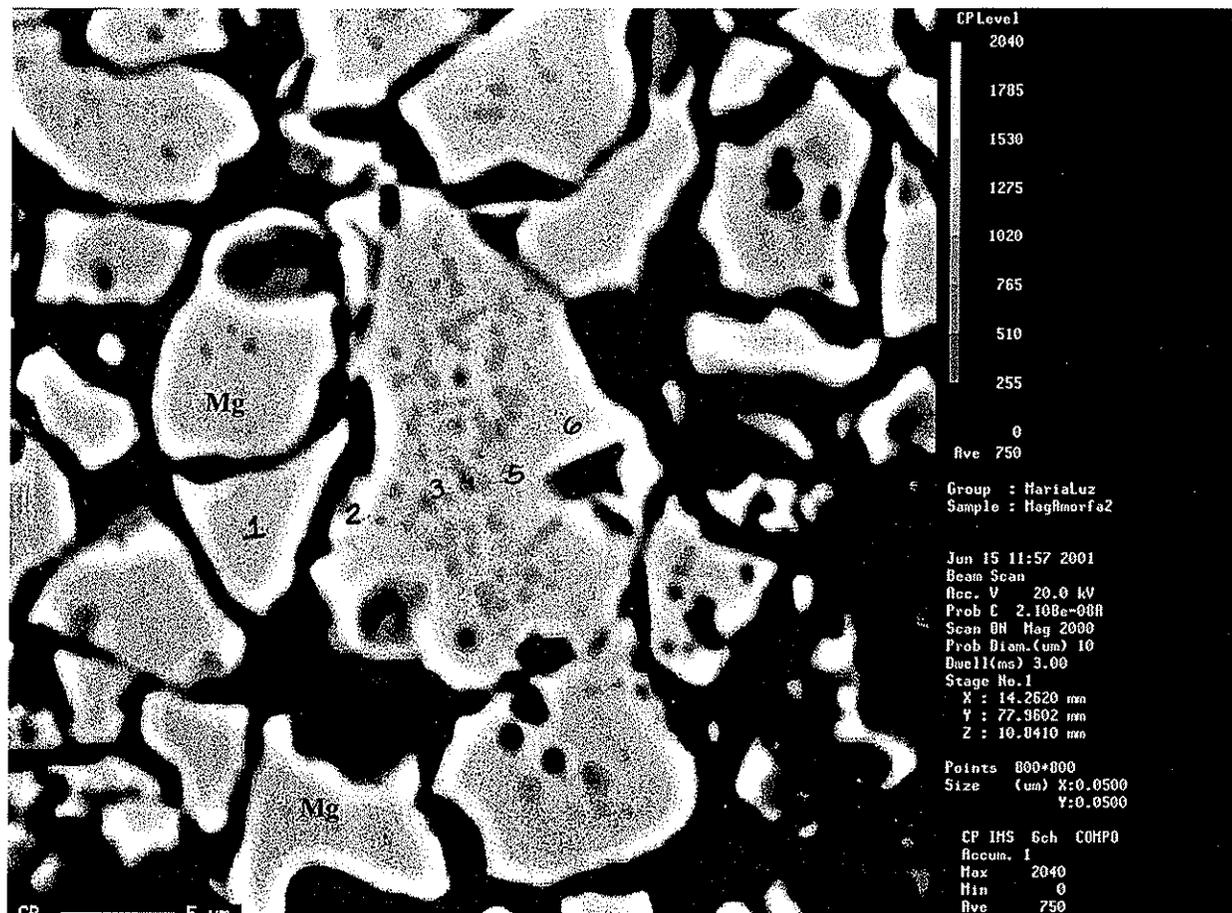


Imagen No. 4. Campo a gran ampliación, mostrando granos subredondeados de magnetita (Mg) rodeados por clorita (en color negro) a través de espacios intergranulares. En la mayoría de los granos de magnetita se distinguen huecos parcial o totalmente rellenos por clorita (pequeñas manchas grises). En número progresivo del 1 al 6 se indican las microáreas que fueron analizadas, ver cuadro No. 8.

8.6.4. Conclusiones de los resultados obtenidos en el Análisis de Microsonda Electrónica de Barrido .

En las cloritas

Al analizar los espectros de rayos X por EDS en ambas muestras se concluye lo siguiente.

Los dos tipos de clorita identificadas como chamosita y bertierina tienen diferencias en su contenido de Fe, Si, Al y Mg, como muestran los espectros obtenidos por energía dispersiva de rayos X, ver cuadro No. 6.

La chamosita del mineral “normal” reemplaza al hornfels feldespático, indicando el inicio del hidrotermalismo en la región, presenta un contenido de hierro muy cercano al silicio, disminuyendo ligeramente el contenido de aluminio, seguido del magnesio, cumpliéndose lo indicado por Brown y Bailey (1962), indicando que a mayor magnesio menor hierro. Sin embargo en la variedad bertierina característica por su asociación con la magnetita del mineral “amorfo”, sucede lo contrario, es decir; un aumento notable en el contenido de hierro, con una notable disminución del silicio, aluminio y magnesio.

Estas variaciones en el contenido, principalmente en la relación Fe – Mg, se debe a una sustitución del ión hierro, por un ión de magnesio, como se ilustra en los espectros de energía dispersiva por rayos x, correspondientes a ambos tipos de clorita.

En la clorita aparece fósforo heterogéneamente distribuido.

En las magnetitas

En los difractogramas obtenidos de ambos tipos de magnetitas, tanto del mineral “normal” como “amorfo”, se observa una clara diferencia en la altura de los picos principales.

Por difracción de rayos x se observó que el grado de intensidad del pico principal de la reflexión de la magnetita $d = 2.53 \text{ \AA}^0$ es mayor para el mineral “normal” con respecto a la magnetita del mineral “amorfo”, en el caso de los resultados obtenidos en el espectro de EDS se observa una ligera diferencia en el contenido del hierro, mayor en la magnetita del “normal” con respecto a la magnetita del “amorfo”.

Así también en la mayoría de las microáreas analizadas existe una mayor cantidad de Cr, Mn, Co y Ni en el mineral “amorfo”, con relación al mineral “normal”, sin embargo estos elementos en algunos casos no aparecen tanto en el mineral “amorfo” como en el mineral “normal”. En este último destaca un mayor contenido de vanadio.

En el análisis semicuantitativo de la magnetita del mineral “amorfo”, hacia la periferia de los granos en contacto con clorita, destaca una mayor proporción de FeO, con una disminución notable de SiO₂, MgO, Al₂O₃, lo cual podría explicarse de la siguiente manera: reemplazamiento iónico del Mg, Ni, Co, Ca por FeO, parcial sustitución del Al, Cr y V por Fe₂O₃.

8. 7. Microscopía de Fuerza Magnética.

8.7.1. Introducción sobre las propiedades magnéticas.

Existen tres estados magnéticos:

- 1) Diamagnético
- 2) Paramagnético
- 3) Ferromagnetismo.

El campo magnético se produce por el movimiento de carga eléctrica, que a un nivel bajo es producido por el movimiento de un electrón, de tal forma que a nivel atómico, todas las sustancias son magnéticas y pueden ser clasificadas como diamagnéticas, paramagnéticas o ferromagnéticas.

Las sustancias diamagnéticas tienden a repeler las líneas de fuerza magnética, es decir; la inducción magnética en el cuerpo es menor que en el espacio libre (en el aire) alrededor de él . En electromagnetismo, la Ley de Lenz establece que el campo producido por un conductor moviéndose en un campo magnético tiende a oponerse al campo externo. El conductor en movimiento aquí consiste de electrones en su órbita alrededor del núcleo. Ejemplos de minerales diamagnéticos son: grafito, muscovita, biotita, siderita, etc.

Las sustancias que tienden a concentrar las líneas de fuerza son paramagnéticas, esta propiedad se produce a partir del espín de los electrones (movimiento de giro sobre su propio eje). Estos electrones están generalmente arreglados en pares; con un espín + y otro -, de forma que no hay efecto neto. De tal forma que la magnetización se reduce a cero cuando se quita el campo magnético. El paramagnetismo es muy dependiente de la temperatura, esta es la Ley de Curie de susceptibilidad paramagnética, la cual indica que la susceptibilidad disminuye con el aumento de la temperatura. Minerales paramagnéticos son: el grupo del olivino, piroxenos y anfíboles.

Las sustancias ferromagnéticas tienen átomos con momentos magnéticos diferentes de cero, pero estos sí interactúan fuertemente con los momentos atómicos adyacentes, este efecto produce magnetización de varios órdenes de magnitud mayores que las sustancias paramagnéticas en el mismo campo magnetizante. Las sustancias ferromagnéticas retienen una magnetización permanente después que el campo externo es removido; resultando, que ellos concentran muy fuertemente las líneas de fuerza.

Muchas de las anomalías magnéticas son causadas por minerales ferromagnéticos como la magnetita y titanomagnetitas, en estos materiales los átomos de moléculas vecinas tienden a alinearse sistemáticamente (el llamado fenómeno cooperativo) dentro de un "dominio magnético" con dimensiones del orden de 10 micrones. Los dominios están separados por delgadas regiones (paredes de Bloch) en las cuales las direcciones de magnetización varían rápidamente; esto implica que las paredes almacenen una gran cantidad de energía magnética.

El superparamagnetismo es un comportamiento especial de granos ferrimagnéticos muy pequeños (dominio simple de 0.001 a 0.01 micrones de diámetro) que bajo la presencia de un campo, adquieren una gran magnetización remanente, pero muy inestable y de manera similar a lo que sucede con las sustancias paramagnéticas, la magnetización desaparece rápidamente en cuanto se elimina el campo magnetizador, también son incapaces de retener una magnetización remanente estable a temperatura ambiente, lo que se atribuye al desarrollo de vibraciones térmicas. Las sustancias superparamagnéticas presentan estados intermedios entre un comportamiento paramagnético y un comportamiento ferromagnético, no se han descrito minerales que presenten esta propiedad.

Las rocas son sólidos constituidos de minerales, su susceptibilidad magnética está en función de los minerales más magnéticos que las constituyen, como son los minerales ferrimagnéticos. Estos generalmente involucran óxidos y sulfuros, los cuales generalmente están como componentes accesorios en las rocas; sin embargo esta cantidad es suficiente para que una roca se conduzca ferrimagnéticamente.

8.7.2. Microscopía Magnética.

En Microscopía magnética, como en cualquier disciplina física, la certidumbre en la exactitud de los modelos desarrollados y los cálculos efectuados, se verifica solo con pruebas críticas. La información requerida para estas pruebas y para la generación de nuevos modelos (y desarrollo de nuevos dispositivos magnéticos) es variada. Puede ser tan simple como detectar la presencia de una pared de dominio o medir el estado de una partícula magnética, o tan complejo como determinar la estructura magnética de una transición de pared de dominio. En el primero, la situación más simple, la técnica de medición necesita solo dar un sí o un no; mientras que en el último caso, puede ser necesario interpretar los datos medidos para determinar las variaciones especiales de la magnetización.

Durante las últimas dos décadas se han desarrollado varios microscopios que pueden satisfacer tales necesidades en el análisis de muestras minerales. En este campo, la utilidad del microscopio de fuerza magnética y de la microsonda electrónica de barrido, con análisis al microscopio de polarización ha quedado ampliamente demostrada. Quizá más simple de comprender es el microscopio de fuerza magnética (MFM), el cual tiene una resolución espacial del orden de 10 nm. El MFM es idéntico al de fuerza atómica con la excepción que el cantilever tiene un elemento magnético como sonda.

La respuesta del cantilever MFM es acoplada al campo magnético de la muestra por medio del campo magnético de la sonda. El MFM usado fue un Autoprobe CP de Park Scientific Instruments, del Instituto de Investigación de Materiales, de la UNAM.

El MFM se ha usado para la obtención de imágenes de alta resolución de estructuras en superconductores, de estructuras de dominio en materiales magnéticos suaves y duros, y ha encontrado uso significativo para procesar imágenes de medios de grabación.

Desafortunadamente, la respuesta del MFM ha sido difícil de cuantificar. Esta técnica usa un sensor magnéticamente suave, como el elemento de arranque en un magnetómetro fluxgate. El resultado es un instrumento con la resolución espacial del MFM y la resolución cuantitativa del campo magnético de un magnetómetro fluxgate.

Para la operación, se aplica un campo magnético variante en el tiempo a la sonda y a la muestra usando bobinas Helmholtz de 10 cm de radio. Las bobinas se orientan perpendicularmente al plano de la muestra. La sonda tiene una coercitividad menor de 1 Oe y un campo de saturación aproximada de 100 Oe. Para obtener la imagen en microscopía de fuerza magnética, se tratan de separar los efectos de las interacciones topográficas de los efectos magnéticos, pasando dos veces la sonda. En la primera, se obtiene la imagen de la superficie o topografía de la muestra; en tanto que en la segunda, el cantilever se levanta una distancia preprogramada a cierta altura de la superficie (típicamente 5 – 200 nm para el MFM) siendo entonces sensitiva a un amplio rango de fuerzas magnéticas. Sin embargo, en lugar de medir las fuerzas magnéticas, el fluxgate del MFM mide el campo magnético durante el segundo sondaje.

La física de los granos con comportamiento pseudosimple (PSD) y multi – dominio (MD) es de gran interés en paleomagnetismo porque muchos granos de óxidos ferrimagnéticos son demasiado grandes para estar en equilibrio de dominio – simple (SD; menor a 0.1 micrones). Estos tamaños de grano han sido estimados sobre la base de los estudios de propiedades magnéticas en el mineral de Peña Colorada (Alva Valdivia et al., 1996, 2000).

No obstante tales granos contienen dominios magnéticos, que aún portan una magnetización remanente natural estable. Excepto por las partículas de tamaño más pequeños debajo de 0.1 micrones de SD casi uniformemente magnetizadas, la magnetización remanente natural es portada por las partículas que contienen estructuras micromagnéticas no uniformemente magnetizadas, PSD o pequeños multi – dominio (MD). Estas estructuras afectan al origen de la magnetización remanente natural y la fidelidad del registro paleomagnético contra las remagnetizaciones termoviscosas y magnetoquímicas.

Las imágenes del MFM nos proveen de rasgos micromagnéticos en nuestros granos PSD y MD, de forma que entonces es posible analizar el enlace entre estructuras micromagnéticas de granos individuales y propiedades magnéticas macroscópicas de las rocas como remanencia, coercitividad y temperaturas de bloqueo.

Imágenes Topográficas y Fuerza Magnética de la muestra de Fe/normal

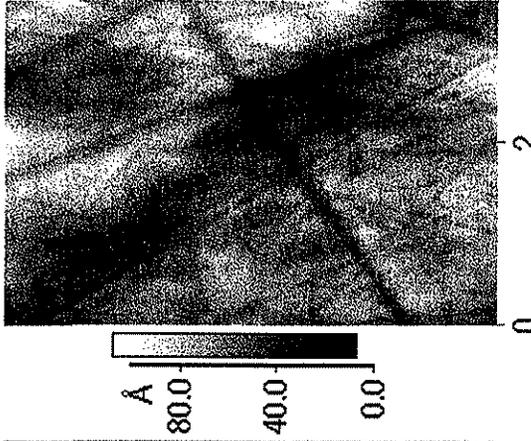
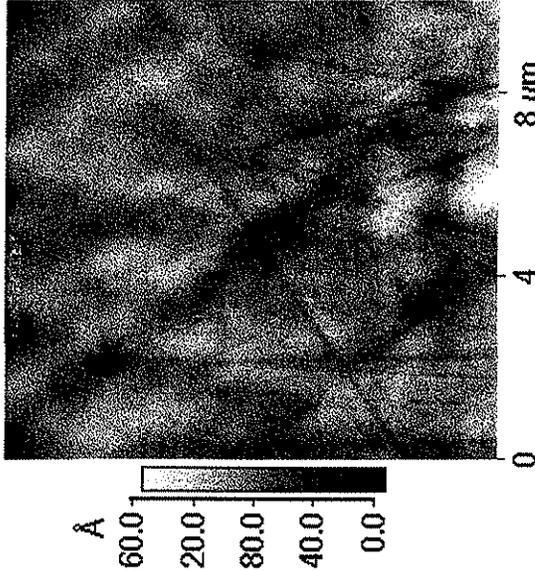
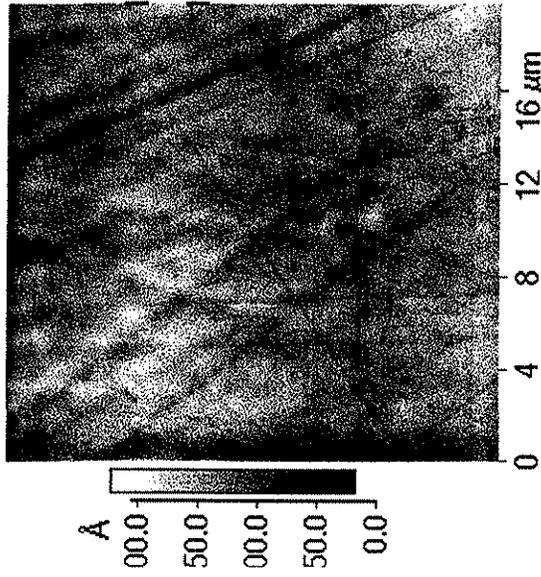


Imagen No. 1

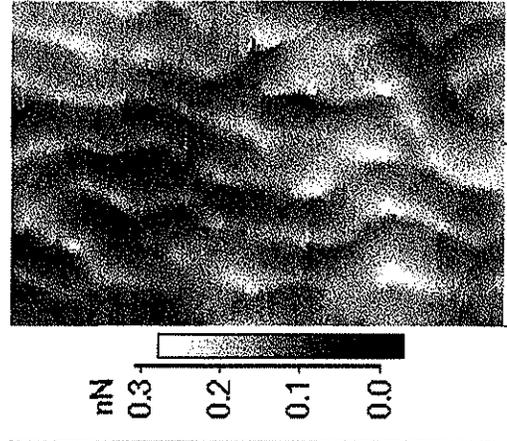
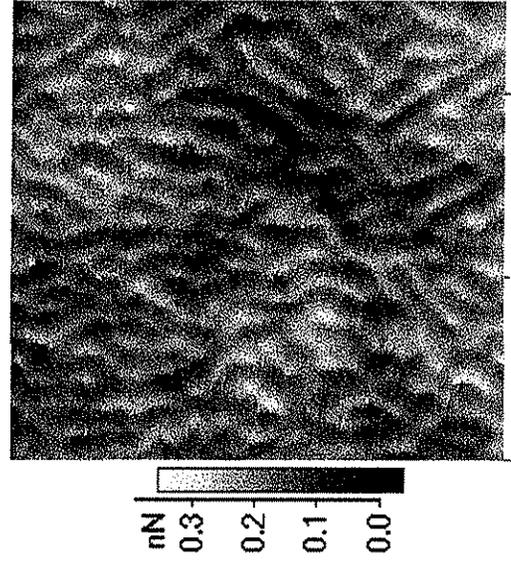
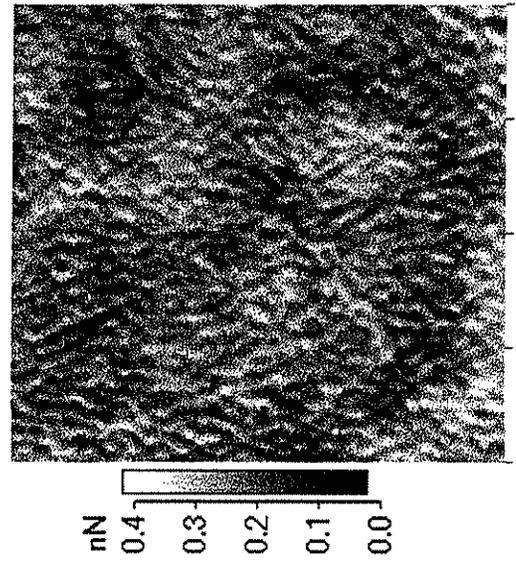


Imagen No. 2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Imágenes Topográficas y Magnéticas de la muestra Amorfo

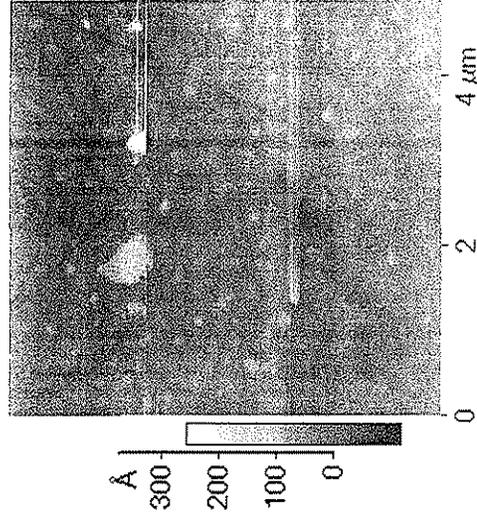
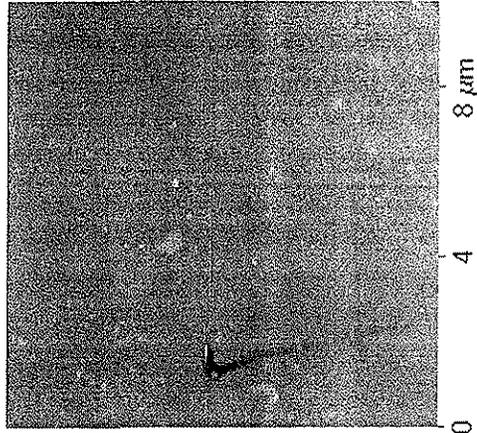
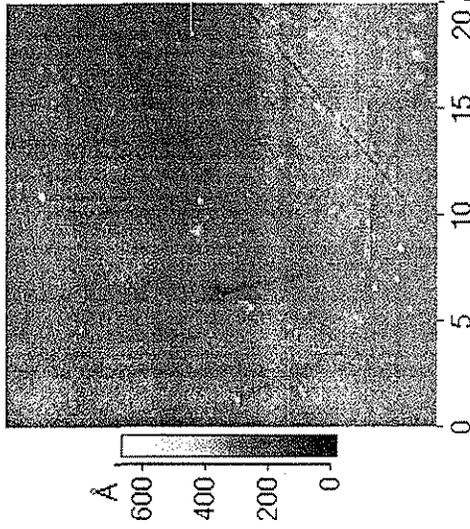


Imagen No. 3

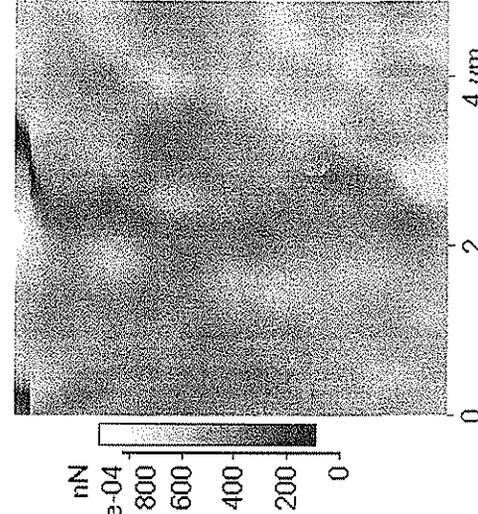
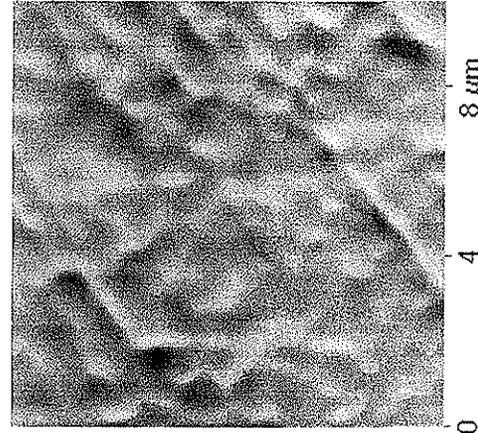
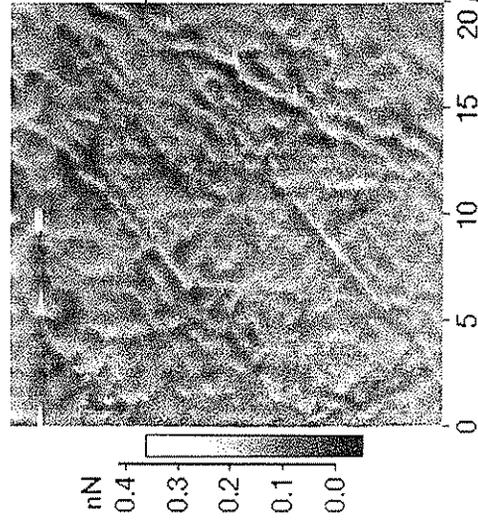


Imagen No. 4

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Estudios preliminares del MFM han estudiado las estructuras de pared y de dominios magnéticos en cristales de magnetita (Williams et al., 1992; Proksh et al., 1994; Proksh et al., 1996; Pokhil and Moskowitz, 1997).

En este trabajo, se reporta la aplicación de la técnica de MFM para identificar las posibles semejanzas y diferencias a nivel de dominio magnético de los minerales de Fe “normal” y “amorfo”. Las imágenes Nos.: 1, 2, 3 y 4, muestran las imágenes obtenidas de la superficie (topográfica) y del campo magnético (con el efecto topográfico restado) en un área cuadrada de 20 micrones y en distintas ampliaciones. La escala de valores cuantitativos del campo como función de posición en nano- Newtons.

La imagen del mineral “normal” muestra rasgos que sugieren la presencia de una magnetización de los dominios magnéticos normal a la superficie de la muestra (Pokhil y Moskowitz, 1997). Igual se infiere, sobre la base de la forma que presentan dichos dominios magnéticos que estos corresponden a granos con dominios de PSD a pequeños MD.

En la imagen del mineral “amorfo” igual se pueden aún observar prácticamente las mismas características que en el anterior, esto es: el mismo tipo de magnetización en los dominios magnéticos perpendicular a la superficie de la muestra, y la correspondencia con dominios PSD y MD (Pokhil y Moskowitz, 1997). Sin embargo, hay tendencia de los dominios magnéticos a agrandarse, pasando a predominar los granos con MD. Además, es claramente observable la falta de claridad de la imagen (estas son más difusas). Ambos efectos los atribuimos a los procesos de formación que dieron lugar al mineral “amorfo”, en un ambiente acuoso que provocó un cambio drástico por efecto de la temperatura, al momento de la depositación de la magnetita, afectando su tamaño grano, lo que se evidencia por una textura granular de grano fino a muy fino (entre menos de 1 micrómetro hasta 56 micrómetros). La presencia de un micromargen de alteración alrededor de los granos de magnetita al contacto con clorita, identificada por espectrografía Mössbauer como una combinación de óxidos de hierro complejos, asociados a radicales oxihidrilo, aunado al pequeño tamaño de grano, debe influir definitivamente en la magnetización de los dominios magnéticos por cambios magnetoestáticos, producidos por los granos de la superficie estudiada (anisotropía de forma de los granos) y a cambios en la estructura de los cristales (anisotropía magnetocristalina).

9. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y FISICOQUÍMICA DE PRODUCTOS METALÚRGICOS DEL MINERAL “NORMAL” Y “MINERAL AMORFO” COMO APOYO A LA INVESTIGACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN METALÚRGICA.

La magnetita característica del mineral "normal" y mineral "amorfo" presentan diferencias marcadas en sus relaciones texturales y asociaciones mineralógicas con respecto a los minerales de ganga.

Estas diferencias afectan desde un punto de vista metalúrgico, los concentrados magnéticos de magnetita, que en el caso del mineral "normal" son satisfactorios mientras que los concentrados magnéticos del mineral "amorfo" no lo son.

Estas diferencias marcan la huella de su origen por condiciones ambientales de formación diferentes.

Durante el desarrollo del estudio de caracterización, para efecto de apoyar la investigación y experimentación metalúrgica, se tiene la necesidad de conocer el grado de liberación de la magnetita a diferentes granulometrías y resolver sobre cinco características mineralógicas particulares del mineral "amorfo" con respecto al mineral "normal", que influyen notablemente en el grado de liberación de la magnetita con respecto a la ganga en los concentrados magnéticos. El conocimiento de estas diferencias permitirá, la optimización del beneficio metalúrgico de la magnetita.

Se debe tener conocimiento sobre:

- a) Análisis Químico Cuantitativo de los elementos y compuestos de interés.
- b) Asociación mineralógica de la magnetita con los minerales de ganga.
- c) Clasificación mineralógica de la clorita del mineral "normal" y "amorfo" asociada a la magnetita, en productos no magnéticos (colas).
- d) Establece diferencias en las relaciones texturales existentes entre la magnetita del mineral "normal" y "amorfo" con respecto a la ganga, en los concentrados magnéticos.
- e) Determinar el tamaño de grano de la magnetita del mineral "normal" y "amorfo".
- f) Establecer diferencias estructurales entre la magnetita del mineral "normal" y "amorfo" en los concentrados magnéticos.

El estudio de caracterización como apoyo a la experimentación metalúrgica se realizó en los siguientes productos:

- a) Muestra general, sin proceso metalúrgico identificada como **Cabeza**.
- b) Muestra de concentrado de magnetita, producto metalúrgico identificado como **Concentrado Magnético**.
- c) Muestra no magnética, producto metalúrgico identificado como **Colas**.

9. 1. Condiciones de Operación estipuladas.

Con el fin de obtener los productos señalados se siguió la siguiente secuencia de tratamiento y condiciones de operación.

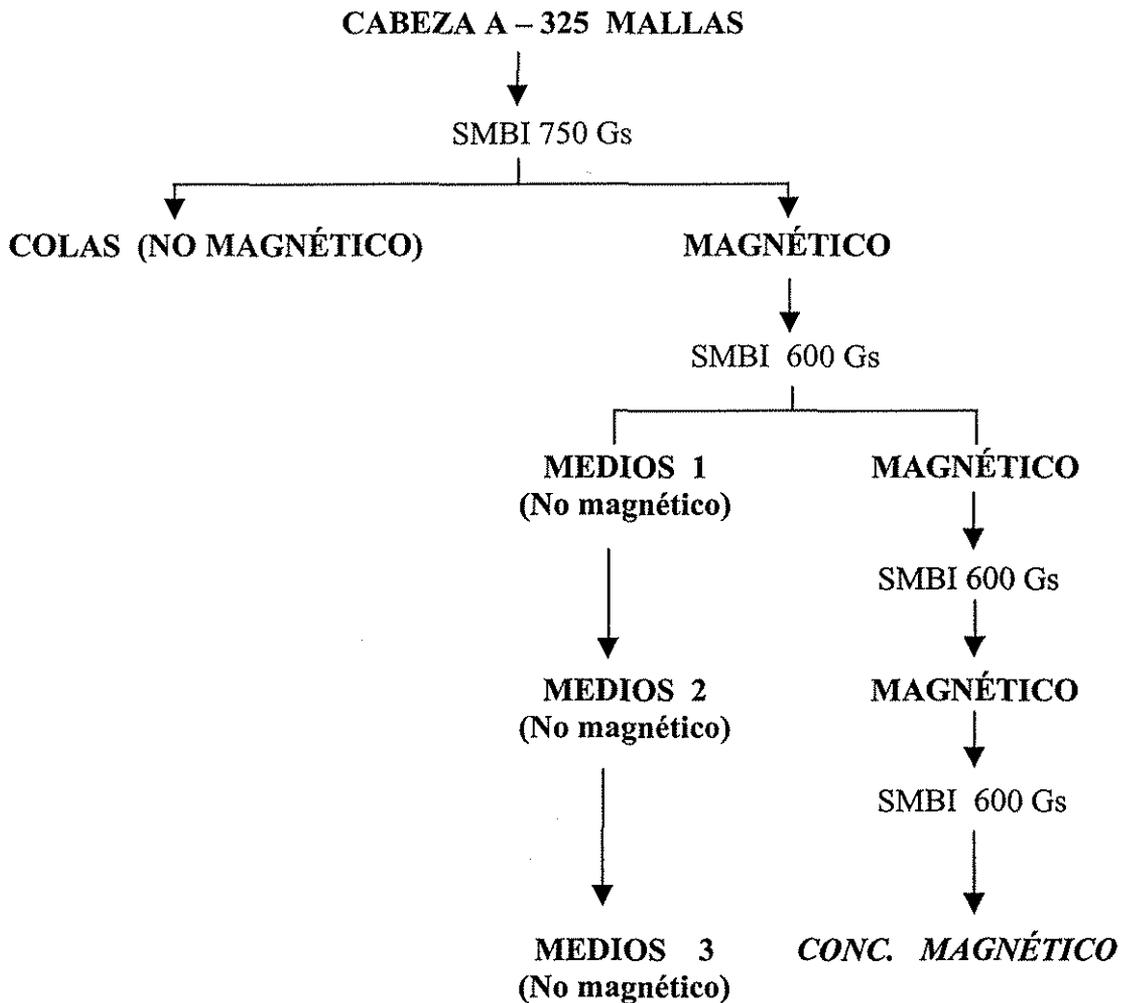


Figura No. 6

Nota: SMBI .- Separación magnética con núcleo magnético de imán permanente

9.2. Análisis Químico Cuantitativo de los elementos y compuestos de interés.

Los elementos y compuestos que se consideraron de interés, como apoyo al estudio de productos metalúrgicos, se analizaron químicamente por espectrografía de plasma (ICP) a través de un espectrómetro marca Shimatsu.

Los resultados obtenidos se anotan en el cuadro No. 9 para el concentrado de magnetita (producto magnético) y el producto no magnético, del mineral "normal" y el mineral "amorfo".

| ELEMENTO | CONC. MAG. | CONC. MAG. |
|----------|------------|------------|
| | "NORMAL" | "AMORFO" |
| | Ppm | Ppm |
| Cr | 652.4 | 632.8 |
| Ni | 23.2 | 45.3 |
| Cu | 11.7 | 31.5 |
| Pb | 48.7 | 52.0 |
| Zn | 160.2 | 149.6 |
| As | 1.085 | 1.405 |
| Sb | N.D. | N. D. |
| Ba | 4.6 | 7.4 |
| Be | 6.2 | 4.3 |
| Bi | 0.6 | 0.2 |
| Al | 0.14 % | 1.783 % |
| Cd | N. D. | N. D. |
| Co | 15.5 | 22.2 |
| Sc | N. D. | N. D. |
| Sr | 11.7 | 6.2 |
| Te | N. D. | N. D. |
| Mn | 917.9 | 934.0 |
| Se | N. D. | N. D. |
| Tl | N. D. | N. D. |
| U | N. D. | N. D. |
| Sn | N. D. | N.D. |
| W | 97.1 | 92.6 |

| ELEMENTO | NO MAG. | NO MAG. |
|----------|----------|----------|
| | "NORMAL" | "AMORFO" |
| | Ppm | Ppm |
| Cr | 5.1 | 306.7 |
| Ni | 7.9 | 119.3 |
| Cu | 25.3 | 632.8 |
| Pb | 96.7 | 80.3 |
| Zn | 57.7 | 313.4 |
| As | 8.085 | 8.94 |
| Sb | N. D. | N. D. |
| Ba | 5.4 | 26.7 |
| Be | N. D. | 6.2 |
| Bi | 0.4 | 0.2 |
| Al | 0.222 % | 6.632 % |
| Cd | 0.9 | 2.4 |
| Co | 20.3 | 108.7 |
| Sc | N. D. | 6.9 |
| Sr | 26.6 | 18.1 |
| Te | N. D. | N. D. |
| Mn | 199.2 | 2847.0 |
| Se | N. D. | N. D. |
| Tl | N. D. | N. D. |
| U | N. D. | N. D. |
| Sn | N. D. | 1.9 |
| W | N. D. | 59.0 |

Cuadro No. 9
Análisis químico cuantitativo elemental de los productos magnéticos y no magnéticos del mineral "normal" y el mineral "amorfo"

9.3. Análisis de Liberación de Magnetita como apoyo a la Investigación y Experimentación Metalúrgica.

El estudio de liberación de la magnetita se realizó sobre dos concentrados magnéticos, uno obtenido del mineral “normal” y otro obtenido del mineral “amorfo”, ambos concentrados fueron clasificados a través de ciclones en un equipo llamado cyclosizer, sub – sieve sizer, marca WARMAN, modelo M8.

Esta distribución granulométrica se realizó en el departamento de Investigación y Experimentación Metalúrgica de la Comisión de Fomento Minero (C. F. M.), de esta forma se obtuvieron seis productos a diferentes granulometrías, es decir:

- + C1.- partículas mayores de 56 micrómetros.
- C1.- partículas de 56 a 30 micrómetros
- C2.- partículas de 30 a 22 micrómetros
- C3.- partículas de 22 a 15 micrómetros
- C4.- partículas de 15 a 10 micrómetros
- C5.- partículas de 10 a 7 micrómetros
- C5.- partículas menores de 7 micrómetros.

Los resultados obtenidos de este estudio se reportan a continuación en el cuadro No. 10:

| CICLÓN | % DE LIBERACIÓN RELATIVA | |
|--------|--------------------------|----------|
| | “NORMAL” | “AMORFO” |
| + C 1 | 99 | 62 |
| C 1 | 99 | 77 |
| C 2 | 99 | 77 |
| C 3 | 99 | 77 |
| C 4 | 99 | 88 |
| C 5 | 99 | 93 |
| - C 5 | 99 | 97 |

Cuadro No. 10
Análisis de liberación relativa sobre productos de concentrados magnéticos

9.4. Interpretación sobre la Liberación de la Magnetita del Mineral “Normal” con respecto al Mineral “Amorfo”

La condición textural de la magnetita y su asociación con la ganga, influyó notablemente en la liberación relativa y absoluta de la magnetita.

En el caso del mineral “normal” la textura predominante es masiva, donde encontramos grandes masas de magnetita que llegan a tener espesores hasta de 10 cm, cortando en varias direcciones a una roca hornfésica en algunos casos parcialmente cloritizada, con un aspecto brechado.

La roca hornfésica también tiene cristales euedrales y subedrales de magnetita, diseminados en menor proporción, algunos son de gran tamaño y llegan a medir hasta 7 mm. Tanto la magnetita masiva como los cristales diseminados tienen bordes rectos y guardan una relación normal con la ganga, que en este caso es de tipo feldespática formada por plagioclasas de composición sódica fuertemente recristalizadas y ligeramente reemplazadas por una clorita de color verde pistache, clasificada como una chamosita 11 b (monoclínica).

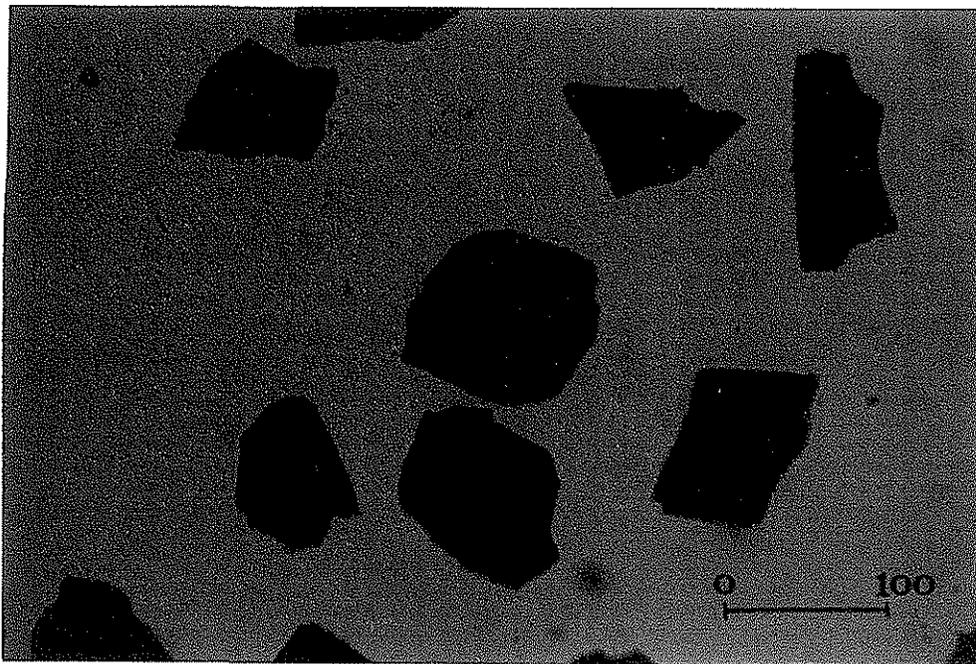
El tamaño de cristal de la magnetita semejante a la de los feldespatos (plagioclasas), que son de dureza en la escala de Mohs de 5.5 y 6 respectivamente, facilitan su liberación a través de la molienda. Así también a un tamaño mayor de 50 micrómetros la magnetita se libera, lo que permite tener una buena recuperación metalúrgica durante la concentración magnética.

Los conceptos de liberación real de la magnetita fueron ampliamente comprobados a través de un estudio de liberación de partículas de magnetita, el cual se llevo a cabo sobre productos resultado de una separación granulométrica.

La separación granulométrica se realizó a través de ciclones en un equipo llamado Cyclosizer, el cual esta conformado por ciclones que separan las partículas de magnetita a diferentes tamaños por acción centrifuga.

Los siete productos obtenidos por cyclosizer fueron analizados al microscopio de polarización con luz transmitida y por medio de un “conteo de partículas” de magnetita realizado en diferentes campos microscópicos, se obtuvo el contenido en porcentaje de las partículas libres de magnetita, es decir que no presentaran asociación mineralógica y textural con los minerales de ganga.

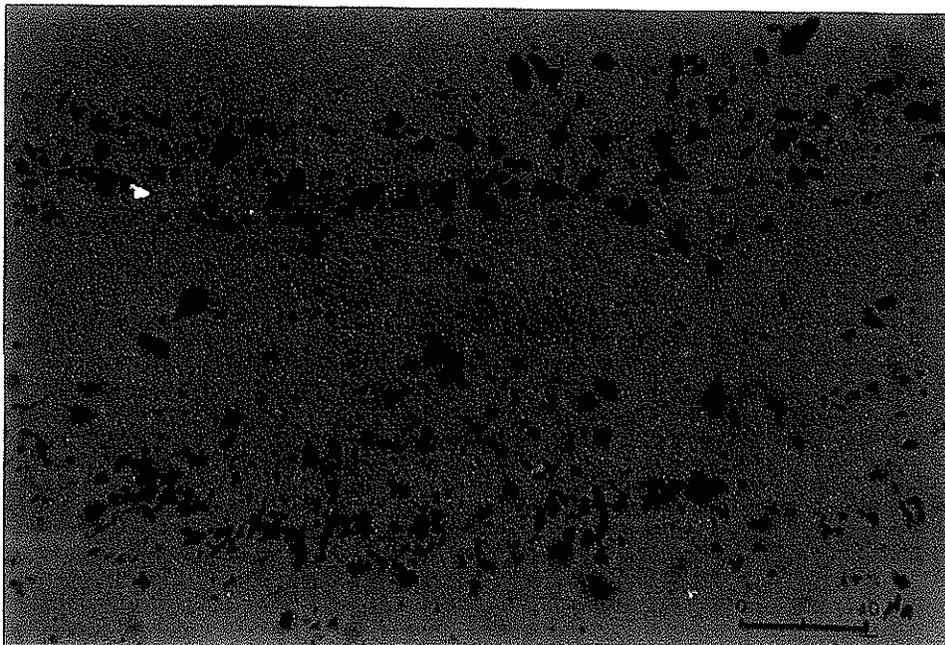
Los productos obtenidos por concentración magnética de rutina y separados en fracciones a través de una separación granulométrica por cyclosizer, mostraron una alta liberación (99 %) tanto en los productos gruesos como finos, como se aprecia en las foromicrografías Nos. 29 a, 29 b y 29 c.



Fotomicrografía No. 29 a. Partículas libres de magnetita, en el producto de partículas mayores a 56 micrómetros..



Fotomicrografía No. 29 b. Partículas libres de magnetita, en el producto de partículas de un rango de tamaño entre 10 y 15 micrómetros.



Fotomicrografía No. 29 c. Partículas libres de magnetita formando agregados no consolidados, en el producto fino con partículas en un rango de tamaño menor a 7 micrómetros.

El mineral “amorfo” tuvo un comportamiento diferente al mineral “normal” durante el estudio de liberación, debido principalmente a su textura, en dos conceptos principales; tamaño de grano de la magnetita y su intercrecimiento intergranular con la ganga, que en este caso es clorita, calcita y esporádicamente cuarzo.

Como ya se indicó anteriormente la clorita es como una sabana laminar de color verde oscuro que contiene homogéneamente diseminados granos subredondeados a redondeados de magnetita con bordes corroídos por reacción con la clorita, formando una margen de clorita de color verde oscuro con matiz café.

La relación textural tan estrecha de la magnetita con la clorita, aunada al tamaño de grano tan fino de la magnetita, que llega a ser en algunos casos hasta de menos de un micrómetro, dificultó su liberación durante el proceso de molienda.

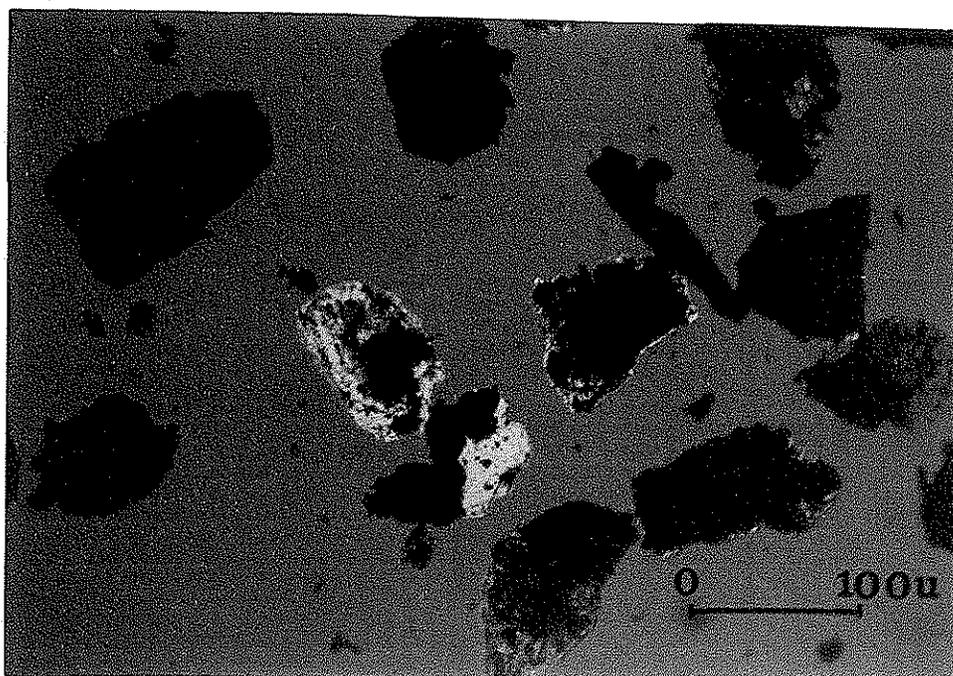
La clorita estructuralmente también se comporta como una arcilla (como veremos mas adelante), lo que dificulta la separación de la magnetita, ya que la clorita se adhiere a ésta como lo hace un coloide, dificultando también el proceso de concentración magnética.

También al igual que el mineral “normal” se realizó un estudio de liberación de productos obtenidos a través de un concentrado magnético.

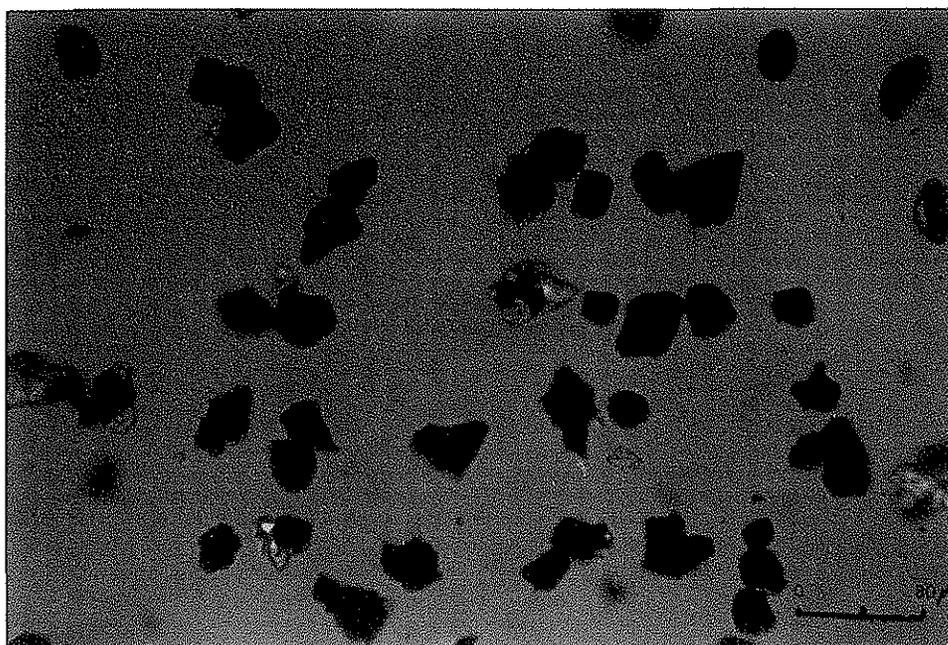
Estos productos fueron obtenidos a partir de una separación granulométrica por cyclosizer, los productos fueron siete y se analizaron a través del microscopio de polarización con luz transmitida.

La liberación de la magnetita del mineral "amorfo" fue relativamente baja, sobre todo en los productos mayores a 10 micrómetros (liberación entre 62 y 88 %), aumentando significativamente hasta un 93 %, en los productos con un tamaño de partícula menor a 10 micrómetros, sin ser igual al 99 % de liberación de magnetita del mineral "normal".

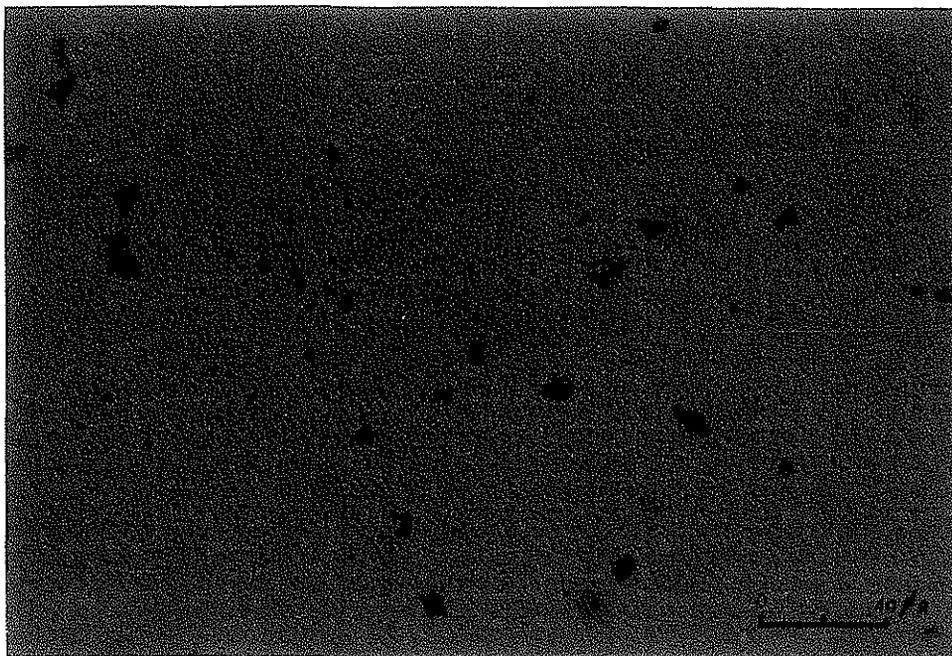
Con el fin de ilustrar el grado de liberación del mineral "amorfo" se obtuvieron fotomicrografías de los tres principales productos. Es conveniente comparar estas fotomicrografías con las del mineral "normal" (fotomicrografías Nos. 29 a 29 c), con la finalidad de apreciar la diferencia marcada de liberación, los productos del mineral "amorfo" se observa una disminución en la liberación de la magnetita por causa de la asociación textural con la clorita, principalmente al formar un intercrecimiento intergranular estrecho entre la magnetita y la clorita, como se ilustra en las fotomicrografías 30 a, 30 b, 30 c. En la fotomicrografía 31 se aprecia un acercamiento de una partícula no liberada de magnetita, se trata de una partícula de magnetita intercrecida intergranularmente con clorita y calcita.



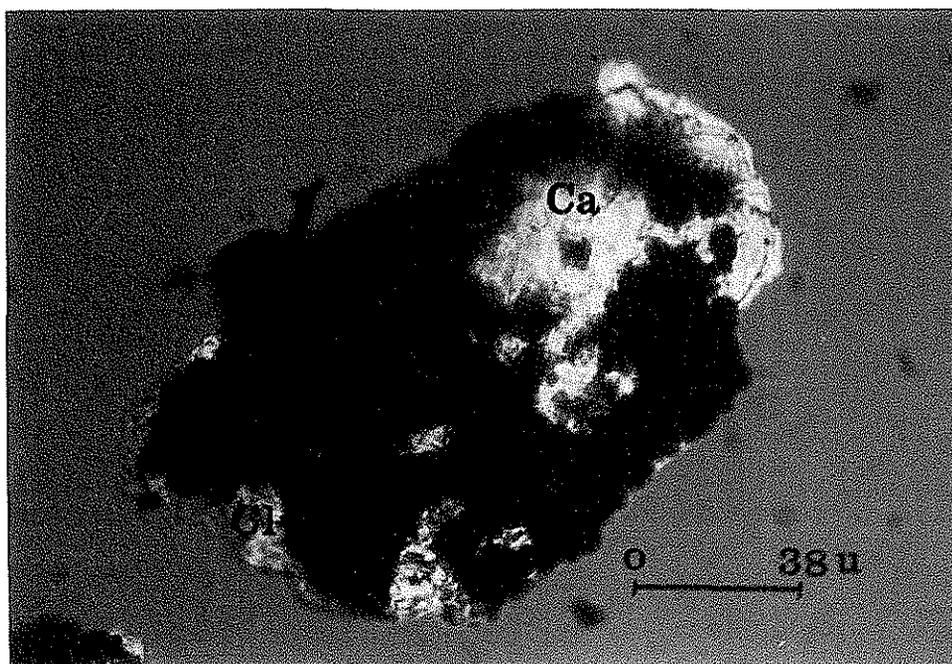
Fotomicrografía No. 30 a. Partículas libres de magnetita y partículas mixtas de magnetita - clorita, magnetita - calcita, en el producto de partículas mayores a 56 micrómetros.



Fotomicrografía No. 30 b. Partículas libres de magnetita y magnetita asociada a clorita, en el producto de partículas de un rango de tamaño entre 10 y 15 micrómetros.



Fotomicrografía No. 30 c. Partículas libres de magnetita formando agregados no consolidados, así como partículas mixtas de magnetita - clorita, en el producto fino con partículas en un rango de tamaño menor a 7 micrómetros.



Fotomicrografía No. 31 . Partícula mixta de magnetita intercrecida intergranularmente con clorita y calcita, asociación característica del mineral "amorfo".

9.5. Interpretación sobre la influencia de las características mineralógicas y texturales que afectan el grado de liberación de la magnetita.

Fueron principalmente cinco características mineralógicas y texturales que influyeron en el grado de liberación de la magnetita, como son:

a) Asociación mineralógica de la magnetita con la ganga.

La ganga del mineral “normal” son principalmente plagioclasas con un reemplazamiento incipiente a chamosita, las cuales tienen una dureza mohs semejante y responden bien a la separación durante la molienda, caso contrario con la magnetita del mineral “amorfo” asociada principalmente a bertierina y calcita, ambas con una diferencia marcada de dureza mohs con relación a la magnetita, dificultando su separación durante la molienda. También se distinguen un mayor contenido de sulfuros en el mineral “amorfo”.

b) Identificación mineralógica de la clorita del mineral “normal” y “amorfo”.

La clorita del mineral “normal” se clasificó como una clorita del politipo 11b (chamosita), tiene una buena cristalización y pertenece al sistema monoclinico. La clorita del mineral “amorfo” también es una clorita identificada como del politipo 1b (bertierina), pseudoamorfa del sistema cristalino ortorrómbico.

c) Relaciones texturales entre la magnetita y la ganga.

La magnetita del mineral “normal” es principalmente masiva y presenta una relación textural con plagioclasas de relleno de cavidades, en menor proporción la magnetita está diseminada, en forma de cristales euedrales y subedrales homogéneamente diseminados en plagioclasas, ambos tipos de texturas responden bien durante la separación por molienda y concentración magnética. Sin embargo la magnetita del mineral “amorfo” forma una textura de intercrecimiento intergranular con la clorita (bertierina) en menor proporción con calcita, donde la magnetita no se separa bien principalmente de la bertierina, durante el proceso de separación magnética, bajando su grado de liberación.

d) Tamaño de grano de la magnetita del mineral “normal” y “amorfo”.

Se observó una diferencia marcada en el tamaño de grano de la magnetita del mineral “normal”, el cual en un 99 % fue mayor a 100 micrómetros, debido a su textura masiva y cristales individuales que llegan a medir hasta 7 mm. Caso contrario en el mineral “amorfo”, donde en un 98 % tiene un tamaño de grano menor a 50 micrómetros. En la zona de contacto entre el mineral “normal” y “amorfo” la magnetita tiene un tamaño de grano que varía entre 50 y 2500 micrómetros.

e) Micromargen de reemplazamiento entre clorita y magnetita.

Por espectrografía Mössbauer se detectó que la magnetita del mineral “normal” presenta un comportamiento espectral característico de una magnetita típica, es decir; el Fe se encuentra en dos estados de oxidación; FeO y Fe₂O₃. Sin embargo la magnetita del mineral “amorfo” extremo, presentó un espectro cuadrupolar característico del FeO y dos desdoblamientos cuadrupolares diferentes para el Fe⁺³, uno característico del Fe₂O₃ y otro en estado de oxidación compartido con radicales oxidrilo, como: Fe(OH)₃. Por la gran sensibilidad de la técnica Mössbauer, podemos notar que en algunos casos extremos entre la asociación magnetita-clorita, ocurre una interacción química al contacto entre ambos minerales, provocando un intercambio iónico, lo que da lugar a la formación de un margen de reemplazamiento extremadamente fino, no claramente perceptible al microscopio de polarización cuando este esta a tamaños ultrafinos.

10. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

La investigación realizada en el mineral "normal" y el mineral "amorfo", respecto de las características mineralógicas y fisicoquímicas de la magnetita y su asociación con los minerales de ganga reporta diferencias significativas, lo que permitió llegar a una perspectiva metalogénica y proponer un origen particular y común entre ambos minerales, pero con una evolución geoquímica diferente. Estas diferencias también marcan un contexto metalúrgico que influyó notablemente en la liberación de la magnetita, provocando una deficiencia en el beneficio de la misma, ahora ya superado sustancialmente. Por esta razón se insistió en una caracterización detallada que proporcionará mayor información sobre las características mineralógicas y fisicoquímicas de los minerales implicados en el proceso de concentración magnética, con el fin de continuar optimizando e implementando nuevos métodos y procesos, para mejorar los parámetros de beneficio metalúrgico. Así también esta información sería de una gran utilidad para un mejor conocimiento de ambas menas, para una mejor planeación en la exploración y explotación minera.

La investigación inició con un conocimiento global de la composición química elemental de ambos tipos de mineral "normal" y "amorfo", empleando para tal fin las técnicas de Espectrografía de Emisión y Fluorescencia de Rayos X, que por diferencias en sus límites de detección se complementan.

Tomando como base la información química cualitativa elemental obtenida por las técnicas anteriormente mencionadas, se analizaron química y cuantitativamente los elementos y compuestos de interés, a través de técnicas analíticas instrumentales y por vía húmeda.

Los resultados obtenidos se reportan en el cuadro No. 11, indicando con una cruz el elemento más abundante ya sea en el mineral "normal" ó en el mineral "amorfo", como sigue:

| ELEMENTOS Y COMPUESTOS | MAYOR PROPORCIÓN | |
|--------------------------------|------------------|----------|
| | "NORMAL" | "AMORFO" |
| Fe total | X | |
| FeO | | X |
| Fe ² O ₃ | X | |
| Al ₂ O ₃ | X | |
| SiO ₂ | X | |
| Na ₂ O | X | |
| MgO | X | |
| K ₂ O | | X |
| CaO | | X |
| P | | X |
| S | | X |
| Zn | | X |
| Pb | | X |
| Cu | | X |
| As | | X |
| Ba | | X |
| Be | | X |
| Bi | X | |
| V | X | |
| Cd | | X |
| Co | | X |
| Sc | N. D. | X |
| Cr | | X |
| Sn | | X |
| Sr | X | |
| Mn | | X |
| Ni | | X |
| W | X | |

Cuadro No. 11

Elementos y compuestos que se encuentran en mayor proporción entre el Mineral "Normal" y el Mineral "Amorfo"

A través del análisis químico se observa un contenido mayor de hierro en el mineral "Normal" (49.50 %), mientras que en el mineral "amorfo" el contenido de hierro disminuye a un 47. 61% en muestra de cabeza, en los concentrados magnéticos ocurre el mismo comportamiento, con un contenido del 70.68 % y 64.66 % respectivamente.

Un mayor contenido de Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O y MgO en el mineral "normal" corrobora el contenido de plagioclasas, piroxenos, no presentes en el mineral "amorfo", solo distribuidos en escasa proporción en la zona de contacto entre el mineral "normal" y el "amorfo".

La asociación geoquímica general de tipo hidrotermal está representada en ambos minerales "amorfo" y "normal" por la asociación: CaO, P, S, Zn, Pb, Cu, As, Co, Cd, V, Ba, Bi, Sr, Ag, correspondientes a los componentes principales que constituyen los minerales hidrotermales, como: calcita, chamosita, cuarzo, epidota, sericita, minerales arcillosos, apatito, pirita, marmatita, pirrotita, galena y calcopirita, un contenido mayor en el mineral "amorfo" confirma que éste, fue más susceptible al hidrotermalismo. Estos minerales hidrotermales se concentran en los productos no magnéticos (colas).

La asociación geoquímica característica de rocas de metamorfismo de contacto, está indicada por: W - Sn - Mo, (Andrews - Jones et. al., 1968), estos elementos se identificaron principalmente en el mineral "normal".

Elementos como: W, Sn, Mo, V se identifican principalmente en el mineral "normal". El W Mo y V también están en el mineral "amorfo" pero en menor proporción, mientras que elementos como: Mn, Ni, Cr, Co, Cd, son más abundantes en el mineral "amorfo" y se distribuyen tanto en los productos magnéticos como en los no magnéticos de ambos minerales "normal" y "amorfo".

Escanio solo se identificó en el mineral "amorfo" y se concentra principalmente en el producto no magnético, en una proporción de 6.9 ppm.

Berilio, esta distribuido tanto en el concentrado magnético como no magnético del mineral "normal", en el mineral "amorfo" solo se identificó en el producto no magnético.

Otro elemento identificado semicuantitativamente es el Ti, se presenta en ambos minerales en una proporción estimada entre 0.1 y 0.01 %, siendo ligeramente más abundante en el mineral "Amorfo".

Desde el punto de vista mineralógico, el mineral "normal" se caracteriza por magnetita masiva y diseminada. La magnetita de textura masiva, es una masa compacta de magnetita, en la cual llegan a distinguirse cristales de magnetita bien desarrollados de forma euedral y subedral con bordes rectos, algunos de ellos de gran tamaño, llegando a medir hasta 7 mm. La magnetita masiva se aloja en vetas que cortan a la roca encajonante (hornfels feldespático) en varias direcciones, dando a la roca un aspecto brechoide. Esta presenta una alteración incipiente a una clorita de color verde pistache y de textura laminar, así como a epidota, sericita y minerales arcillosos, esta alteración provoca en la roca una mayor susceptibilidad, facilitando en algunas zonas la entrada y reemplazamiento posterior de una clorita verde oscuro criptocristalina y semiamorfa, esta asociación mineralógica y textural corresponde a la zona de contacto entre el mineral "normal" y "amorfo".

El Mineral "Amorfo" se caracteriza principalmente por una magnetita granular de grano fino a muy fino, generalmente con un tamaño de grano entre 50 a menos de 1 micrómetro, intercrecida intergranularmente con clorita criptocristalina, de la siguiente forma; la masa granular de magnetita entra en contacto con soluciones bastas de clorita de color verde oscuro criptocristalina a semiamorfa, presumiblemente formada en un medio acuoso, la clorita separa los granos de magnetita de la masa granular y los transporta en suspensión, esta movilización provoca que los granos de magnetita giren sobre su eje y se redondeen presentando bordes de reacción en contacto con la clorita.

Después del emplazamiento de la magnetita en el mineral "normal" por efecto pirometasomático, se inicia una etapa hidrotermal con la cloritización de la roca encajonante, lo que da lugar a la formación de chamosita, seguida por la depositación inicial de magnetita tanto en el mineral "Normal" como en el mineral "amorfo", seguida por: calcita, apatito, cuarzo, pirita, pirrotita, marmatita y calcopirita, así como una incipiente oxidación de magnetita y calcopirita por hematita y covelita respectivamente. En el caso del mineral "Amorfo" la depositación de estos minerales ocurrió antes que la depositación de clorita criptocristalina.

Al estudiar las características mineralógicas en que ocurren la magnetita y la clorita típicas de los minerales "normal" y "amorfo", resaltó como primera incógnita de interpretación, la diferencia tan marcada del tamaño de grano de la magnetita y de la clorita, además de sus diferencias texturales y asociaciones mineralógicas entre ambos, lo cual se reflejó en la recuperación de la magnetita en los concentrados magnéticos. La necesidad de caracterizar detalladamente al mineral "normal" y "amorfo" fue con el fin de determinar las causas de esas diferencias, lo que permitió una planeación metódica en el estudio de ambos minerales. Esta investigación se fue ampliando y dirigiendo hacia nuevas aplicaciones técnicas con el fin de enriquecer y apoyar los resultados obtenidos.

Se estudió primeramente la magnetita del mineral "normal" y "amorfo", con el fin de encontrar diferencias estructurales, las técnicas utilizadas fueron: Difracción de Rayos X, Análisis Térmico Diferencial y Gravimétrico, Microscopía de Polarización con luz transmitida, Microsonda electrónica, Espectroscopia de Mössbauer y Microscopía de Fuerza Atómica.

Por Difracción de Rayos X se obtuvieron dos difractogramas correspondientes a los concentrados magnéticos de los minerales "normal" y "amorfo", constituidos básicamente por magnetita. En ambos se identifica magnetita y se diferencian por el grado de intensidad de sus valores de reflexión principales $d = 2.5 \text{ \AA}^0$ (100%) y $d = 2.1 \text{ \AA}^0$ (60 %), los cuales son representativos en la magnetita del mineral "normal" y decrecen en la magnetita del mineral "amorfo", ver gráfica No. 5.

Esta diferencia aunada a una diferencia en la proporción del contenido de hierro total en los concentrados de magnetita de ambos minerales, permite proponer un análisis térmico diferencial y gravimétrico para ambas magnetitas en muestras de concentrados magnéticos, con el fin de cotejar y comparar resultados entre ellas y definir en ambas magnetitas los posibles cambios en su naturaleza estructural, en condiciones ascendentes de temperatura.

La magnetita del mineral "normal" presentó dos reacciones exotérmicas en las siguientes temperaturas 375 ° C y 615 ° C, ambas reacciones corresponden a la oxidación normal de la magnetita, donde ésta se transforma gradualmente a hematita, oxidándose completamente alrededor de los 650 ° C, como se ilustra en la gráfica No. 8.

La magnetita del mineral "amorfo" reportó cuatro reacciones exotérmicas a: 360 ° C, 465 ° C, 635 ° C, 750 ° C, correspondiendo la primera y tercer reacción a la oxidación de la magnetita, la segunda y cuarta reacción, no están reportadas en las tablas de identificación, ver gráfica No.8

Con el objeto de identificar lo que se formó, en las reacciones exotérmicas ocurridas a estas temperaturas, se separaron fracciones de la muestra original de ambos minerales, las cuales fueron calcinadas a las temperaturas en que ocurrieron las reacciones. Los productos obtenidos se analizaron por Difracción de Rayos X, resultando en el caso de la magnetita del mineral "Normal" una oxidación gradual de la magnetita a hematita, ver gráfica 9.

La magnetita del mineral "amorfo" también se fue oxidando gradualmente, a la misma velocidad que la magnetita del mineral "Normal" y siguiendo un paralelismo en sus reacciones exotérmicas hasta los 375 ° C. A partir de los 465 ° C la oxidación de la magnetita es más lenta, por esta razón aparece a esta temperatura una reacción exotérmica. Partiendo de este punto se pierde el paralelismo de las reacciones exotérmicas de ambas magnetitas, ocurriendo en el caso de la magnetita del mineral "amorfo" una oxidación mas pausada, hasta una última reacción exotérmica por oxidación a los 750 ° C, concluyendo finalmente su transformación total a hematita a partir de los 750 ° C, ver gráficas Nos 8 y 9.

Los resultados hasta ahora obtenidos permiten distinguir diferentes estados de oxidación en la magnetita del mineral "amorfo", desconociendo la o las causas que las producen. Lo que explica la diferencia en la intensidad de las reflexiones por Difracción de Rayos X. Tratando de encontrar una explicación sobre éstas diferencias de oxidación, se sometieron las muestras de ambos tipos de mineral a un estudio por microsonda electrónica de barrido. Se obtuvieron por Energía Dispersiva de Rayos X, la composición química semicuantitativa de la magnetita del mineral "normal" y la magnetita del mineral "amorfo". Comparando ambos resultados se observó un contenido mayor de Fe en la magnetita del mineral "normal" del 70.96 %, decreciendo en el mineral "amorfo" a 68.56 %.

En este momento se procedió a analizar toda la información hasta ahora obtenida, llegando a la siguiente conclusión: la magnetita del mineral "normal", presenta un comportamiento característico de una magnetita común, sin embargo la magnetita del mineral "amorfo" presenta rasgos distintos; por ejemplo, la transformación total a hematita ocurre después de los 750 ° C, cuando en la magnetita del mineral "normal" ocurre alrededor de los 650 ° C.

Hasta este punto se interrumpe la investigación de la magnetita para continuar con el estudio de la clorita del mineral "normal" y del mineral "amorfo", que tiene como fin determinar la variedad de la clorita. La investigación se desarrolla de la misma manera que el de la magnetita, utilizando las mismas técnicas.

La clorita al igual que la magnetita, tiene una diferencia importante en el tamaño de grano. En la clorita del mineral "normal" el tamaño de las láminas se mide sin dificultad al microscopio de polarización con luz transmitida, mientras que en la clorita del mineral "amorfo" no es posible medirla por su tamaño criptocristalino.

La clorita de los minerales "normal" y "amorfo" concentradas en los productos no magnéticos, se sometieron a un estudio por difracción de rayos X, reportando lo siguiente:

- 1) El difractograma de la clorita del mineral "normal" presenta las reflexiones características de la clorita, es decir; los principales valores: $d = 7.18 \text{ \AA}$ (100 %), $d = 14.4 \text{ \AA}$ (30 %) y el valor $d = 3.57 \text{ \AA}$ (70 %), como se ilustra en la gráfica No.1.
- 2) El difractograma de la clorita del mineral "amorfo" presentó entre las principales reflexiones, los siguientes valores de reflexión: $d = 7.18 \text{ \AA}$ (100 %) y 3.57 \AA (85 %) ver gráfica No. 2.

Además de presentar ambas cloritas patrones de difracción diferentes, se distingue en el difractograma de la clorita del mineral "normal" una buena cristalinidad, mostrando un patrón de difracción de rayos x bien definido y los valores de reflexión típicos de la clorita. El caso contrario ocurre en el difractograma de la clorita del mineral "amorfo", donde se observa en el gráfico un bajo grado de cristalinidad.

Una vez concluidos los estudios de difracción de rayos x en las cloritas, se determina que la clorita del mineral "normal" presenta valores característicos de una clorita ferrosa. No así para la clorita del mineral "amorfo" la cual tiene valores de reflexión semejantes al caolín.

Carrol (1970) indica que la chamosita tipo caolín tiene resultados de rayos x y un modelo cristalográfico semejante a la caolinita. La chamosita tipo clorita tiene datos de rayos x y un patrón de calentamiento semejante o igual a la clorita típica, esto es; que la estructura tipo caolín colapsa alrededor de los $550 \text{ }^\circ\text{C}$, sin embargo la estructura de la clorita típica no se colapsa, solamente ocurre un cambio en la intensidad de las reflexiones de sus valores $d =$ en \AA , es decir; la intensidad del valor de la reflexión principal aparece más pequeña, con relación a un aumento en la intensidad de la reflexión secundaria.

Con el fin de corroborar lo dicho por Carrol (1970) se sometieron a calcinación los productos no magnéticos de ambos minerales, con alto contenido de clorita. La calcinación se realizó a $550 \text{ }^\circ\text{C}$ por una hora. Los resultados fueron los siguientes:

- 1) En el caso de la clorita del mineral "amorfo", se calcinó la muestra a esta temperatura y se corrió el producto por difracción de rayos x, la gráfica reporta un gráfico amorfo, como se ilustra en la gráfica No. 4. Con base en los resultados obtenidos, esta clorita se clasificó como una bertierina del politipo 1 b, ver gráfica No. 2.

- 2) En el caso de la clorita del mineral "Normal" ocurre un cambio en la intensidad de las reflexiones, es decir; aumenta la intensidad de la reflexión $d = 14 \text{ \AA}$, y decrece la intensidad del valor $d = 7 \text{ \AA}$, correspondiendo a una clorita típica con alto contenido, donde sus valores de reflexión se aproximan más a la clorita ferrosa variedad chamosita, ver gráfica No. 3.

Bailey (1991), hace énfasis sobre la aplicación del término bertierina diciendo que debe aplicarse a un "silicato rico en hierro de grano fino" con un acomodo estructural en placas 1:1, comúnmente presente en formaciones de hierro sedimentario no metamorfoseadas. Bailey explica que en el pasado este mineral solía llamarse "chamosita", pero que este nombre se aplica también a una clorita rica en hierro ferroso cuya localidad tipo esta en Chamson, Francia, por esta razón llama chamosita a esta clorita ferrosa y deja el término bertierina exclusivo para el mineral con reflexión de Rayos X, $d = 7 \text{ \AA}$ y un valor 1:1.

La bertierina del politipo 1 b ocurre por diagénesis, donde las condiciones de reducción prevalecieron (James, 1966) debido a la descomposición de materia orgánica. Por metamorfismo de bajo grado,

Con el fin de corroborar lo obtenido a través de la calcinación de las cloritas de ambos minerales, se procesaron estas muestras por termoanálisis: térmico diferencial y gravimétrico. Si es verdad que la bertierina del mineral "amorfo" tiene una estructura tipo caolín, al realizar esta prueba reportaría valores de deshidratación semejantes al caolín, confirmando un valor en la posición de las placas 1:1. Los resultados obtenidos fueron anómalos, para ambas cloritas, siendo éstos los siguientes:

- 1) Para la clorita del mineral "normal" una reacción exotérmica anormal a $495 \text{ }^\circ\text{C}$ es muy cercana al valor de una clorita típica, debida a la posible deshidratación del $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a Fe_2O_3 . Por difracción de rayos x se analizó un producto calcinado de ésta muestra a una temperatura de $495 \text{ }^\circ\text{C}$, observándose un aumento ligero en la intensidad del valor de reflexión $d = 14 \text{ \AA}$ y una disminución del valor $d = 7 \text{ \AA}$, a una temperatura de $550 \text{ }^\circ\text{C}$ se aprecia mejor esta diferencia de cambio en la intensidad de las reflexiones, ver gráfica de difracción de rayos x No. 3.
- 2) La clorita del mineral "amorfo" presentó dos reacciones exotérmicas anormales de la clorita a $360 \text{ }^\circ\text{C}$ y $495 \text{ }^\circ\text{C}$, por posible reacción de deshidratación del $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a Fe_2O_3 .
- 3) Así también la clorita del Mineral "Amorfo" presentó una reacción endotérmica larga asimétrica del caolín entre $430 \text{ }^\circ\text{C}$ y $480 \text{ }^\circ\text{C}$ por deshidratación, una reacción endotérmica larga asimétrica del caolín entre; $510 \text{ }^\circ\text{C}$ y $570 \text{ }^\circ\text{C}$ también por deshidratación y finalmente una reacción endotérmica larga del caolín a $980 \text{ }^\circ\text{C}$, por cambio estructural.

Para identificar los materiales que se están formando a estas temperaturas, se calcinó los productos no magnéticos con alto contenido de clorita del mineral "amorfo" a estas

temperaturas, los productos se sometieron a un análisis por difracción de rayos x, los resultados obtenidos son:

- 1) A 360 ° C; en la gráfica obtenida por difracción de rayos x, decrecen ligeramente los valores de reflexión de la clorita $d = 7.18 \text{ \AA}$ y $d = 3.56 \text{ \AA}$.
- 2) A 495 ° C, han decrecido fuertemente las intensidades de las reflexiones $d = 7.18 \text{ \AA}$ y $d = 3.56 \text{ \AA}$.
- 3) A 510 ° C y 570 ° C, desaparecen los valores de la reflexión $d = 7.18 \text{ \AA}$ y $d = 3.56 \text{ \AA}$, volviéndose la muestra amorfa.

Igual comportamiento tendría una muestra de caolín.

Con el objeto de observar similitudes ópticas entre ambas cloritas, que nos permitan diferenciarlas de otras cloritas, se prepararon láminas delgadas con el material molido de la muestra problema, sumergiendo ésta en aceite de inmersión con un índice de refracción conocido, las muestras así obtenidas fueron estudiadas al microscopio de polarización con luz transmitida, obteniendo sus propiedades ópticas.

Microscópicamente las cloritas de ambos tipos de mineral, presentan propiedades ópticas diferentes, coincidiendo únicamente en el índice de refracción. El índice de refracción es una de las propiedades ópticas más importantes para diferenciar los diferentes tipos de clorita, correspondiendo para ambas los valores: 1.64 a 1.65 n. La mayoría de las cloritas presentan índices de refracción menores a 1.60 n, solamente la clorita variedad proclorita (ripidolita), tiene índices de refracción entre 1.58 a 1.67 n, sin embargo sus valores de reflexión, **no concuerdan** con los valores de reflexión $d = \text{\AA}$ de difracción de rayos x.

Para identificar los niveles de sustitución iónica del Mg, Al por iones de Fe, se analizó la clorita de ambos minerales por medio de energía dispersiva de rayos x (EDS) en la microsonda electrónica de barrido, con el fin de obtener el análisis elemental, reportando lo siguiente:

La clorita del mineral "normal" presenta un contenido de Fe muy cercano a la sílice y una proporción menor de Al y Mg. En el caso de la clorita del mineral "amorfo" aumenta considerablemente el contenido de hierro y decrece significativamente el contenido de Si, Al y Mg, debido a una fuerte sustitución del Fe por un ión de Al y Mg, lo que se corrobora también en el análisis químico cuantitativo, como una disminución en el contenido de MgO y Al₂O₃ por un aumento de Fe, como FeO y Fe₂O₃ por sustitución iónica de estos por magnesio y aluminio respectivamente. Existe un margen de reemplazamiento de clorita al contacto con magnetita, lo que hace suponer que en este caso existe una sustitución mayor del hierro, lo que da a este margen un color café que difiere notablemente del verde oscuro característico de la bertierina.

Así también la clorita del mineral "amorfo" presenta en trazas, una mayor cantidad de Mn, Cr, Cd, Co y Ni con respecto a la clorita del mineral "normal".

Sobre la base de los resultados obtenidos por Difracción de Rayos X, Análisis Térmico Diferencial y Térmico gravimétrico, microscopía de polarización con luz transmitida y microsonda electrónica de barrido, se comprueba lo siguiente:

- 1) La clorita del mineral “normal” corresponde a una clorita ferrosa, clasificada como una chamosita.
- 2) La clorita del mineral “amorfo” se identificó como una clorita de la variedad bertierina, correspondiendo claramente a una clorita tipo caolín, es un mineral autígeno generalmente del polítipo 1 b, con una cantidad importante de FeO, tiene un color verde oscuro y un tamaño criptocristalino.

La información proporcionada por las técnicas aplicadas ha sido muy valiosa, ya que ha permitido distinguir diferencias marcadas entre la magnetita del mineral “normal” y la magnetita del mineral “amorfo”.

En este punto se resolvió que la investigación requería de aplicar técnicas que tuvieran una mayor resolución y permitieran obtener información mas allá de la misma estructura, quizá hasta un nivel atómico, con el fin de conocer las causas del comportamiento de oxidación lenta de la magnetita del mineral “amorfo”, llegando su oxidación total hasta los 750 ° C, así como su aparente menor contenido de hierro. Por esta razón se pensó en la Espectroscopia Mössbauer la cual ha encontrado numerosas aplicaciones en el estudio de los materiales, considerándose esta técnica viable para determinar los estados de oxidación del hierro, posibles diferencias y sus causas, así como sus efectos en la estructura. La aplicación de esta técnica tanto para la magnetita del mineral “normal” como para la magnetita del mineral “amorfo” y su análisis comparativo, ayudará a elucidar sobre las condiciones ambientales y genéticas que prevalecieron durante su formación. También se aplicará esta técnica para el estudio de la clorita.

Los estudios de espectrografía Mössbauer se realizaron sobre productos de concentrados magnéticos para ambos tipos de magnetita. Para el caso de las cloritas se utilizó un producto no magnético.

Las diferencias de comportamiento entre la magnetita del mineral “normal” y la magnetita del mineral “amorfo” pueden explicarse como sigue:

La magnetita del mineral del mineral “normal” presento un espectro normal, característico de una magnetita con dos estados de oxidación FeO y Fe₂O₃, sin embargo la magnetita del mineral “amorfo” revela un estado de oxidación para el FeO y dos estados de oxidación diferentes para el Fe⁺³, que indican el estado de oxidación del Fe₂O₃ y un estado de oxidación compartido y fluctuante para el Fe(OH)₃. Este tipo de espectro también es característico de moléculas de Fe₂O₃ de tamaños ultrafinos caracterizadas por presentar una propiedad magnética de dominio simple ó de partículas superparamagnéticas.

La presencia de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ permite considerar la posibilidad de tratarse de una sustitución iónica del agua de cristalización de la bertierina por el Fe^{+3} de la magnetita, formando una patina ó margen de alteración, anteriormente observada por microscopia de polarización y por microsonda electrónica de barrido pero a una escala mayor, el alto grado de resolución de la técnica Mössbauer nos permite vislumbrar el tamaño ultrafino de la relación bertierina-magnetita.

Las características texturales de la magnetita, granos muy finos y su asociación con bertierina, aunadas a las condiciones de oxidación y estructura reveladas por la espectroscopia Mössbauer, permiten vislumbrar que el ambiente geológico y geoquímico prevaleciente durante la formación del mineral “amorfo”, incluía un medio activo y acuoso que facilitó el intercambio iónico del fierro con soluciones conteniendo magnesio y aluminio, en un medio congruente con un ciclo geoquímico atípico atribuible al mineral “amorfo”. Apoyando esta idea está el caso específico de la bertierina que de acuerdo con Carrol (1970), establece que es un mineral autógeno.

Esto explicaría el tamaño tan fino de la magnetita producido por un enfriamiento rápido, así como el transporte en un medio acuoso de la misma a través de la bertierina, que disgregó y redondeó los granos.

Una técnica reciente y novedosa es la Microscopía de Fuerza Magnética, se ha usado para la obtención de imágenes de alta resolución (resolución espacial de 10 nm) de estructuras de dominios magnéticos, esta técnica tiene amplias posibilidades de proporcionar información muy valiosa en cuanto a posibles semejanzas y diferencias en el nivel de dominios magnéticos, en los minerales de fierro “Normal” y “Amorfo”, y corroborar lo dicho por espectrografía Mössbauer.

Los resultados obtenidos por Microscopía de Fuerza Magnética reportan lo siguiente:

La imagen del mineral “Normal” muestra rasgos que sugieren la presencia de una magnetización en los dominios magnéticos normal a la superficie de la muestra. Igual se infiere, sobre la base de la forma que presentan dichos dominios magnéticos que estos corresponden a granos con dominios pseudosimples a pequeños multi – dominios.

En la imagen del mineral “Amorfo” se pueden observar prácticamente las mismas características que en el mineral “Normal”, esto es; el mismo tipo de magnetización en los dominios magnéticos perpendicular a la superficie de la muestra, y la correspondencia con dominios pseudosimples y multi – dominios (Poskhil y Moskowitz, 1997). Sin embargo, hay tendencia de los dominios magnéticos a agrandarse, pasando a predominar los granos con multi – dominios, además se observa una falta de claridad en la imagen (estas son más difusas).

La física de los granos con comportamiento pseudosimple y multi – dominio es de gran interés en paleomagnetismo, porque muchos granos de óxidos ferrimagnéticos son demasiado grandes para estar en equilibrio de dominio – simple. Estos tamaños de grano han sido estimados sobre la base de estudios de propiedades magnéticas en el mineral de Peña Colorada (Alva Valdivia et. al., 1996, 2000).

No obstante tales granos contienen dominios magnéticos, que aún portan una magnetización remanente natural estable. Excepto por las partículas de tamaños más pequeños debajo de 0.1 micrómetro de dominio – simple casi uniformemente magnetizados, la magnetización remanente natural es portada por las partículas que contienen estructuras micromagnéticas no – uniformemente magnetizadas, pseudosimples o pequeños multi – dominios. Estas estructuras afectan el origen de la magnetización remanente natural y la fidelidad del registro paleomagnético.

Es importante destacar que los granos muy finos de magnetita es decir debajo de un micrómetro (0.05 micrómetros), muestran propiedades magnéticas de dominio simple, y se consideran como un tamaño crítico donde sus propiedades magnéticas pueden verse afectadas. Algunos sólidos formados por partículas muy finas, presentan propiedades superparamagnéticas, se caracterizan por tener un comportamiento especial de los granos ferrimagnéticos que bajo la presencia de un campo adquieren una gran magnetización remanente pero muy inestable de manera similar a lo que sucede en las sustancias paramagnéticas, desaparece rápidamente en cuanto se elimina el campo magnetizador. Estos materiales se comportan en un estado intermedio entre paramagnéticos y ferromagnéticos, llama la atención el tamaño fino de la magnetita del mineral “Amorfo” y el tipo de espectro Mössbauer, característico de una sustancia paramagnética.

Es importante a futuro continuar en el estudio de la magnetita del mineral “normal” y mineral “amorfo” a través de la Microscopía de Fuerza Magnética, con el fin de profundizar más en el conocimiento de sus dominios magnéticos y como se comportan estos en función del tamaño de grano, en vista de que el tamaño de grano es una característica distintiva del mineral “amorfo”, el conocimiento del tipo de estructuras micromagnéticas predominantes ayudara a los estudios paleomagnéticos.

La caracterización mineralógica y fisicoquímica aplicada al procesamiento de minerales aportó un conocimiento muy amplio e importante, como apoyo a la investigación y experimentación metalúrgica, lo que permitió optimizar el beneficio de la magnetita.

Para tal fin, una vez que se concluyo la caracterización de la mena del mineral “normal” y el mineral “amorfo”, se prepararon y obtuvieron productos metalúrgicos a partir de una secuencia de tratamiento que se aplicó a la muestra original (cabeza) a través de un proceso metalúrgico que reprodujo en laboratorio, las condiciones de operación estipuladas en la planta matriz concentradora del mineral magnético, localizada en Minatitlán, Colima, se muestra en el diagrama de flujo de la figura No.8.

Para conocer el comportamiento de liberación de la magnetita durante la molienda y concentración magnética se obtuvieron 6 productos de concentración magnética, tanto del mineral “normal” como del mineral “amorfo” a diferentes granulometrías, clasificados a través de ciclones en un equipo llamado Cyclosizer.

Los productos magnéticos fueron analizados al microscopio de polarización con luz transmitida, con el fin de conocer en ambos tipos de mineral, los parámetros que sigue la magnetita en su proceso de liberación durante la molienda, conocer las características de tamaño y forma de las partículas mixtas de magnetita – ganga, el tamaño y grado de liberación de la magnetita, relación textural y asociaciones mineralógicas que guardan las partículas de magnetita con la ganga.

El estudio de liberación de la magnetita en el mineral “normal”, mostró un grado alto de liberación a partir de partículas de magnetita menores a 56 micrómetros, manteniéndose constante el grado de liberación en un 99 %. En los productos se observan partículas de magnetita libres de ganga, estas partículas se rompen durante la molienda siguiendo los planos de foliación de la magnetita, como se ilustran en las fotomicrografías 29 a, 29 b y 29 c.

El estudio de liberación de la magnetita del mineral “Amorfo”, reportó una liberación baja a tamaños menores de 56 micrómetros, aumentando aceptablemente en los productos con partículas menores a 10 micrómetros, pero en ningún momento, el grado de liberación de la magnetita se asemeja a los altos valores reportados en el mineral “Normal”.

En los productos se observan partículas mixtas de magnetita – clorita (bertierina) y magnetita – calcita. Estas partículas tienen generalmente formas que asemejan a un “garapiñado”, con bordes corroídos por reacción con la ganga, donde la magnetita forma un intercrecimiento intergranular con la clorita y ó calcita, como se observa en las fotomicrografías 30a, 30b, 30c.

Los productos de concentrados magnéticos mostraron tanto para el mineral “normal” como “amorfo” una pequeña cantidad en partes ppm de Cr, Mn, Ni y Co, lo que sugiere que se encuentra en la estructura cristalina de ambas magnetitas. Se detectaron también pequeñas cantidades en ppm de Cu, Pb, Zn y As, que deben venir en forma de sulfuros. Otros elementos también en proporciones de ppm son: Ba, Be, Bi, Sr y W.

En los productos de concentrados No magnéticos predominó una cantidad pequeña en ppm de Mn, en el producto no magnético del mineral “amorfo” también destacaron cantidades pequeñas en ppm de: Cr, Ni, Cu, Zn, Co.

La diferencia en el comportamiento de liberación de la magnetita, en respuesta a los mecanismos de molienda y concentración magnética, del mineral “normal” y del mineral “amorfo” se deben básicamente a las siguientes características de la magnetita:

| CARACTERÍSTICAS DE LA MAGNETITA | MINERAL "NORMAL" | MINERAL "AMORFO" |
|--|---|---|
| Contenido de hierro en concentrado magnético | 70.68 % | 64.66 % |
| Forma de grano | Cristales bien desarrollados | Granos redondeados |
| Tamaño de grano | Cristales de hasta 7 mm | Granos con un tamaño menor a u micrómetro |
| Asociación mineralógica con la ganga principal | Feldespatos, piroxenos, hornblenda, granate, calcita, pirita, clorita y epidota | Clorita (bertierina), calcita, pirita. |
| Relaciones texturales con la ganga | Masiva y diseminada | Intercrecimiento intergranular |
| Tipo de oxidación obtenida por ATD - ATG | Normal, Típica de la magnetita. | Normal hasta los 360 ° C, a partir de los 465 ° C se hace lenta la oxidación. |
| Temperaturas de oxidación | 375 ° C, 615 ° C, | 360 ° C, 465 ° C, 636 ° C y 750 ° C |
| Dominios magnéticos | Normal a la superficie de la muestra, granos con pseudosimples a pequeños multi-dominios. | Idem. a mineral "Normal" pero hay tendencia de los dominios a agrandarse, predominando los granos con multi-dominios. |
| Presencia de elementos traza | V, Bi, W, Sn.- más predominante Co, Cr, Ni, Mn, Cd, Pb, Zn, Cu, As, Ba, Mo, Be, Sr.- menos predominantes | Co, Cr, Ni, Mn, Cd, Pb, Zn, Cu, As, Ba, Mo, Be, .- más predominantes V, Bi, Sr, W, Sn.- menos predominante |

Tabla No. 3

Características de la magnetita que influyen en su liberación con respecto a la ganga

10. 1. PERSPECTIVA METALOGENÉTICA.

El emplazamiento diorítico en rocas de composición andesítica a causa de un metamorfismo de contacto (pirometasomatismo), dio lugar a una fuerte recrystalización de las plagioclasas que constituyeron la roca original (protolito andesítico), transformando la roca original en un hornfels feldespático, con una aureola de alteración que va de facies de piroxeno corneana, de alta temperatura y presión moderada a facies de epidota – hornblenda de moderada temperatura a presión baja. Al mismo tiempo que ocurre el pirometasomatismo se inyecta magnetita, a través de los planos de debilidad de las plagioclasas, creciendo cristales euedrales bien desarrollados o subedrales, quedando homogéneamente diseminados en el hornfels.

Los ferromagnesianos que constituyen la roca son principalmente piroxenos, generalmente muy abundantes de textura granular de la variedad augita e hiperstena y en algunos casos hornblenda, estos se alteran a epidota. Las plagioclasas también sufren una alteración incipiente a sericita y minerales arcillosos, posteriormente ocurre paralelamente a la alteración un reemplazamiento parcial o total de la roca hornsfélsica por chamosita. Estas alteraciones marcan el inicio del hidrotermalismo en el yacimiento.

En un evento posterior, ocurre un fuerte fracturamiento de la roca hornsfélsica, parcialmente alterada, lo que permite y facilita nuevamente el ascenso, circulación y depositación a través de fracturas de la mineralización hidrotermal metálica de magnetita en forma masiva, la cual se deposita en vetas con espesores hasta de 10 cm. que cortan a la roca encajonante (hornfels feldespático) en varias direcciones, dando a esta roca un aspecto brechado. En la masa masiva de magnetita se llegan a reconocer cristales euedrales bien desarrollados, alojados en los espacios abiertos de las vetas, estos están sanos sus bordes son rectos sin huellas de corrosión, algunos de ellos llegan a medir hasta 7 mm.

A estas dos formas de presentación de la magnetita “diseminada” y “masiva”, que responden muy bien al tratamiento de separación y concentración magnética, durante el beneficio metalúrgico, se les dio el nombre de **Mineral “Normal”**.

Al mismo tiempo que se deposita la magnetita masiva hidrotermal del mineral “normal”, se deposita de igual forma magnetita en un ambiente propiamente acuoso, posiblemente en mares someros., que se diferencia de la magnetita del mineral “normal” por presentarse en forma de agregados granulares de grano fino a muy fino, con tamaños que varían en promedio, entre menos de 1 micrómetro a 56 micrómetros. Los granos de magnetita no tienen una forma bien desarrollada, más bien son granos con bordes subredondeados, subangulosos y fuertemente corroídos, contenidos y homogéneamente distribuidos en la clorita (bertierina), a este tipo de mineralización se le dio el nombre de **Mineral “Amorfo”**.

Continuando con la etapa hidrotermal, enseguida del emplazamiento de la magnetita se depositó casi simultáneamente; calcita – cuarzo – apatito. Posteriormente llegan los sulfuros, con la depositación inicial de pirita a través de fracturas en la magnetita, cuarzo y calcita, continuando marmatita con exsoluciones de calcopirita, la calcopirita también forma vetas en la pirita, después galena y pirrotita, donde ambas rellenan huecos en la calcopirita y pirita. Finalmente la magnetita y calcopirita son reemplazadas por escasa hematita y covelita respectivamente. En este punto termina la depositación de la mineralización hidrotermal en el mineral “normal”.

No así en el mineral “Amorfo”, en el cual ocurre como etapa final del hidrotermalismo la emanación en un medio acuoso de soluciones ricas en Fe O, Si O₂ Al₂O₃ y MgO que al depositarse en un medio acuoso, da lugar a la presipitación de la bertierina, la cual se forma diagenéticamente en un ambiente de mares someros, donde las condiciones de reducción con un pH de 7 prevalecen por la descomposición de materia orgánica. Es importante destacar que en todas las muestras de bertierina analizadas por microsonda electrónica de barrido se detectó fósforo.

Las soluciones que precipitaran como bertierina penetran a través de los espacios intergranulares existentes entre los granos de magnetita, separando éstos de las semimasas granulares y los transporta en un medio acuoso. Esta removilización provoca que los granos de magnetita giren sobre su eje y se redondeen, así también sufren un ataque químico alrededor de sus bordes al contacto con la bertierina, formando un margen de reemplazamiento rico en FeO y pobre MgO y Al₂O₃, finalmente los granos de magnetita se distribuyen homogéneamente en la bertierina, formando una textura de intercrecimiento intergranular, característica típica del mineral “amorfo”.

En la zona de contacto entre el mineral “amorfo” y “normal”, se observa claramente como la bertierina penetra a través de las fracturas preexistentes en los relictos fuertemente alterados de la roca hornfésica. Las fracturas están ocupadas por magnetita granular, de tal forma que la bertierina ocupa con fuerza los espacios intergranulares entre los granos de magnetita, llegando a separarlos y llevarlos en suspensión, en algunos casos la bertierina reemplaza totalmente a los remanentes de la roca hornfésica. Los tamaños de la magnetita característica de esta zona varían de 100 a 500 micrómetros. La roca fuertemente alterada y reemplazada por chamosita, queda finalmente en remanentes aislados en la masa de magnetita - bertierina. Este tipo de presentación de la mineralización sugiere ser un contacto entre el mineral “normal” y el mineral “amorfo”. La magnetita perteneciente a esta zona tiene una recuperación en los concentrados magnéticos favorable, pero no tan prometedores como los del mineral “normal”.

La coexistencia de una zona de mineral “normal” con una zona de mineral “amorfo” y una zona de contacto entre ambos minerales es indicativa de un origen común de tipo hidrotermal, pero con una evolución geoquímica diferente.

11. REFERENCIAS

Alva – Valdivia, L. M. Urrutia – Fucugauchi, J., Goguitchaichvili, A., and Dunlop, D., 2000. *Magnetic mineralogy and properties of the Peña Colorada iron ore deposit, Guerrero Terrane: implications for magnetic modeling*. J. South Am. Earth Sci., 13, 415 – 428.

Alva – Valdivia, L. M. Dunlop, D. and Urrutia – Fucugauchi, J., 1996, *Rock magnetic properties of iron ores and hosts rocks from the Peña Colorada mining district, weaten Mexico*. J. Applied Geophys., 36, 105 – 122.

Consortio Minero Benito Juárez, Peña Colorada, 1988, *Estudio de Caracterización Química, Petrográfica y Minerográfica de muestras de mineral marcadas como; "Chinforinaso Normal" y "Chinforinaso Amorfo"*, solicitado por: el Ing. Alberto Sandoval e Ing. Miguel Ramos, realizado por: Ma. de la Luz Rivas Sánchez, Informe No. 90, Comisión de Fomento Minero (C. F. M.) Centro Experimental México (C. E. M.).

Consortio Minero Benito Juarez "Peña Colorada", 1989, *Informe de avance del Estudio Metalúrgico con las muestras denominadas "Normal" y "Amorfo"*, solicitado por; Ing. Miguel Ramos, realizado por: R. Gonzáles L. y R. Nieto G., Informe No. 7, C. F. M., Centro Experimental Tecamachalco.

Consortio Minero Benito Juárez, Peña Colorada, 1991, *Caracterización Química y Mineralógica de muestras de mineral de fierro denominadas: "Normal", "Amorfo Noble", "Amorfo 4", "Amorfo 3" y "Amorfo muy malo"* solicitado por el Ing. Othón Colín, Informe No. 14, realizado por: Ma. de la Luz Rivas Sánchez, Comisión de Fomento Mnero (C. F. M.) Centro Experimental Tecamachalco.

Consortio Minero Benito Juárez, Peña Colorada, 1991, *Estudio por Microscopía Óptica de cuatro muestras de productos magnéticos con contenido de sulfuros*, solicitado por el Ing. Gerardo Altamira Muratalla e Ing. Jesús Enciso G., realizado por: Ma. de la Luz Rivas Sánchez, Informe No. 20, C. F. M., Centro Experimental México.

Consortio Minero Benito Juarez "Peña Colorada", 1991, *Estudios de Liberación de magnetita*, solicitado por: Jesús Enciso G., realizado por: Ma. de la Luz Rivas Sánchez, Informe No. 26, C. F. M., Centro Experimental México.

Consortio Minero Benito Juarez "Peña Colorada", 1991, *Estudios de Liberación de magnetita*, solicitado por; Ing. Armando Meraz, realizado por: Ma. de la Luz Rivas Sánchez, Informe No. 27, C. F. M., Centro Experimental México.

Consortio Minero Benito Juarez "Peña Colorada", 1999, *Estudios de Liberación de magnetita*, solicitado por; C. E. O, realizado por: Ma. de la Luz Rivas Sánchez, Consejo de Recursos Minerales (C. R. M.), Centro Experimental Tecamachalco.

Bailey Sw., 1991, *Structures and composition of other trioctahedral 1:1 phyllosilicates*, p.179 – 181.

Craig J. R. And Vaughan D. J., 1981, *Ore microscopy and ore petrography*, John Wiley & Sons.

Dana E. S. y Ford W. E., 1975, *Tratado de mineralogía*, Editorial Continental, S. A., 19 - 580.

Doroty Carrol, 1970, *Clay Minerals: A guide to their X – ray identification*, The Geological Society of America, Special paper 126, 7 – 36.

Deer W. A., Howie R. A. and Zussman J., 1962, *Rock – Forming Minerals. Vol. 5 Non – Silicates*, John Wiley and Sons Inc., 62 – 124.

Deer W. A., Howie R. A. and Zussman J., 1993, *An Introduction to the Rock – Forming Minerals*, Longman Scientific & Technical, 279 – 384, 532 – 583.

Deer W. A., Howie R. A. and Zussman J., 1992, *The Rock – Forming Minerals*, Longman Scientific & Technical, 558 – 568, 334, 332 – 343.

Folk R., 1969, *Petrología de las rocas sedimentarias*, traducion de Schmiter, Instituto de Geología de la U. N. A. M.

Garrels R, and Christ Ch., 1965, *Solutions, Minerals, and Equilibria*,Freeman, Cooper & Company, 172 –385.

Greensmith J. T., 1971, *Sedimentary Rocks*, This edition George Allen and Unwin Ltd.

Hagni R. D., 1982, *Process Mineralogy II, Aplications in Metallurgy, Ceramics, and Geology*, The Metallurgical Society of AIME.

Harrison R. J. and Putnis A., 1999, *The magnetic properties and crystal chemistry of oxide spinel solid solutions*, Surveys in Geophysics, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.

Hausen D. M. And Park W. C., 1981, *Process Mineralogy, Extractive Metallurgy, Mineral Exploration, Energy Resources*, The Metallurgical Society of AIME.

Helmut G. F., 1978, *Petrogénesis de rocas metamórficas*, H. Blume Ediciones, traducción de Casquet C. Y Peinado M.

Henrich E. Wm., 1972, *Microscopic Petrography*, McGraw – Hill book Company.

Henrich E. Wm., 1965, *Microscopic identification of minerals*, McGraw – Hill book Company.

- Hokes R. And Andrews D. H., 1974, *Química Elemental*, Edit. Limusa.
- Levinson A. A., 1974, *Introduction to Exploration Geochemistry*, Applied Publishing Ltd., 39 – 378.
- Hunt Chris, 1992, *Mössbauer: Marvel – ous Measurements of Magnetic Minerals*, The IRM Quarterly, Vol. 2, No. 3, Institute for Rock Magnetism.
- Hus J. J., Stiers W., 1987, *The magnetic properties of an ironcrust in SE Belgium and synthetic Mn – substituted goethites*, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 46, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam – Printed in Netherlands, 247 – 258.
- Kesler S. E., 1994, *Mineral Resources Economics and the Environment*. Mcmillan College Publishing.
- Juteau T., Maury R., 1999, *The oceanic crust, from accretion to mantle recycling*, Springer – Praxis series in Geophysics.
- Laird J., Bailey, 1991, *Hydrous Phyllosilicates*, *MSA*, Rev. Mineral, 19; 405 – 453.
- Lopez – Ramos E. 1979, *Geología de México*, tomo II y tomo III.
- Lukas Zürcher, 1994, *Paragenesis, Elemental Distribution, and Stable Isotopes at the Peña Colorada Iron Skarn, Colima, México*, *In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science*, University of Arizona, 1 – 47.
- Mackenzie R. C., 1957, *The Differential Thermal investigation of clays*, The Central Press, Belmont Street, Aberdeen.
- Megarejo Carles, 1997, *Atlas de Asociaciones minerales en lámina delgada*, p. 569, 574, Editorial Edicions Universitat de Barcelona.
- Martínez-Serrano R., Dubois M., 1998, *Clay and Clay Minerals*, Vol. 46, No. 6, p. 615 – 628.
- Morán- Centeno, Tolson G., Martínez-Serrano R., Martiny B., SCAF P., Silva-Romo G., Macías-Romo C. Alba-Aldave L., Hernández-Bernal M. S., Solís-Pichardo G. N., 1999, *Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, México, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt*, p. 513 – 535.
- M. Bateman, 1978, *Yacimientos Minerales de rendimiento económico*, traducción de Amorós J. L., Ediciones Omega, S. A.
- Milovski A. V. Y Kónonov O. V., 1988, *Mineralogía*, Editorial Mir Moscú.

- Mohapatra BK, Rath PC, Sahoo RK, 1995, *Chromiferous chamosite from Pokphur magnetite boby, Nagaland, India*. *Curr Sci India* 68: (10), may, p. 1036-1039.
- M.N. Greenwood, T:C: Gibb, 1991, *Mossbauer Spectroscopy*, Chapman and Hall LTD. London.
- Mucke A., 2000, *Environmental conditions in the Late Cretaceous African Tethys: conclusions from a microscopic-microchemical study of ooidal ironstones from Egypt, Sudan and Nigeria*, *J Afr. Earth sci* 30: (1) jan. 25-46.
- Mucke A., 1999, *The significance of chorites as a genetic indicator in ore deposits exemplified by the magnetite ores from the Desna group (Silesicum, Czech Republic)*, *Chem Erde-Geochem* 59: (3), Sep. p. 233-242.
- Mundepi A. K., Bagati TN, 1995, *Mineralogy and genesis of ironstone ooids, Subathu formation (Eocene) in the Valley, Garhwal Hamalaya*, *J Geol Soc. India* 46: (6) Dec. P. 625-630.
- Nava N., Jacobs J. P., García A., Rosink J. J. W. M., Valenzuela M. A., Van Ijzendoorn, Brongersma H. H., *Surface and bulk cation distribution of the spinel system $Zn_xMg_{1-x}Fe_2O_4$* , 1996, *J. Radioanal. Nucl. Chem., Letters*, Jointly published by Elsevier Science S. A. Lausanne and Akadémiai, Budapest, 212 (6), 431 – 443.
- Offtler R., D. J: Whitford, 1992, *Wall-Rck alteración and Metamorphism of a Vocanic-Hosted Massive Sulfide deposit at Que River, Tasmania: Petrology and Mineralogy*, *Economic Geology*, Vol. 87, pp. 686 - 705.
- Pcot P., Johan Z., 1977, *Atlas des Mineraux Metalliques*, Memoires du bureau de Recherches Géologiques et Minières, No. 90.
- Park, Ch. F. Jr., MacDiarmid R. A., 1970, *Ore Deposits*, W. H. Feeman and Company.
- Pokhil, T. G., and Moskowita, B. M., 1997. *Magnetic domains ans domain wall in pseudo – simple – domain magnetite studied with magnnetic force microscopy*. *J. Geophys. Res.* 102, 22681 – 22694.
- Proksh, R. B., Foss., S., adn Dahlberg, E. D., 1994. *High resolution magnetic force microscopy of domain wall fine structures*, *IEEE Trans. Magn.*, MAG – 30, 4467 – 4472.
- Proksh, R. B., Skidmoore, G. D., Dahlberg, E. D., Foss., S., Schmidt, J. J., and Merton C., 1996. *Quantitative magnetic field measurements with the magnetic force microscope*. *Appl. Phys. Lett.*
- Park Ch. Jr. And MacDiarmid, 1981, *Yacimientos Minerales*, Ediciones Omega, S.A., 12 – 420.

- Sc. C., Blazek A., *Thermal Analysis*, Van Nostrand Reinhold Company London.
- Schmitter – Villada E. y Martín del Campo R., 1980, *Glosario de Especies Minerales*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
- Selected Powder Diffraction data for Minerals, 1974, Data book, Joint Committee on Powder Diffraction Standards.
- Shuey R. T. , 1975, *Semiconducting ore minerals*, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Simpson B., 1969, *Rocks and Minerals*, Pergamon Press.
- Sydney – Avner H., 1988, *Introducción a la Metalurgia Física*, traducción de Estrada J. I. Mc. Graw – Hill.
- Solheid P. A., 1998, *Mössbauer Revisited*, The IRM Quarterly, Vol. 8, No. 3, Institute for rock Magnetism, 1, 6 – 7.
- Smykatz W., Kloos, 1974, *Differential Thermal Analysis*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg New York, 37 a 52.
- Sturges – Bailey, 1988, *Hydrous Phyllosilicates (exclusive of micas)*, Reviews in Mineralogy, Volume 19, Mineralogical Society of America.
- Tracy, R. J., Blatt H., *Petrology*, 1999, W. H. Freeman and Comoany, N. Y..
- Turner F., Verhoogen J, 1963, *Petrología Ignea y Metamórfica*, traducción de Fúster, Ediciones Omega, S. A.
- Vértes A., Korecz L. and Buerger K., 1979, *Mössbauer Spectroscopy*, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Wiewiora A. Wilamowski A, Lacka B, et al. 1998, *Chamosite from oolitic ironstones: The necessity of a combined XRD-EDX approach*, Can Mineral 36: Part 6 dec. P. 1547-1557.
- Williams, W., Hoffmann, V., Heider, F., Goddenhenrich, T., and Heiden, C., 1992. *Magnetic force microscopy imaging of domain walls in magnetite*. *Geophys. J. Int.*, 111, 417 – 423.
- Xu HF, Veblen DR, 1996, *Interstratification and other reaction microstructures in the chlorite-berthierine series*, *Contrib. Mineral Petrology* 124: (3-4) aug. P. 291-301.