

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid

**CARACTERIZACIÓN DE MENAS
MEDIANTE ANÁLISIS DIGITAL DE
IMAGEN:**

**Investigación y diseño de un sistema experto aplicable a
problemas mineros**

TESIS DOCTORAL

Edgar Raúl Berrezueta Alvarado
Ingeniero Geólogo

2004

**Departamento de Ingeniería Geológica
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid**

**CARACTERIZACIÓN DE MENAS
MEDIANTE ANÁLISIS DIGITAL DE
IMAGEN:**

**Investigación y diseño de un sistema experto aplicable a
problemas mineros**

**Edgar Raúl Berrezueta Alvarado
Ingeniero Geólogo**

**Director: Ricardo Castroviejo Bolívar
Dr. Ingeniero de Minas**

2004



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad
Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 2004.

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ____ de _____
de 2004 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A MariJose y Aurora

AGRADECIMIENTOS

Quiero dejar constancia de mi agradecimiento a todas las personas e instituciones que de una u otra forma han colaborado para que esta Tesis Doctoral haya sido realizada, en concreto:

Al Dr. Ricardo Castroviejo Bolívar, Catedrático de Petrología de la Universidad Politécnica de Madrid por la dirección de la misma y su inestimable asesoramiento en cada una de las etapas de investigación realizadas.

A los profesores e investigadores de la ETSI Minas de Madrid y en especial a los doctores José Antonio Espí y Alfonso Maldonado Zamora por su constante ánimo y apoyo para que la Tesis llegue a buen fin; a los amigos y compañeros ALFA como Raúl, Egor, Pepa, Juan, Jorge.

A los investigadores del IGME y en especial al Dr. Alejandro Bel-Lan, Juan Locutura y Concepción Fernández por su ayuda en el suministro de patrones de reflectancia y probetas pulidas de referencia.

A mi Universidad de origen, la ESPOL (Ecuador), por su auspicio y confianza y en particular al Dr Paúl Carrión por su colaboración como colega y amigo.

A la ETSIM de Madrid por su acogida como becario y por permitirme utilizar sus laboratorios y equipos científicos, básicos en la consecución de los datos experimentales.

Por supuesto, a Marijose, mi mujer y al resto de mi familia (Ecuador y España), por su inestimable ayuda y apoyo durante estos tres años que he tardado en completar este trabajo.

El trabajo realizado en la UPM ha sido posible mediante la cofinanciación de los Proyectos GR92-0135, UE95-0007 y UE98-0027 del Ministerio de Educación y Cultura de España (MEC), el apoyo de los programas ALFA/UE (C.T. ALR/B73011/94.04-6.0025.9) y CYTED (Subprograma XIII - Tecnología Mineral, Red XIII-B: Metales Preciosos).

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XIII

DOCUMENTO N° 1 MEMORIA

I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 PLANTEAMIENTOS GENERALES.....	1
I.2 DEFINICIÓN DEL TEMA.....	3
I.3 OBJETIVOS Y ALCANCE.....	5
I.4 EXPOSICIÓN Y PLANTEAMIENTO DE TRABAJO	7
II. ESTADO DEL ARTE	11
II.1 MICROSCOPIA DE REFLEXIÓN (MR) EN MINERALOGÍA.....	11
II.1.1 <i>Introducción</i>	11
II.1.2 <i>Propiedades Ópticas Cualitativas de los Minerales</i>	13
II.1.3 <i>Propiedades Ópticas Cuantitativas de los Minerales</i>	19
II.1.4 <i>Avances en la Cuantificación de Propiedades Ópticas.....</i>	21
II.1.5 <i>Sistemática de Identificación.....</i>	23
II.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ANÁLISIS DE IMAGEN (ADI) 27	
II.2.1 <i>Introducción</i>	27
II.2.2 <i>Fundamentos del Color.</i>	29
II.2.3 <i>Modelos de Representación del Color</i>	32
II.2.4 <i>Antecedentes del Procesamiento y Análisis de Imagen</i>	38
II.2.5 <i>Elementos del Equipo de Análisis Digital de Imagen</i>	40
II.2.6 <i>Secuencia del Proceso y Análisis de Imágenes.</i>	51
II.3 APLICACIÓN DEL AI EN LA CARACTERIZACIÓN DE MENAS... 57	
II.3.1 <i>Introducción</i>	57
II.3.3 <i>Enfoques del ADI en la caracterización de menas metálicas.....</i>	58
II.3.4 <i>Aplicación el ADI en Petrografía y Mineralogía.</i>	61

III. METODOLOGÍA DE TRABAJO	63
III.1 INTRODUCCIÓN.....	63
III.2 METODOLOGÍA GENERAL	65
III.2.1 <i>Clasificación de Los Principales Yacimientos Minerales.</i>	66
III.2.2 <i>Reconocimiento de los Minerales presentes en las Probetas Pulidas</i>	68
III.2.3 <i>Consecución de Condiciones Estables y Reproducibles</i>	71
III.3 METODOLOGÍA ESPECÍFICA	81
III.3.1 <i>Adquisición de las Imágenes</i>	82
III.3.2 <i>Tratamiento de las Imágenes</i>	83
III.3.3 <i>Caracterización por ADI de los minerales y tratamiento estadístico</i>	84
III.3.4 <i>Segmentación y validación de resultados</i>	89
IV. PROCESO EXPERIMENTAL.....	91
IV.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS YACIMIENTOS MINERALES	91
IV.1.1 <i>Introducción.....</i>	91
IV.1.2 <i>Clasificación y Descripción de los principales Depósitos Minerales</i>	95
IV.2 ESTUDIO MINERALOGICO DE LAS PROBETAS PULIDAS.....	99
IV.2.1 <i>Introducción.....</i>	99
IV.2.2 <i>Selección de minerales a caracterizar por ADI</i>	100
IV.3 PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DE ADI	107
IV.3.1 <i>Introducción.....</i>	107
IV.3.2 <i>Deriva Temporal</i>	108
IV.3.3 <i>Ruido.....</i>	111
IV.3.4 <i>Calibración del Color. Referencia para el Blanco</i>	117
IV.3.5 <i>Deriva Espacial.....</i>	120
IV.3.6 <i>Calibración Geométrica.....</i>	125
IV.4 PROCESO Y ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES	127
IV.4.1 <i>Adquisición de las Imágenes.....</i>	127
IV.4.2 <i>Tratamiento de las Imágenes</i>	131
IV.4.3 <i>Caracterización de las fases minerales mediante ADI</i>	135
IV.4.4. <i>Presentación de resultados de caracterización mediante ADI.</i>	138
IV.5. SEGMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	201
IV.5.1 <i>Introducción.....</i>	201
IV.5.2 <i>Relación Reflectancia - NG.....</i>	201
IV.5.3 <i>Segmentación de fases minerales</i>	208
IV.5.3 <i>Validación de los rangos de segmentación.....</i>	211
IV.6 EL SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN POR ADI	221
IV.6.1 <i>Introducción.....</i>	221
IV.6.2 <i>Funcionamiento del sistema de identificación por ADI.....</i>	221

IV.7. APLICACIONES DEL ADI A PROBLEMAS MINEROS.....	231
IV.7.1 <i>Estudio por ADI de las menas Auríferas "Nueva Esperanza" Colombia.....</i>	231
IV.7.2 <i>Estudio por ADI de las menas de Cobre "El Roble". Colombia.....</i>	245
IV.7.3 <i>Granulometría y Morfometría del Platino.....</i>	255
IV.7.4 <i>Composición modal de la Marmatita (Mena Marmato)</i>	261

V CONCLUSIONES 265

V.1 CONCLUSIONES METODOLÓGICAS	265
---	-----

V.2 CONCLUSIONES DE RESULTADOS	267
---	-----

V.3 APORTACIONES	269
---------------------------	-----

V.4 NUEVAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	269
--------------------------------------	-----

VI BIBLIOGRAFÍA 271

DOCUMENTO N° 2 ANEXOS

ANEXO 1.....	1
ANEXO 2.....	15
ANEXO 3.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Minerales opacos observados con el microscopio de reflexión.....	12
Figura 2. Esquema simplificado de la relación Reflexión- Microdureza	21
Figura 3. Curvas de reflectancia. A) Oro con pureza 99 %. B) Calcopirita.....	22
Figura 4. Sistema de reconocimiento para minerales opacos en luz reflejada.....	24
Figura 5. Sistema de reconocimiento para minerales opacos en luz reflejada.....	25
Figura 6. Espectro de colores en que se descompone la luz blanca.....	29
Figura 7. Suma de colores primarios y su representación hexagonal.....	31
Figura 8. Cubo de color RGB	33
Figura 9. Imagen en color (RGB) descompuesta en las bandas rojo, verde y azul.....	33
Figura 10. Imagen en los planos tono (H), saturación (S) e intensidad (I).....	34
Figura 11. Imagen RGB e imágenes Matiz o tono (H), saturación (S) e intensidad (I).....	35
Figura 12. Imagen RGB e imágenes de luminancia (Y) y comp. cromáticas (I)-(Q).....	36
Figura 13. Diagrama cromático CIE.....	37
Figura 14. Equipo de Análisis Digital de Imagen.....	40
Figura 15. Cámara video CCD Sony.....	41
Figura 16. Tarjeta digitalizadora Matrox. Foto: Matrox Imaging. -Fabrimex-	42
Figura 17. Ordenador Personal Pentium IV.....	43
Figura 18. Ventanas principales de <i>Software</i> de ADI <i>MicroImage</i> y <i>Aphelion</i>	44
Figura 19. Ventana para programación en el <i>Software</i> de ADI.....	45
Figura 20. Descripción de las partes básicas de un microscopio (Leitz DMRXP).....	46
Figura 21. Patrones utilizados.....	50
Figura 22. Principales etapas del ADI (modificado Russ J.C. 1990).....	51
Figura 23. Imágenes obtenidas de MEB. Mineralogía y escalas gráficas en la figura.....	59
Figura 24. Secuencia de la metodología general.....	65
Figura 25. Probetas pulidas.....	72
Figura 26. Secuencia de operaciones para conseguir la calibración del equipo.....	80
Figura 27. Secuencia de la metodología específica.....	81
Figura 28. Aspecto de los minerales (M.R.) presentes en los depósitos estudiados.....	98
Figura 29. Modelo de ficha para la descripción mineralógica de las probetas.....	100
Figura 30. Curva de Respuesta de NG en el tiempo para una imagen negra.....	109
Figura 31. Curva de Respuesta de NG en el tiempo para una imagen negra.....	110
Figura 32. Período de la función de ruido en cada una de las bandas RGB.....	112

Figura 33. Promediado de imágenes con 8 (a),16 (b), 32 (c) y 64 (d) imágenes.....	113
Figura 34. Histograma de NG para escena negra homogénea prom. y no prom.	115
Figura 35. Histograma de NG para escena blanca homogénea prom. y no prom.....	115
Figura 36. Diagrama de relación % de Reflexión Vs NG de la cámara CCD.	117
Figura 37. Esquema con la localización aprox. de las ventanas de muestreo.	118
Figura 38. Configuración del <i>gain</i> de la cámara de video CCD.	119
Figura 39. Esquema de localización de la ventana de muestreo.....	121
Figura 40. Corrección numérica de las imágenes (<i>Micro Image 4.0</i>).....	123
Figura 41. Algoritmo de adquisición de imágenes.	128
Figura 42. Imágenes adquiridas por ADI. Mineralogía y escala indicadas.....	128
Figura 43. Aplicación de los Filtros de mejora (<i>Median y Low Pass</i>).	132
Figura 44. Aplicación de los Filtros morfológicos (<i>Open y Close</i>).....	133
Figura 45. Algoritmo de adquisición de imágenes.	134
Figura 46. % de Área segmentada según el número de ventanas de muestreo utilizadas.....	136
Figura 47. Grafito segmentado utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.	140
Figura 48. Oro segmentado utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	142
Figura 49. Plata segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	144
Figura 50. Platino segmentado utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	146
Figura 51. Arsenopirita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	148
Figura 52. Bornita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	150
Figura 53. Calcopirita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	152
Figura 54. Cinabrio segmentado utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	154
Figura 55. Covellina segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	156
Figura 56. Cubanita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	158
Figura 57. Esfalerita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	160
Figura 58. Estibina segmentada utilizando rangos de segmentación con ajusta 95 %.....	162
Figura 59. Galena segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	164
Figura 60. Linneita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	166
Figura 61. Marcasita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	168
Figura 62. Molibdenita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	170
Figura 63. Niquelina segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	172
Figura 64. Pentlandita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	174
Figura 65. Pirita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	176
Figura 66. Pirrotina segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	178
Figura 67. Tetrahedrita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	180
Figura 68. Casiterita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.....	182

Figura 69. Cromita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %	184
Figura 70. Hematites segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %	186
Figura 71. Ilmenita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %	188
Figura 72. Magnetita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %	190
Figura 73. Rutilo segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %	192
Figura 74. Uraninita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %	194
Figura 75. Goethita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %	196
Figura 76. Wolframita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %	198
Figura 77. Ganga segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %	200
Figura 78. Gráfico de comparación de NG Vs. % Reflectancia. Banda Roja	205
Figura 79. Gráfico de comparación de NG Vs. % Reflectancia. Banda Verde	205
Figura 80. Gráfico de comparación de NG Vs. % Reflectancia. Banda Azul	206
Figura 81. Gráfico de comparación de NG vs. % Reflectancia. a) galena. b) calcopirita	207
Figura 82. Gráfico de comparación de NG de Bandas Azul vs. Verde	208
Figura 83. Gráfico de comparación de NG de Bandas Roja vs. Verde	209
Figura 84. Segmentación de fases minerales	210
Figura 85. Segmentación de imágenes de las probetas HD - 1153 y HD - 1217	217
Figura 86. Histogramas de las imágenes de doce minerales	220
Figura 87. Algoritmo simplificado del Sistema Experto de identificación por ADI	222
Figura 88. Ventanas para ingresar la información de la procedencia de la probetas	223
Figura 89. Ventanas para llamar las imágenes a caracterizar mediante ADI	225
Figura 90. Ventana para seleccionar minerales a caracterizar	226
Figura 91. Documento donde se almacenan los parámetros medidos	229
Figura 92. Ubicación geológica de la mina Nueva Esparta (mod. Murcia y Cepeda, 1991)	232
Figura 93. Imagen con mineralogía típica. Veta Bruja	233
Figura 94. Representación de la anchura de un grano de oro	234
Figura 95. Curva de relación área - anchura	235
Figura 96. Frecuencia de granos de oro clasificados por rangos de tamaños. Veta Gruesa	236
Figura 97. Frecuencia de granos de oro clasificados por rangos de tamaños. Veta Bruja	236
Figura 98. Contribución del contenido de oro referido a 1 t. de material. Veta Gruesa	237
Figura 99. Contribución del contenido de oro referido a 1 t. de material. Veta Bruja	237
Figura 100. Correlación anchura-diámetro para granos de Au en V. Gruesa y Bruja	238
Figura 101. Curva granulométrica a molienda 0,25 mm de la Veta Bruja	241
Figura 102. Diagrama de flujo seguido en la conc. gravimétrica en mesa tipo Wilfley	242
Figura 103. Ubicación geológica de la mina El Roble (mod. Ortiz, 2002)	246
Figura 104. Imágenes con mineralogía típica. Mina El Roble. Obj. 20 X	247

Figura 105. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta MER 1).	249
Figura 106. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta MER 3).	249
Figura 107. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta MER 18A).	249
Figura 108. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta MER 22).	250
Figura 109. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta MER 23).	250
Figura 110. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta El Roble).	250
Figura 111. Número y área de granos de pirita según rangos de tamaño (Probeta MER 3).	252
Figura 112. Número y área de granos de pirita según rangos de tamaño (Probeta MER 3).	252
Figura 113. Asociación mineral de Pirita y Calcopirita (Probeta MER 3).	253
Figura 114. Número de granos de calcopirita (incluida en pirita) según rangos de tamaño.	254
Figura 115. Área de granos de calcopirita (incluida en pirita) según rangos de tamaño.	254
Figura 116. Mineralización y parámetros a determinar mediante ADI (Probeta Pt 2).	255
Figura 117. Distribución del número de granos y su área según rangos de tamaños. Pt-2.	258
Figura 118. Distribución del número de granos y su área según rangos de tamaños. Os-1.	258
Figura 119. Imágenes minerales obtenidas de las probetas Marmato 19 y Marmato 7.	261

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Minerales más comunes de las menas metálicas.....	101
Tabla 2. Respuesta de NG utilizados para la calibración del color.....	119
Tabla 3. Respuestas de NG utilizadas para la calibración del color.	120
Tabla 4. Resultados de la valoración de la deriva espacial sobre imágenes sin corregir.	121
Tabla 5. Resultados de la valoración de la deriva espacial sobre imágenes corregidas.	124
Tabla 6. Valores de calibración geométrica para el equipo.....	125
Tabla 7. Magnificación de la Imagen presentada por el <i>Software</i> de ADI utilizado.	125
Tabla 8. Resolución óptica teórica de los objetivos utilizados.....	126
Tabla 9. Valores de Reflectancia de la Niquelina. Modificado de Criddle & Stanley (1993)	202
Tabla 10. Valores de reflectancia (%) y NG para las Bandas R, G. y B.	204
Tabla 11. Rangos de segmentación.	210
Tabla 12. Comparación entre área total y áreas de fases segmentadas.....	218
Tabla 13. Contenido total (ppm) de metales preciosos (Au/Ag). (MOP) y (AQ).....	238
Tabla 14. Densidad media de los granos mixtos de cuarzo-oro según el tamaño del grano para partículas de oro de 0,161 mm.	239
Tabla 15. Densidad media de los granos mixtos de cuarzo-oro según el tamaño de una única inclusión de oro, para granos de 0,25 mm.	240
Tabla 16. Concentración en mesa Wilfley de mena de la veta Bruja, molida a 0,25 mm.	242
Tabla 17. Concentración en mesa Wilfley de mena de la veta Gruesa, molida a 0,25mm.....	243
Tabla 18. Parámetros de cada grano de Platino (Probeta Pt - 2).....	256
Tabla 19. Parámetros de cada grano de Platino (Probeta Os - 1).....	257
Tabla 20. Contribución de Fe de las inclusiones de Pirrotina y Calcopirita en la Marmatita	263

RESUMEN

En esta memoria se presenta el trabajo llevado a cabo para desarrollar un sistema experto que permita la identificación y cuantificación automática de minerales opacos presentes y visibles en probetas pulidas. Este sistema, que pretende ser un complemento a las técnicas tradicionales de Microscopía, se basa en la aplicación de la técnica de Análisis Digital de Imagen, ADI, sobre imágenes digitales, visibles con el Microscopio de Reflexión M.R.

El objetivo fundamental ha sido la identificación y cuantificación automática de los 30 minerales opacos con mayor interés en la explotación de los principales yacimientos minerales (Grafito, Oro, Plata, Platino, Arsenopirita, Bornita, Calcopirita, Cinabrio, Covellina, Cubanita, Esfalerita, Estibina, Galena, Linneíta, Marcasita, Niquelina, Molibdenita, Pentlandita, Pirita, Pirrotina, Tetrahedrita, Casiterita, Cromita, Hematites, Ilmenita, Magnetita, Rutilo, Uraninita, Goethita, Wolframita). Es importante limitar la búsqueda experta del ADI para lo que es básico conocer la paragénesis del yacimiento del que procede la muestra e identificar, mediante técnicas tradicionales de Microscopía, aquellos minerales opacos que están presentes en la probeta estudiada.

La puesta a punto del equipo de ADI (Cámara de video CCD, microscopio, fuente de alimentación y ordenador) se ha llevado a cabo a través del control y posterior corrección de los siguientes factores: ruidos, derivas espaciales y temporales, calibración del color, ganancia, ajuste de blanco, calibración geométrica etc. Por otro lado, la secuencia de preparación de las muestras ha de conducir a una óptima y homogénea calidad de pulido.

La digitalización de la información se ha realizado siguiendo unas condiciones óptimas de adquisición (tiempos de calentamiento de la cámara y de la fuente de luz, promediado de imágenes, etc). Además se ha aplicado una secuencia de tratamiento (filtros de mejora y morfológicos) que ha permitido mejorar la información presente en la imagen.

Una vez obtenida la imagen final, se ha procedido a determinar los rangos de segmentación que caracterizan a las fases minerales estudiadas. Para ello ha sido necesario obtener una muestra representativa de cada fase mineral a través de ventanas de 10*10 *pixels* sobre fases provenientes de diferentes probetas y yacimientos. Se han muestreado un total de 100 ventanas para cada fase mineral, que posteriormente se analizan estadísticamente para obtener los rangos con los cuales es posible definir al mineral estudiado.

A partir de los rangos de segmentación se ha llevado a cabo una primera validación comparando estos datos con los valores de reflectancia (% R) definidos para cada una de estos minerales y para cada una de las bandas en que se ha trabajado (Roja , Verde y Azul). Por último, se comprueba la validez de los resultados y la funcionalidad del sistema experto diseñado a través de la ejecución de tres aplicaciones prácticas en las que se identifican las fases minerales presentes y se realiza un análisis modal y ponderal de los minerales presentes.

El resultado final de esta investigación ha permitido establecer un proceso automático de identificación de minerales a través de un análisis multi funcional de las imágenes digitales. El sistema desarrollado ha sido aplicado satisfactoriamente en problemas industriales, ambientales o problemas científicos (beneficio de menas, control de polución, composición modal de minerales, etc).

ABSTRACT

The aim of this research is to develop an automated system for identification and quantification of common ore minerals on polished sections. The system tries to improve the limited performance possible with traditional microscopy techniques. It applies Digital Image Analysis (**DIA**) to representative ore images that are digitalised through a frame grabber and obtained from a video camera coupled to a conventional optical Reflection Microscope (**RM**).

For the purpose of this study, aimed at the common ores of interest for mining and environmental problems, the opaque minerals which account for most of the relevant ores have been selected. These are about 30, as established in the literature: Graphite, Gold, Silver, Platinum, Arsenopyrite, Bornite, Chalcopyrite, Cinnabar, Covellite, Cubanite, Sphalerite, Stibnite, Galena, Linnaeite, Marcasite, Niccolite, Molybdenite, Pentlandite, Pyrite, Pirrotite, Tetrahedrite, Cassiterite, Chromite, Haematite, Ilmenite, Magnetite, Rutile, Uraninite, Goethite, Wolframite. Other minerals that are not among these can also be studied or identified, but they need a specific treatment in each case. For this purpose, the ores have been grouped in classes, according to their associations. These classes are related to the ore deposit types known in the literature. The starting point for the DIA search is thus the information about deposit type and ore association, checked with qualitative microcopic study.

The necessary updating of ADI tools - Video Camera CCD, microscopy, input energy, and computer system is done after evaluating and adjusting the following factors: noises, spatial and temporal drifts, colour calibration, gain, white colour fine tune, geometric calibration, etc. Moreover, for the measures on the samples to be reliable, it is necessary to achieve a homogenous quality of polishing in the sections.

Digitalisation of information has to be done in optimal conditions (camera warming times, light source, images tuning, etc), which have been empirically established as part of the experimental work. The sequence of work allows improving the initial information in the image, but not adding any new information.

Once image acquisition is correct (representative, reliable and reproducible) mineral segmentation and identification of the different ores is undertaken. Representative samples from each mineral were selected and then acquired /measured in windows samples (10*10 pixels), from polished sections of ores from the various mineral deposits. 100 windows have been considered and they have been statistically analyzed afterwards to obtain the features of each mineral.

A first validation of the results is completed, as those final results are compared with the reflectance data (%R) for all those minerals in the of Red, Green and Blue bands. The IMA /COM reflectance are used as reference for the identification and control, and the H.J. Bernhardt automated reflectometer will provide an external reference for the validation of the process. Finally, the statistical work shows the validity of the results and the functionality of the designed system.

As a result of this research, a general approach was established, allowing automatic identification of common ores and, furthermore, a multi-functional mathematical treatment of all the images, implying the ability to address different industrial or scientific problems without having to repeat the image acquisition or measure each time, as with traditional non-automated, poin-counter, methods. As a concluding test, the system has been successfully applied to industrial, environmental or scientific problems (beneficiation of ores, alternative technologies to avoid pollution, modal mineral compositions, etc.).

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid
Departamento de Ingeniería Geológica

DOCUMENTO N° 1 MEMORIA

**CARACTERIZACIÓN DE MENAS MEDIANTE
ANÁLISIS DIGITAL DE IMAGEN:**

**Investigación y diseño de un sistema experto aplicable a
problemas mineros**

Edgar Raúl Berrezueta Alvarado

2004

I. INTRODUCCIÓN

I.1 PLANTEAMIENTOS GENERALES

La minería metálica ha desempeñado desde sus inicios un papel indispensable en el desarrollo social y económico de la sociedad, papel que continua en la actualidad. De ahí que la optimización y control de los procesos relacionados con esta actividad requieran el concurso de una ingeniería sólidamente fundamentada en la Ciencia Aplicada. La identificación, cuantificación y caracterización de las fases minerales presentes en las secciones pulidas permiten, en primer lugar, mejorar el beneficio de las menas metálicas facilitando un aprovechamiento integral de los metales valiosos y, además, controlar el uso de reactivos en procesos de concentración evitando la contaminación del medio ambiente.

El proyecto a desarrollar versa sobre una temática para la cual es necesario aplicar conocimientos informáticos, matemáticos y, obviamente, geológicos y mineralógicos. Se trata de desarrollar las aplicaciones automatizadas de la mineralogía a los procesos mineralúrgicos, mediante análisis digital de imagen. De lograrse este propósito, para el que existen perspectivas razonablemente realistas a partir de las investigaciones que el equipo de trabajo del que forma parte el autor de este tesis ha realizado, se desarrollaría una tecnología de gran interés para el desarrollo tecnológico iberoamericano, teniendo en cuenta la enorme importancia que la industria minera tiene en esta comunidad de naciones y también el elevado riesgo de deterioro ambiental que la misma implica.

La mejora y control automatizado de los métodos mineralúrgicos por medio de una técnica no muy costosa, como la que se investiga, contribuirá sin duda significativamente tanto a optimizar la economía del proceso como a eliminar o mitigar los efectos negativos de su impacto ambiental. El hecho de que ambos factores están ligados a una actividad frecuentemente informal y poco controlada por los

gobiernos, ha conducido a la estrategia que sigue este proyecto: Se debe diseñar una tecnología de aplicación rápida y eficaz, poco costosa para ser asequible a dicho sector, pero que incremente siempre los beneficios del minero, única forma de que le resulte atractiva y así, mejorando el proceso, evite los efectos, inevitablemente nefastos para el medio ambiente, de una actividad actualmente anárquica y contaminante.

La aplicación del Análisis Digital (ADI) de Imagen pretende ofrecer un soporte numérico de cuantificación de parámetros geométricos y densitométricos que complementen y/o aporten nuevos datos a los estudios tradicionales de microscopía. El aporte de la técnica de análisis de imagen frente a otros métodos de cuantificación clásicos, como la platina integradora sobre microscopio óptico, es su mayor versatilidad, agilidad y potencia, lo que permite aumentar la base de observación y automatizar el tratamiento matemático de los datos, generando resultados más fiables y rápidos.

Para obtener resultados fiables, cada paso del procedimiento para utilizar la técnica de Análisis Digital de Imagen debe ser desarrollado siguiendo una metodología rigurosa que garantice la reproductibilidad de las medidas y la identificación de las posibles fuentes de error.

El Departamento de Ingeniería Geológica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid ya viene trabajando desde hace años en aplicaciones puntuales de la técnica de ADI como complemento a las técnicas tradicionales de microscopía. Partiendo de esto y con el fin de obtener unos objetivos más ambiciosos, ha sido planteado el desarrollo de esta investigación como Tesis Doctoral.

I.2 DEFINICIÓN DEL TEMA

En este trabajo, al mismo tiempo que se plantea la identificación automática de minerales visibles y reconocibles en secciones pulidas mediante la determinación de sus propiedades (valores de reflexión) con el equipo de ADI, se pretende desarrollar una metodología que garantice la reproductibilidad de los datos obtenidos y que avale el Analizador de Imagen como un instrumento científico.

Para abordar adecuadamente la investigación, en primer lugar se determinan las posibles fuentes de error para que posteriormente sean eliminadas o limitadas. Además, cada paso del procedimiento de muestreo y de medidas finales deberá ser desarrollado con rigor y calibrado según patrones conocidos.

Previamente a la aplicación propiamente dicha de la técnica de ADI, ha sido desarrollado un trabajo geológico y mineralógico a fin de incluir en la identificación de las fases minerales criterios no solo físicos (de reflexión - nivel de gris), sino también criterios complementarios como yacimiento mineral de donde proceden las probetas a estudiar con sus paragénesis típicas, minerales con importancia para ser discriminados y lógicamente la descripción completa de la probeta a analizar.

Obtenidas las imágenes, el proceso de tratamiento buscará eliminar ruidos parásitos y mejorar en la medida de lo posible la información original. La segmentación o selección de la información estará sustentada en un análisis multivariante, es decir, utilizando por separado cada una de las bandas (Rojo, Verde Azul) en que es posible descomponer la imagen en color obtenida en origen a través de un sensor (Cámara de video CCD). Una vez identificadas las fases minerales, la determinación cuantitativa de sus parámetros geométricos y densitométricos es tan amplia y variada como sean las necesidades requeridas.

El sistema experto de identificación automática estará desarrollado en el software de análisis de imagen a través de una rutina desarrollada en lenguaje *Visual Basic*. La definición de Sistema Experto estaría completa si el sistema a desarrollar fuese capaz de

auto-aprendizaje, es decir, de retroalimentarse. Este no es el caso del sistema planteado, entre otras cosas, por las limitaciones económicas para instalar una instrumentación automatizada de última generación que lo posibilite (*software* apropiado, platina motorizada, sistema de enfoque automático, etc).

La rutina en primer lugar pedirá identificar el tipo de yacimiento de donde proceden las imágenes digitales a tratar, para lo cual será necesario responder a estos requerimientos con anterioridad. A continuación, el diálogo de la rutina pedirá seleccionar de una lista predefinida (según el yacimiento) los minerales que se desea identificar mediante el ADI, estos minerales deberán haber sido reconocidos previamente al microscopio.

Una vez identificadas las fases minerales de interés presentes en las secciones pulidas, la cuantificación de parámetros geométricos y densitométricos de las fases minerales caracterizadas mediante ADI será posible mediante rutinas complementarias, basadas en la segmentación previa de dichos minerales.

I.3 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de esta Tesis Doctoral es el desarrollo de un sistema experto que permita la identificación y cuantificación automática de los principales minerales opacos presentes en secciones pulidas o laminas transparentes pulidas. Para la consecución de este fin es necesario, en principio, mantener unas condiciones que garanticen la reproductibilidad de la técnica, así como la simplificación del problema a través de un estudio mineralógico previo de los yacimientos minerales de los que se obtendrán las probetas a analizar. En concreto, los objetivos son:

- **Obtención de una metodología que garantice la reproductibilidad de los rangos de segmentación (NG) encontrados para cada fase mineral estudiada.**
- **Caracterización, por sus propiedades de reflectancia y sus asociaciones, de las menas de interés industrial a investigar.**
- **Identificación y Cuantificación de las fases minerales visibles en probetas pulidas mediante un sistema experto y automático.**
- **Aplicación de los resultados de caracterización por ADI a problemas mineralógicos prácticos.**

El análisis utilizado para la identificación de las fases minerales es el análisis multibanda, ya que es posible descomponer la imagen original en color obtenida a través del equipo de ADI, en tres bandas: roja, verde y azul. El resultado de trabajar individualmente en cada una de estas bandas supondrá la determinación de tres rangos de segmentación para una misma fase mineral, posibilitando un aumento en la probabilidad de alcanzar la segmentación absoluta de la fase mineral en estudio y disminuyendo la probabilidad de incluir dentro de la segmentación una fase mineral diferente.

La imposibilidad de identificar mediante ADI toda la gama de minerales opacos, que pueden ser reconocidos con técnicas tradicionales de microscopía, se debe a la superposición de los rangos de segmentación de los minerales en el espectro visible y a la necesidad de prescindir de las propiedades ligadas a la polarización de la luz (pleocroísmo, anisotropismo, birreflectancia, etc).

La selección de los minerales a caracterizar ha seguido un criterio experto, según el cual serán considerados aquellos que tengan una mayor importancia probada como menas o como condicionantes en la recuperación mineral e influencia en el medio ambiente.

Otro condicionante a considerar en la correcta identificación de las fases minerales es la variación en la composición química de los minerales, que implica variaciones en los niveles de gris que definen cada mineral. Además, existe un condicionante propio del equipo ADI que se manifiesta a través de ruidos, derivas temporales y espaciales, etc. que aunque se intente controlar, siempre generará un error residual en las medidas. Es importante controlar este error y reducirlo a límites estadísticamente aceptables.

Finalmente, la aplicación a problemas prácticos debe conducir al doble objetivo de facilitar resultados a la industria y de ensayar, en un primer banco de pruebas, la validez de la metodología.

I.4 EXPOSICIÓN Y PLANTEAMIENTO DE TRABAJO

En la presente memoria se ha seguido el siguiente plan de exposición:

- El primer capítulo, denominado Introducción, presenta, a partir de la definición de los planteamientos generales, el tema, objetivos, alcance y plan del trabajo a desarrollar en esta Tesis Doctoral.
- En el segundo capítulo, llamado Estado del Arte, se describen los aspectos generales de las técnicas de microscopía de luz reflejada y análisis digital de imagen como herramientas de estudio y caracterización mineralógica. En este apartado, además de la descripción de los fundamentos teóricos que sustentan estas técnicas, se presenta de forma simplificada su evolución, aplicación y situación actual.
- La Metodología de investigación seguida en este trabajo se encuentra descrita en el tercer capítulo. En él se incluyen desde la preparación de las muestras (probetas pulidas) hasta la presentación y evaluación de resultados de la caracterización de fases minerales mediante ADI. Esta secuencia en términos generales pretende describir la metodología seguida, a fin de garantizar la correcta aplicación de la técnica de ADI como complemento al estudio microscópico tradicional. Para un mejor entendimiento, la descripción metodológica ha sido dividida en dos etapas que se detallan a continuación:

La primera parte, con un perfil más general, pretende describir el conjunto de pasos a seguir, previos a lo considerado propiamente como análisis digital de imagen, es decir: adquisición, tratamiento y extracción de la información de las imágenes. En concreto, se describirán los pasos pertinentes que permitan garantizar la puesta a punto del equipo.

En esta fase se incluyen los pasos generales a seguir a fin de conseguir: la información sobre los yacimientos minerales que se utilizarán como referencia, los pasos a ejecutar durante el reconocimiento detallado de las fases minerales presentes en una colección de probetas pulidas y finalmente, la secuencia general con la cual conseguir unas condiciones estables de funcionamiento de cada uno de los instrumentos que forman el equipo de ADI.

La segunda etapa de la metodología se caracteriza por un perfil más específico de lo que se conoce como análisis digital de imagen. En este apartado se describirá en detalle los pasos seguidos en los procesos de adquisición, tratamiento y segmentación de las imágenes digitales. Además, se marcarán las pautas generales del tratamiento estadístico a aplicar sobre los datos obtenidos, para cada fase mineral estudiada, a fin de evaluar su significación. Finalmente, se presentará la secuencia detallada de pasos seguidos en la evaluación de los resultados obtenidos.

- El tercer Capítulo engloba la totalidad del Proceso Experimental, el cual ya ha sido descrito de forma general en el capítulo de metodología.

En la primera parte de este capítulo se plantea la clasificación de los principales yacimientos minerales con su respectiva mineralización típica. En realidad, esta clasificación ha sido realizada a partir de la reinterpretación o reclasificación de los sistemas ya establecidos, con el fin de tener una referencia mineralógica clara que facilite la identificación de los minerales. En este apartado se toma como referencia de partida la clasificación genética realizada por Schneiderhom en 1941, pero con acusadas modificaciones para actualizarla.

La segunda parte del proceso experimental comprende la elaboración y/o preparación de las muestras y la descripción mineralógica de la colección de probetas pulidas utilizadas como referencia. En este apartado se incluye el desarrollo de una base de datos que almacena los datos encontrados.

A continuación, en la tercera etapa del proceso experimental, se aborda la puesta a punto del equipo de ADI, es decir, la consecución de unas condiciones que garanticen la reproductibilidad de la técnica de ADI. En esta etapa se incluyen el estudio de los ruidos, derivas temporales - espaciales, calibración del color y calibración geométrica del equipo.

Posteriormente, en una cuarta etapa se realizará el trabajo con las imágenes, es decir, el desarrollo de las etapas de adquisición, tratamiento y caracterización de las fases minerales. La caracterización de las fases minerales comprenderá la obtención de los rangos en nivel de gris (NG) con los que es posible segmentar a las fases minerales estudiadas.

La quinta etapa de la experimentación está enfocada a desarrollar la validación de los resultados, es decir, a comprobar si los resultados encontrados (rangos de segmentación) pueden ser aplicados a otras fases minerales obtenidas bajo las mismas condiciones de adquisición. La validación de los resultados será realizada a partir de relacionar los valores de NG encontrados para cada fase con sus correspondientes valores de reflectividad en valores porcentuales (R) descritos en la literatura especializada. Además de este procedimiento, serán realizadas diversas validaciones con probetas pulidas diferentes a las utilizadas en la caracterización de los rangos de segmentación.

Finalmente se presentará el funcionamiento del sistema experto en cuatro aplicaciones prácticas sobre yacimientos minerales, tres de ellos localizados en IberoAmérica, actualmente en explotación.

En estas aplicaciones, aparte de la identificación de las fases minerales presentes y visibles en las secciones pulidas del yacimiento se realiza un análisis modal y ponderal de cada una de las fases minerales identificadas, como apoyo a la caracterización mineralógica desarrollada a través de técnicas tradicionales de microscopía, aportando así mayor información de la mena para su uso en los procesos mineralúrgicos.

- El quinto capítulo de esta tesis comprende las Conclusiones metodológicas y de resultados obtenidos del desarrollo del presente trabajo. Además, se incluirán la recomendaciones pertinentes a fin de ampliar y/o mejorar en un futuro la sistemática desarrollada y utilizada en esta investigación.
- Tras las conclusiones, serán incluidas las Referencias Bibliográficas que han sustentado esta Tesis Doctoral.
- Por último, aparecerán los anexos con información referida a la descripción mineralógica hecha sobre las probetas pulidas de referencia, la clasificación de los yacimientos minerales y las rutinas que automatizan las operaciones desarrolladas sobre las imágenes.

II. ESTADO DEL ARTE

II.1 MICROSCOPIA DE REFLEXIÓN (MR) EN MINERALOGÍA

II.1.1 Introducción

La microscopía de reflexión es una técnica que permite el reconocimiento de las fases minerales presentes en una sección pulida a través de la identificación de sus propiedades ópticas al microscopio, con luz reflejada. El interés de esta técnica en el desarrollo de una mineralogía analítica aplicada está basado en su capacidad de competir con la química analítica, en problemas específicos (Castroviejo, 1977).

La microscopía de reflexión basa su funcionamiento en el uso de un microscopio para el estudio de los minerales opacos (microscopio de reflexión), con luz polarizada igual que el microscopio utilizado para el estudio de minerales transparentes (microscopio petrográfico). La principal diferencia estriba en la forma en la que la luz llega a la muestra, ya que en el de reflexión la luz se hace incidir desde arriba y se refleja en la superficie de la preparación.

Tradicionalmente, muchas de las propiedades ópticas observables en las secciones pulidas al microscopio óptico han sido definidas por el microscopista en términos subjetivos. Así ocurre con el color y la intensidad del color, valorados según impresiones subjetivas y condicionados, en parte, por el color de los minerales vecinos. Sin embargo, las medidas de reflectancia dependen exclusivamente de las propiedades del mineral.

Desde el punto de vista histórico, la técnica surgió hace unos 300 años, pero no fue hasta principios del siglo XX cuando apareció una investigación microscópica de

forma sistemática. De entre todas las obras relacionadas con el estudio mineralógico por medio de la microscopía de luz reflejada, sin lugar a dudas, la desarrollada por Ramdohr en 1932 (Ramdohr, 1980), representa la obra capital de referencia, con la descripción más completa de los minerales opacos que se ha desarrollado hasta nuestros días. El fulgurante progreso de la microscopía de minerales opacos en la segunda mitad del siglo XX es una muestra de la importancia de sus aplicaciones prácticas, manifestándose en que ya no se realiza una investigación minera seria sin contar con la información suministrada por esta técnica mineralógica.

En general, para el reconocimiento de cada especie mineral es necesario recurrir a una observación sistemática de sus propiedades ópticas (color, pleocroísmo, reflexiones internas, reflectancia, etc) y mecánicas (dureza de pulido, de rayado, de impresión) tanto de forma cualitativa como cuantitativa si fuese posible. Además, es importante tomar en cuenta criterios geológicos como la paragénesis o asociación mineral que se da en el yacimiento estudiado.

La descripción de las propiedades ópticas cualitativas y cuantitativas con posibilidad de ser identificadas en minerales opacos (Figura 1) ha sido elaborada a partir de la información presente en los textos de Ramdohr (1980) y Uytenbogaardt & Burke (1971).

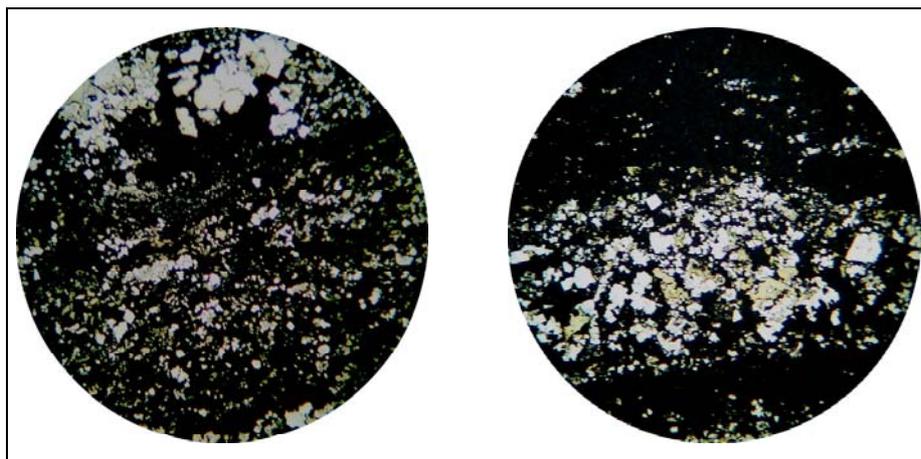


Figura 1. Minerales opacos observados con el microscopio de reflexión.

II.1.2 Propiedades Ópticas Cualitativas de los Minerales

El reconocimiento de los minerales opacos presentes en secciones pulidas, utilizando la técnica de microscopía de opacos, está basado en la identificación de las propiedades ópticas que presentan las fases minerales.

La descripción de las propiedades cualitativas observables al microscopio (color, pleocroísmo, dureza, anisotropismo, etc), siguiendo la información bibliográfica disponible, separa estas propiedades según sean observadas con nícoles paralelos (sin analizador) o con nícoles cruzados (con analizador) en el microscopio óptico de reflexión.

A continuación se describirán las propiedades observables con Nícoles paralelos:

II.1.2.1 Color

Esta propiedad se debe a la reflectancia diferencial de los minerales para las distintas longitudes de onda del espectro visible. La mayoría de los minerales coloreados tienen una reflectancia media. Aunque esta propiedad es una de las más aparentes, en pocas ocasiones permite por sí sola identificar los minerales. Como son pocos los minerales que presentan colores intensos, la descripción de su coloración es muy subjetiva. El color aparente de un mineral se verá muy influenciado por los colores de sus minerales vecinos.

Color	Minerales
Amarillo	Au nativo
Rosado	Bornita,
Azul	Covellina

II.1.2.2 Birreflectancia

La propiedad de un mineral de presentar variación en la reflectancia según su orientación, bajo luz polarizada es lo que se conoce como bireflectancia (Spry & Gedlinske, 1987).

Esta característica puede ser observada en un solo grano mineral girando la platina, sin embargo es mas fácil de observar comparando los diferentes granos de un mismo mineral en un agregado policristalino. Una bireflectancia débil o media es muy difícil de apreciar cuando el mineral que la presenta está rodeado de otro mucho más bireflectante.

Bireflectancia	Minerales
Fuerte	Molibdenita
Media	Marcasita
Débil	Arsenopirita

II.1.2.3 Pleocroísmo de reflexión

Consiste en un cambio del color o la tonalidad de un mineral al variar su orientación. El pleocroísmo es el fenómeno análogo a la bireflectancia para el caso de los minerales coloreados.

Pleocroísmo	Color	Minerales
Fuerte	Morado-rojo Azul-grisáceo	Yushkinita Covellina
Débil	Beige-amarillento	Pirrotina

II.1.2.4 Reflectancia

Esta propiedad es una de las más importantes para la identificación de minerales opacos. Se entiende por reflectancia la relación entre la intensidad de la luz reflejada por la superficie pulida del mineral y la intensidad de la luz incidente, expresada en tanto por ciento (R). Es necesario desarrollar una escala memorística aproximada de reflectancia (luminosidades, prescindiendo del color) de los minerales más comunes. Estos nos servirán de referencia para el reconocimiento de cualquier reflectancia.

Reflectancia	R	Minerales
Muy baja (transparentes)	<10 %	Fluorita, cuarzo, barita, carbonatos
Baja	15-20 %	Casiterita, cromita, esfalerita, magnetita
Media-baja	20-30 %	Bornita, enargita, cinabrio, cuprita, hematites, tetraedrita
Media	30-40 %	Acantita, polibasita, calcosina, pirrotina,
Media-alta	40-50 %	Bismutinita, galena
Alta	50-70 %	Niquelina, arsenopirita, marcasita, tioespinela, pirita, millerita, skutterudita,
Muy alta	>70 %	Ag nativa, Au nativo Pt nativo

II.1.2.5 Dureza de pulido

Es posible establecer la dureza de pulido a través de una observación cualitativa. Tres criterios permite apreciar la dureza relativa entre dos minerales (Cortez, 2002):

- Relieve diferencial. Los minerales más duros resaltan mas que los de menor dureza, originándose en la superficie de la probeta "mesetas" y depresiones. Estos contrastes de relieve se observan a partir de las líneas de contacto entre minerales. Si la diferencia de relieve (dureza) es poca, la línea se observará muy tenue. En cambio, si la diferencia es mayor, la línea estará mucho más marcada.
- Línea de Kalb. Reconocida la diferencia de durezas entre dos minerales, la línea de Kalb nos permite atribuir la dureza más elevada a alguna de las dos fases. La línea de Kalb es una línea brillante que aparece al desenfocar levemente la imagen con el diafragma de apertura semicerrado. La línea se desplazará hacia el mineral de menor dureza al alejar el objetivo de la platina y viceversa.
- Rayas de pulido. Los minerales de dureza muy baja acostumbran a presentar rayas de pulido. Sin embargo, en algunas ocasiones en las que el proceso de pulido no ha seguido todos los pasos convenientes, algunos minerales muy duros (como la pirita) pueden presentar rayas de pulido relictas. La rayas de pulido son más anchas en minerales más blandos

Esta observación permite a Ramdohr establecer una escala cualitativa de dureza de pulido de las menas metálicas, muy usada tradicionalmente. A ésta se añade la cuantificación de Spry & Gedlinske (1987), quienes dan una cifra que equivale a la de *Mohs*, la cual se indica entre paréntesis en este trabajo.

Para la observación de las propiedades que se presentarán a continuación es necesario intercalar el analizador (permite que las direcciones de vibración del polarizador y del analizador sean perfectamente perpendiculares) y aumentar la intensidad de luz. Para una correcta observación de la extinción y de los colores de interferencia, es imprescindible asegurarse de que el analizador está perfectamente cruzado.

II.1.2.6 Anisotropía y extinción

La anisotropía óptica en reflexión se origina debido a la diferencia de reflectancia de las dos direcciones de vibración de la luz en un cristal (R_1 y R_2). Al girar la platina variará el componente sobre el analizador del vector resultante de la luz reflejada por la superficie pulida del mineral:

- En minerales isótropos la componente es nula, por lo tanto se observa extinción total en un giro de 360° de la platina.
- En los minerales anisótropos se observarán cuatro posiciones de extinción y cuatro posiciones de máxima iluminación.

Para la identificación práctica de minerales y para el uso de las tablas podemos distinguir tres categorías:

- Anisotropía fuerte: Se observa al intercalar el analizador, incluso antes de aumentar la intensidad de luz.
- Anisotropía media: Se observa al intercalar el analizador y aumentar la iluminación.
- Anisotropía débil: Para observarla, además de intercalar el analizador y aumentar las condiciones de iluminación, es necesario descruzar ligeramente el analizador y, a veces, cerrar parcialmente el diafragma de contraste.

Efectos anómalos de anisotropismo pueden deberse a rayas de pulido o a la utilización de poco aumento.

Anisotropía	Mineral
Fuerte	Marcasita
Media	Hematites
Débil	Calcopirita

II.1.2.7 Reflexiones internas

Estas aparecen exclusivamente en los minerales transparentes (reflectancia muy baja) y en los semiopacos (reflectancia baja), en los que parte de la luz penetra a través del mineral reflejándose en cualquier discontinuidad interna, tal como planos de macla, exfoliaciones y fracturas.

Color de las reflexiones	Mineral
Rojo	Cinabrio, Esfalerita (marmatita)
Anaranjado	Goethita
Amarillo a marrón	Casiterita

II.1.2.8 Maclado

Las maclas se manifiestan como las diferentes regiones de un grano mineral con orientaciones cristalinas distintas, de manera que no se extinguen al mismo tiempo cuando se gira la platina del microscopio. Esta característica, presente en muchos minerales, se observa mejor con alta intensidad de iluminación y objetivo bajo, trabajando con nícoles cruzados. Generalmente, el maclado no puede ser visto en minerales isótropos y sí en los anisótropos. Según Ramdohr (1966), el maclado puede ocurrir en los minerales durante la formación del mineral (*Growth twins*), durante una inversión estructural por enfriamiento (*Inversión twins*) o como resultado de la deformación del mineral (*Deformation twins*). En algunos casos, la identificación del maclado puede ser clave en el reconocimiento del mineral observado. Así:

Mineral	Tipo de Macla
Marcasita	De crecimiento
Hematites	De inversión
Estannita	De deformación

II.1.3 *Propiedades Ópticas Cuantitativas de los Minerales*

De entre las propiedades ópticas antes mencionadas, la reflexión y la dureza son cuantificables mediante la utilización de un reflectómetro y un durómetro, respectivamente.

II.1.3.1 Medida de la reflectancia

En el caso de la reflexión, el valor que caracteriza esta propiedad se puede expresar como el valor porcentual de luz incidente que se refleja (%). Normalmente, el valor entregado en la bibliografía especializada para cada mineral es el porcentaje medio reflejado al hacer incidir luz blanca. Los valores de reflectancia de diferentes fuentes no concuerdan siempre. No obstante, ahora se dispone de buenas bases de datos con valores internacionalmente conocidos (IMA/COM: Criddle & Stanley, 1993) y que discriminan el espectro visible, en tramos monocromáticos. Un pulido imperfecto del mineral puede introducir errores significativos en la apreciación o medición de la reflectancia.

En la práctica, uno de los usos más importantes de la reflectancia se apoya en apreciaciones cualitativas, que no implica realizar mediciones exactas de ella, Es decir, la distinción entre diversos minerales por su brillo relativo, lo que es particularmente útil para minerales que carecen de tonos definidos y más bien muestran diversos grados del gris. A continuación se indican algunos valores de Reflectancia (%R) según Picot & Johan (1977):

Mineral	% R
Azufre Nativo	13,0
Enargita	26,5
Plata Nativa	95

II.1.3.2 Medida de la dureza de impresión (microdureza Vickers, VHN)

La microdureza de impresión o penetración representa la resistencia del mineral a la indentación (Kg/mm^2). Los instrumentos utilizados poseen un indentador (herramienta de penetración), que es un DIAMANTE tallado en forma piramidal. Dos tipos de indentador son (Gallardo, 2002):

- KNOOP, que es una pirámide con dos caras opuestas en ángulo de 130° . La impronta tiene forma de rombo, con la diagonal larga unas siete veces la longitud de la diagonal corta y treinta veces la profundidad de la impresión.
- VICKERS, que es una pirámide de base cuadrada, con ángulo de 136° entre cada par de caras opuestas. La impronta es cuadrada, con la diagonal unas siete veces la profundidad de la penetración.

Ambos tipos de indentador se pueden aplicar sobre granos no demasiado pequeños, con cargas de 0,1 g hasta cargas de 500 g. La principal limitación de las mediciones de microdureza es lo costoso de los equipos de medida. Con la superposición de la información cuantitativa de % reflexión y microdureza, ha sido desarrollado un clásico gráfico de correlación entre estas dos variables, útil para la identificación mineral (Figura 2).

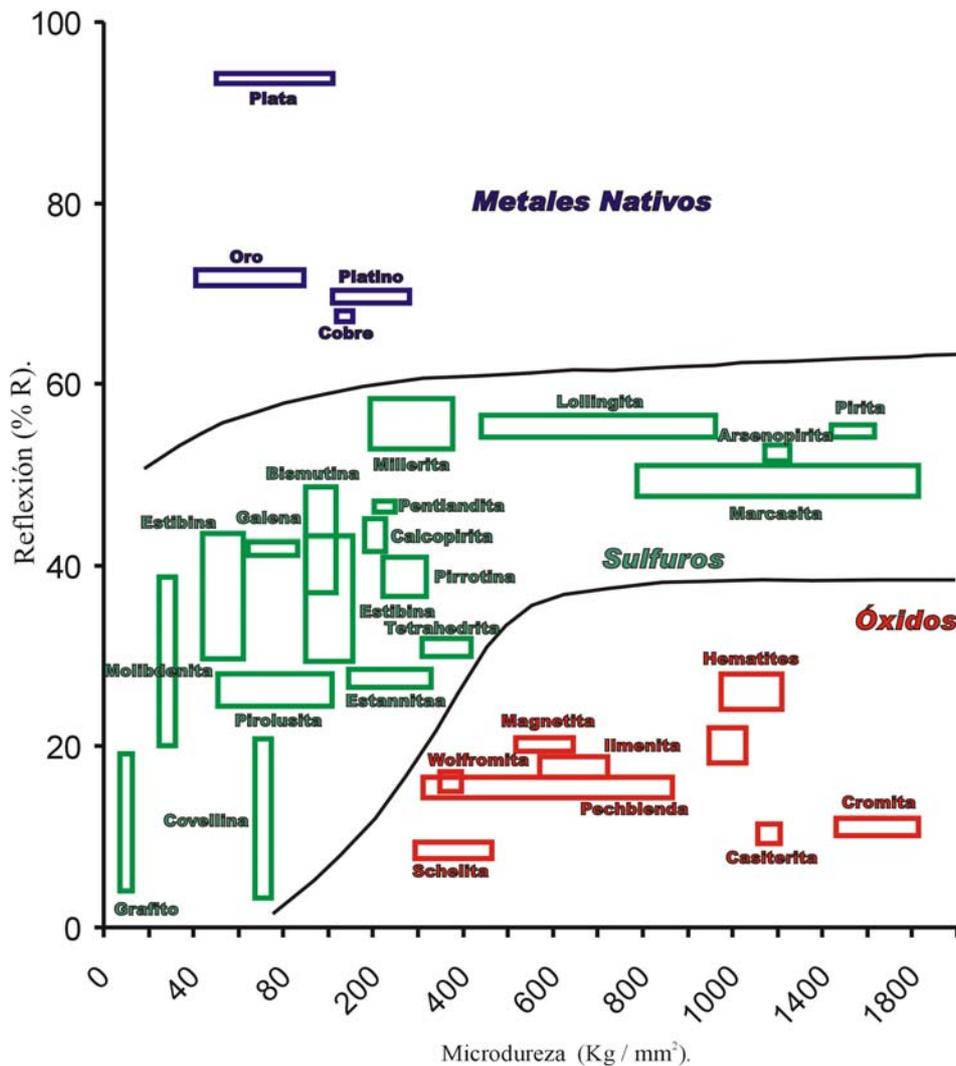


Figura 2. Esquema simplificado de la relación Reflexión- Microdureza
Modificado de McLeod & Chamberlain (1968).

II.1.4 Avances en la Cuantificación de Propiedades Ópticas

Actualmente, con el avance de la tecnología y de los equipos de medida, ha sido posible el cálculo del valor de reflectancia para rangos de longitud de onda de luz cada vez más pequeños y establecidos previamente por el operador. Los estudios más relevantes han sido los recopilados por Criddle & Stanley (1993) mediante la utilización de filtros especiales (monocromadores) que restringen la luz incidente sobre las fases minerales a los rangos de longitud de onda requeridos.

Estos valores permiten, en el caso de que las reflexiones promedio de dos minerales sean similares, utilizar la respuesta (%R) en determinados segmentos de longitud de onda, donde la respuesta sea diferente, para reconocerlos.

En las figuras siguientes es posible observar la curva de reflectancia haciendo incidir luz blanca sobre los minerales, utilizando filtros monocromadores para medir la luz reflejada (Figura 3). Los valores de reflectancia corresponden a rangos de longitud de onda de luz de 20 nm (Criddle & Stanley, 1993).

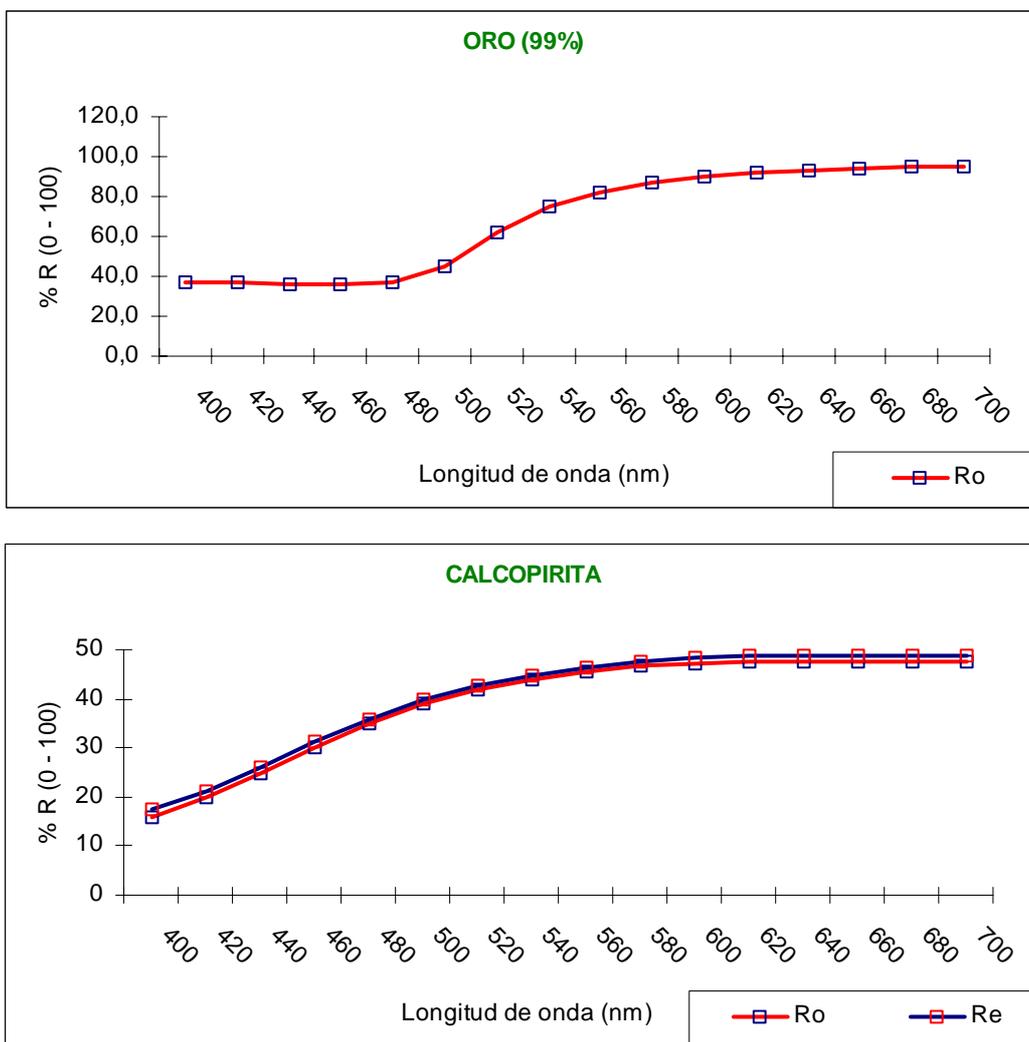


Figura 3. Curvas de reflectancia. A) Oro con pureza 99 %. B) Calcopirita.

Fuente: Criddle & Stanley (1993).

II.1.5 Sistemática de Identificación.

Una vez observadas y descritas las propiedades ópticas de los minerales de forma cualitativa, es posible identificar el mineral a través de la superposición de todas estas propiedades. La superposición será realizada siguiendo un orden cronológico, basado en la eliminación de posibilidades alternativas. Las sistemáticas de uso generalizado en la identificación de minerales opacos son las planteadas por Schouten (1962) y Spry & Gedlinske (1987).

Para la de Schouten, la primera propiedad óptica a utilizar como criterio de discriminación es la existencia de coloración en el mineral observado; posteriormente, en el caso que el mineral sea coloreado, se evaluará si es isótropo o anisótropo. A continuación se valorarán propiedades como reflectancia relativa, dureza y pleocroísmo. En el caso de que los minerales sean débilmente coloreados, el parámetro primero a evaluar es la reflectancia, posteriormente se determinará la dureza, reflexiones internas y anisotropismo. Un esquema modificado de esta sistemática se presenta en la Figura 4.

La sistemática planteada por Spry, utiliza las mismas propiedades ópticas observables al microscopio pero en un orden diferente. Así, en primer lugar separa los minerales en los que tienen color y los que no (igual que en el caso anterior). Para los denominados coloreados, la siguiente propiedad a evaluar es la existencia o no de pleocroísmo. A continuación se describe si tienen anisotropismo o no. En el caso de los no coloreados, el anisotropismo es la siguiente propiedad evaluada, luego se evaluarán otras propiedades como reflexiones internas y dureza. Un esquema general de esta sistemática se presenta en la Figura 5.

El conocimiento de los factores geológicos de formación del yacimiento estudiado, complementa la información óptica cualitativa y cuantitativa, derivada de la observación al microscopio de reflexión. Así, el conocimiento de la asociación típica que es posible encontrar bajo esas condiciones representa, sin lugar a duda, un apoyo básico a tomar en cuenta, cualquiera que sea la sistemática seguida en el reconocimiento de minerales opacos.

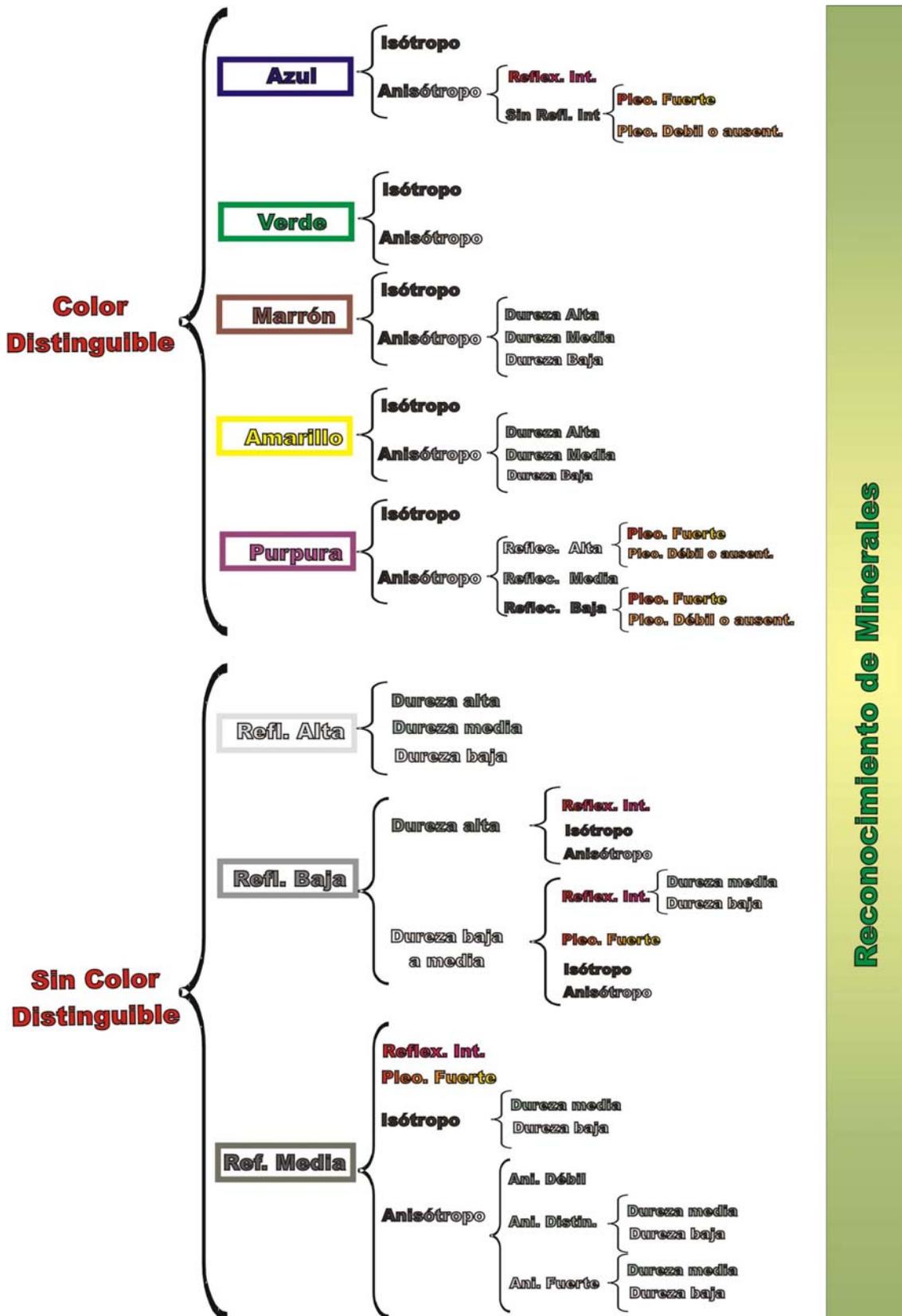


Figura 4. Sistema de reconocimiento para minerales opacos en luz reflejada.

Modificado de Schouten (1962).

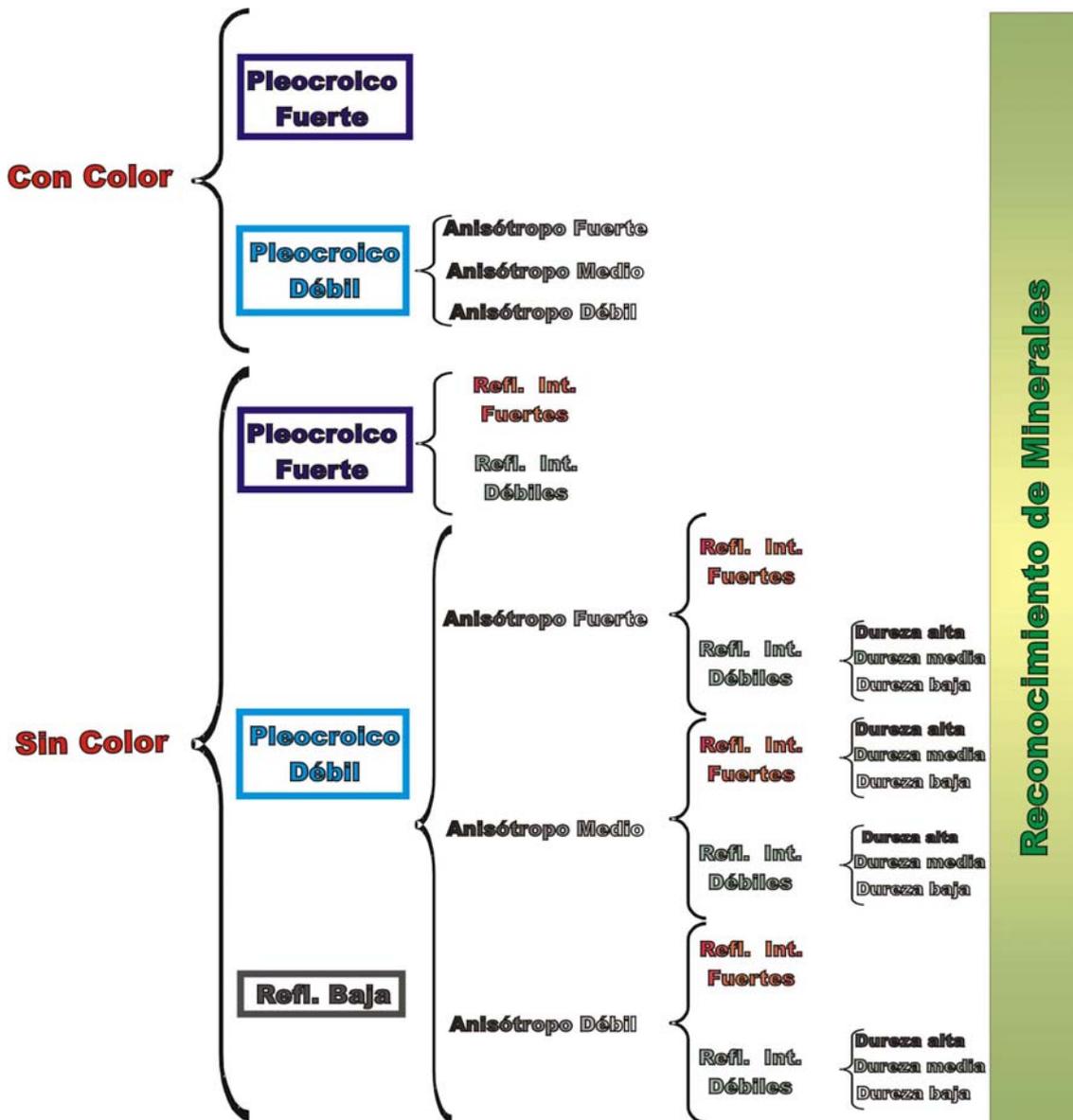


Figura 5. Sistema de reconocimiento para minerales opacos en luz reflejada.

Modificado de Spry & Gedlinske (1987)

Para finalizar, cabe mencionar la existencia de un amplio número de técnicas auxiliares que, utilizadas junto a la microscopía de luz reflejada, permiten obtener información más detallada de la identidad y composición de las fases minerales. De particular importancia se encuentran estas técnicas auxiliares: Difracción de Rayos X, Microsonda electrónica, Microscopio Electrónico y Análisis Digital de Imagen, entre otras (Craig & Vaughan, 1994).

II.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ANÁLISIS DE IMAGEN (ADI)

II.2.1 Introducción

El estudio de los mecanismos de procesamiento y representación de la información visual que percibe un ser vivo se encuentra en los orígenes de la ciencia y la filosofía. Desde la época de los clásicos griegos (Platón y Aristóteles) hasta nuestros días se han formulado teorías sobre cómo percibe el ser humano su realidad exterior y de qué manera usa y representa la información captada por sus sentidos.

Con la aparición de los primeros ordenadores hacia los años sesenta se puso claramente de manifiesto su gran potencialidad para el tratamiento de información espacial en campos de aplicación directamente relacionados con el estudio de propiedades del sistema de visión humana.

El análisis digital de imagen es la ciencia experimental que basa sus estudios en el tratamiento de imágenes con el fin de identificar, caracterizar y cuantificar elementos dentro de imágenes digitales o digitalizadas. Esta ciencia tiene un carácter multidisciplinar por cuanto se apoya en otras técnicas o ciencias como la óptica, estadística, matemáticas, informática, etc.

La base de la técnica de ADI es, obviamente, una imagen. Ésta puede ser considerada como un objeto plano cuya intensidad luminosa y color puede variar de un punto a otro. Desde el punto de vista físico, una imagen puede representarse como una función continua $f(x,y)$ donde (x,y) son las coordenadas espaciales y el valor f , la intensidad luminosa (nivel de gris) en ese punto (González & Wintz, 1977).

Según Martínez-Nistal (1993), el término digital hace referencia a la descomposición de una imagen en una matriz de $M \times N$ puntos donde cada punto o celda tiene un valor numérico proporcional a la luminosidad o nivel de gris. El valor de luminosidad, continuo en origen, es discretizado de tal forma que al valor de

luminosidad en cada punto le es asignado un valor (k intervalos) proporcional y representativo. En la actualidad, los sistemas de ADI son capaces de discriminar 256 niveles de gris.

Según esto, una imagen digital es un imagen $f(x,y)$ que ha sido muestreada en sus coordenadas espaciales y en su intensidad luminosa. Cada uno de los elementos en que es posible dividir la imagen se denomina "*pixel*" (*picture element*). La cantidad y tamaño de los *pixels* condicionan la capacidad de resolución de la imagen digital. Si la imagen digital es en color, la intensidad es considerada como un vector con tres dimensiones $F_1(x,y)$, $F_2(x,y)$ y $F_3(x,y)$, cuyas dimensiones son las intensidades en las bandas rojo, verde y azul en que es posible descomponer la imagen original en color.

Las dimensiones comunes de las imágenes digitales suelen ser de $512*512$, $756*756$ y $1024*1024$ *pixels*. Habitualmente se utilizan 8 *bits* por *pixel* para almacenar las intensidades de la imagen (256 niveles). Así, una imagen en color (RGB) con una dimensión de $756*756$ *pixels* ocupa 1,6 MB para ser almacenada.

Una vez que una escena ha sido observada, la imagen que la representa puede ser en blanco y negro, niveles de gris o en color. En este estudio se analizarán las imágenes tanto de color como de niveles de gris, de allí que sea necesario conocer las diferentes particularidades teóricas los fundamentos del color y sus sistemas de representación.

II.2.2 Fundamentos del Color.

Según Lillo *et al.* (1995): “el color es una característica de la respuesta perceptiva que se da en un individuo y que guarda relación con algunas características físicas de los objetos”. El Comité de colorimetría de la sociedad Óptica de América definió el color como: “La sensación visual que se origina por la estimulación de la retina de ojo”. En 1666 Isaac Newton descubrió que cuando un rayo de luz solar pasa a través de un prisma de cristal, el rayo de luz que sale está formado por un espectro continuo de colores (Figura 6) que, en términos generales, está formado por las siguientes seis regiones: violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo.

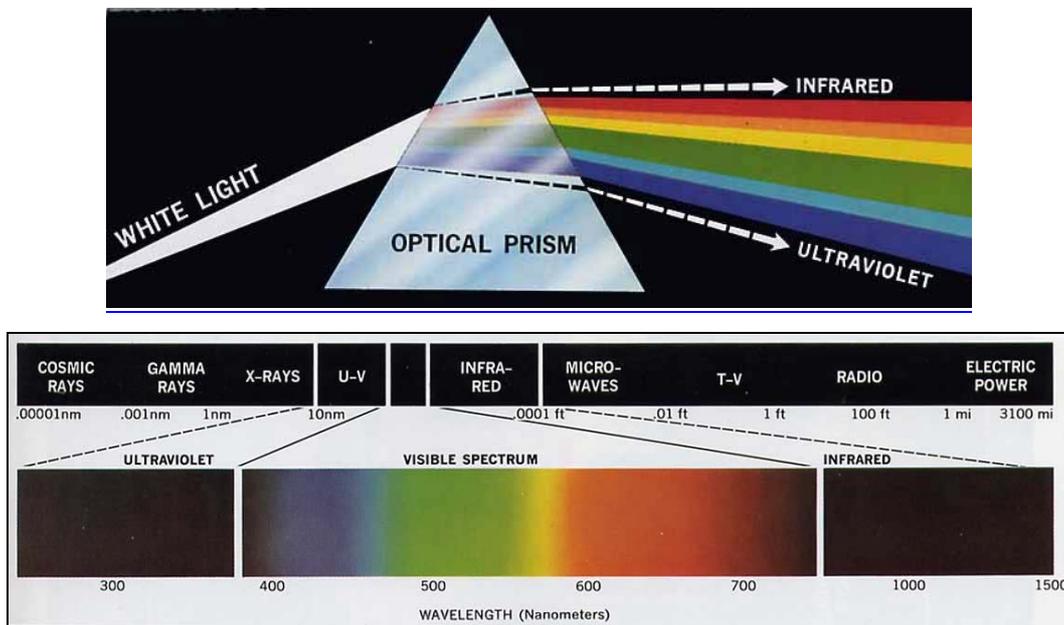


Figura 6. Espectro de colores en que se descompone la luz blanca.

Fuente: General Electric Co., Lamp Business Division.

Según esto, los colores que los seres humanos perciben cuando observan un objeto, están marcados por la naturaleza de la luz que refleja este objeto. Así, el cuerpo que refleja luz equilibrada en todas las longitudes de onda del espectro visible aparece blanco. Si la reflexión pertenece a un rango limitado del espectro el cuerpo aparecerá con un color.

En el caso de que la luz no tenga color, su único atributo es la intensidad. Para una luz con color, el espectro electromagnético de luz visible está entre aproximadamente 400 nm y 700 nm. En una luz con color, se usan tres parámetros para definirla: radiancia, luminancia y brillo. La radiancia representa la cantidad de luz que incide en una escena (energía). La luminancia es una medida de la cantidad de energía que el observador percibe. Finalmente, el brillo describe la sensación de color (intensidad del color), este parámetro lleva asociado el concepto de luz sin color y es muy difícil medirlo (Molina, 1998 y Lillo *et al.* 1996).

Según la percepción humana (debido a la estructura del ojo), todos los colores apreciables se pueden formar por la combinación de los llamados colores básicos: rojo ("R" por *red*), verde ("G" por *green*) y azul ("B" por *blue*). La Comisión Internacional de la Iluminación CIE, con el fin de unificar criterios y producir un *standard*, designó en 1931 las longitudes de onda correspondientes a los tres colores primarios: Azul (B) = 435.8 nm; Verde (G) = 546.1 nm y Rojo (R) = 700 nm. Sin embargo, es conocido que un solo color no puede ser llamado rojo, verde o azul. Por lo tanto, tener tres colores con estas específicas longitudes de onda, no significa garantía de poder generar todos los colores. Erróneamente se piensa que estos tres colores mezclados pueden producir todos los colores visibles, más cierto sería si se permitiese variar las longitudes de onda del rojo, verde y azul (Molina, 1998). Aunque existe otro procedimiento para generar colores a través de la sustracción de colores básicos (rojo, azul y amarillo), éste no será descrito por no ser utilizado en esta investigación.

Kueppers divide cada una de las fuerzas de sensación, es decir cada Color Fundamental (rojo verde y azul), en 99 pequeños paquetes de energía denominados cuantos de sensación. De esta manera se tienen un millón posibilidades de colores, distinguiendo particularmente 8 colores denominados elementales (negro, azul, verde, rojo, cian, magenta, amarillo y blanco). Cada uno de los Códigos de Colores Fundamentales describe una sensación posible y al mismo tiempo un punto geométrico en el Espacio del color del Romboedro (Figura 7).

A partir del Código de Color Fundamental se puede calcular el código de Color Elemental, es decir, cuantas componentes de 8 posibilidades extremas de sensación cooperan para formar un matiz en el sistema visual (Figura 7).



Azul	Verde	Rojo	Colores Elementales	
00	00	00	Negro	
99	00	00	Azul	
00	99	00	Verde	
00	00	99	Rojo	
99	99	00	Cian	
99	00	99	Magenta	
00	99	99	Amarillo	
99	99	99	Blanco	

Figura 7. Suma de colores primarios y su representación hexagonal.

Fuente: Küppers, H (2003).

Las características que generalmente se usan a fin de distinguir un color de otro son el brillo, matiz y saturación. El brillo está asociado al concepto de intensidad, el matiz es un atributo asociado a la longitud de onda dominante en la mezcla de las ondas luminosas y la saturación hace referencia a la cantidad de luz blanca mezclada con el matiz. Los colores puros del espectro están completamente saturados. Una ampliación de estos conceptos será realizada con más detalle dentro de los sistemas de representación.

II.2.3 Modelos de Representación del Color

Con el fin de facilitar la especificación del color de una forma normalizada (*standard*), han sido desarrollados los llamados modelos de color. En concreto, un modelo de color es una representación tridimensional donde cada color representa un punto en ese espacio.

En su mayor parte, el uso de los modelos de color está orientado a aplicaciones de manipulación de color, concretamente hacia el *hardware* como monitores o impresoras. Para la manipulación del color se utilizan usualmente los modelos **HSI** (matiz- saturación-intensidad) y **HSV** (matiz-saturación-valor). El modelo orientado a *hardware* más común es el **RGB** (rojo, verde azul), el modelo **CMY** (cian-magenta-amarillo) para impresoras en color y el **YIQ** (luminancia-dos componentes cromáticas) para la difusión de TV (Molina, 1998).

Los modelos de color con mayor difusión en el procesamiento y análisis digital de imágenes son RGB, YIQ y HSI. Por ello, serán los sistemas que se estudien con más detalle.

II.2.3.1 Modelo RGB

Este modelo está basado en la representación de los colores en un sistema de coordenadas donde los ejes son los colores primarios rojo, verde y azul. Un esquema gráfico de esta representación puede verse a continuación (Figura 8).

Por conveniencia se supone que todos los colores han sido normalizados de forma que el cubo (espacio de interés) es unitario, es decir, que los valores de rojo, verde y azul están en el rango (0,1).

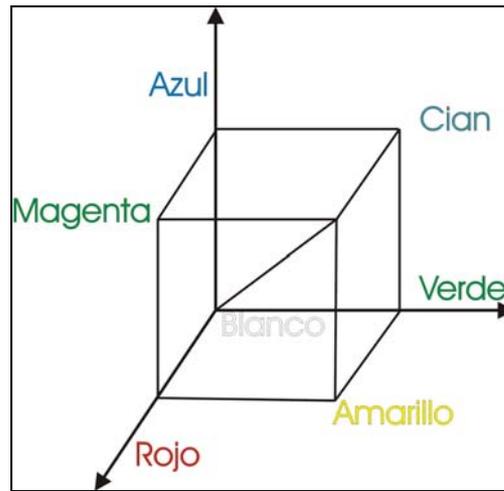


Figura 8. Cubo de color RGB

Fuente: Niblack (1985).

En el procesamiento de imágenes, el uso del modelo RGB tiene mucho sentido cuando, como en este caso, las imágenes adquiridas por la cámara de video 3 CCD (*Charge Coupled Device*) vienen expresadas en términos de estos tres planos de colores. La descomposición de una imagen en color en las bandas roja, verde y azul se presentan en la Figura 9.

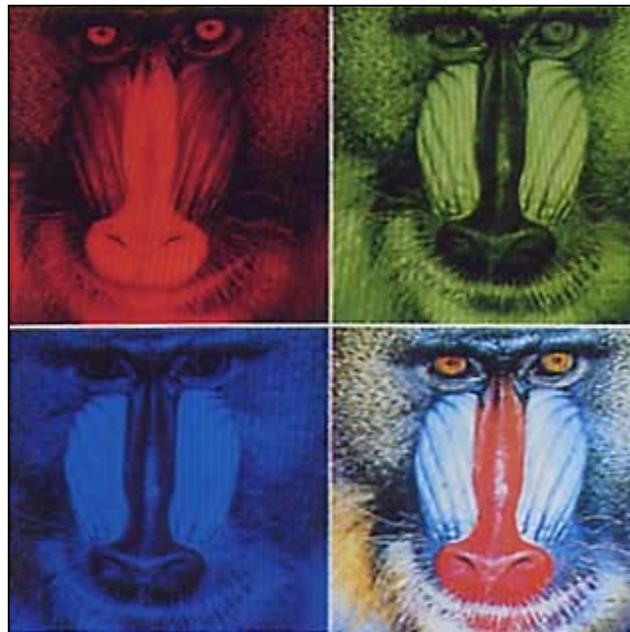


Figura 9. Imagen en color (RGB) descompuesta en las bandas rojo, verde y azul.

Fuente: Niblack (1985).

II.2.3.2 Modelo HSI

El modelo HSI es un sistema que descompone la imágenes en los siguientes tres parámetros: Tono o Matiz (*Hue*), Saturación (*Saturation*) e Intensidad (*Intensity*). El matiz es un atributo de la pureza del color, la saturación es la medida del grado en el que el color puro se diluye con luz blanca y la intensidad se asocia al brillo.

En este modelo, la intensidad se separa de la información de color y las otras dos componentes se relacionan con la forma en que el ser humano percibe el color. Esto genera que este modelo sea apropiado en el procesamiento de imágenes basados en el sistema de visión humano. Una representación gráfica (Figura 10) incluyendo las tres propiedades anteriores genera el denominado "espacio - color". En el perímetro del disco están situados los colores azul, magenta, rojo, amarillo, verde y cian, separados 60° uno de otro.

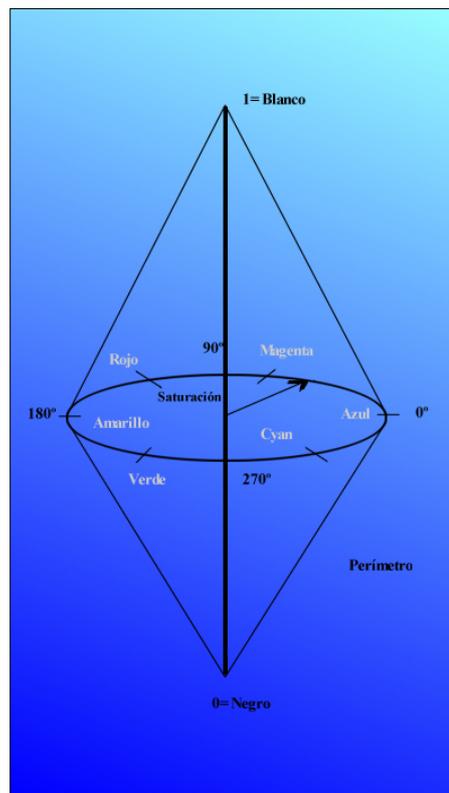


Figura 10. Imagen en los planos tono (H), saturación (S) e intensidad (I).

Cada punto del perímetro describe un color que es mezcla de los dos adyacentes. Un punto que no esté en el perímetro contendrá una mezcla de todos. Por lo tanto, estos puntos describen colores pastel que contienen una cierta cantidad de blanco. La distancia al centro (radio) indicará la saturación del color. El brillo depende de la altura en el doble cono, toma un valor entre 0 y 1. El brillo es la intensidad del color; el punto medio del disco central describe un blanco de intensidad media. La conversión de un modelo RGB a un HSI es apreciable en las siguiente secuencia de imágenes (Figura 11).

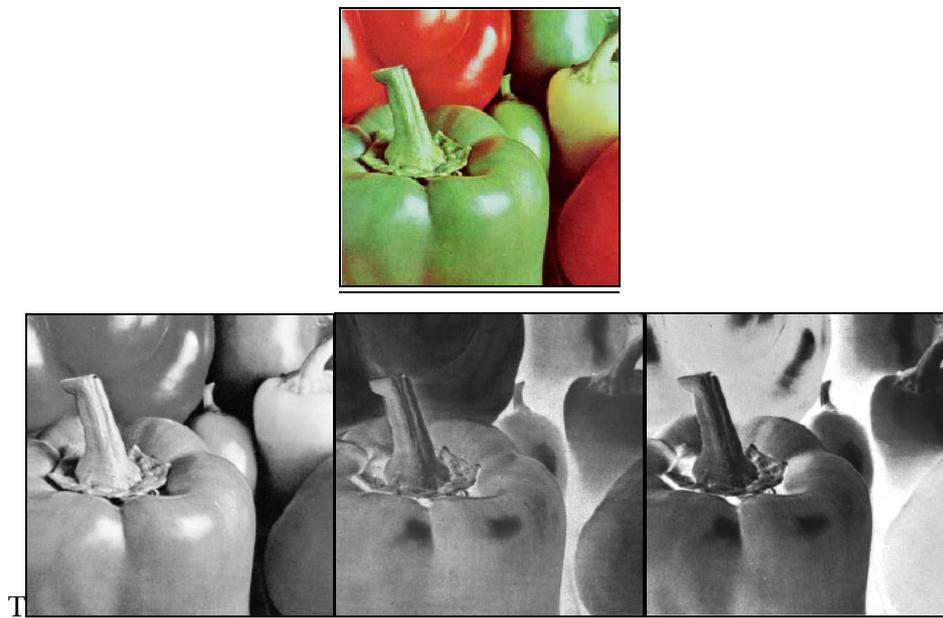


Figura 11. Imagen RGB e imágenes Matiz o tono (H), saturación (S) e intensidad (I).

Fuente: Molina (1998).

El modelo HSI es puede obtenerse a partir del modelo RGB. La obtención de valores HSI de unos valores de RGB, en el mismo rango, es la siguiente:

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{\left[\frac{(R-G)^2(R-B)(G-B)}{2} \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad I = \frac{1}{3}(R+G+B)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)}(\min(R, G, B))$$

II.2.3.3 Modelo YIQ

El modelo YIQ es una recodificación del modelo RGB y su aplicación es en la transmisión de señales por TV. El desarrollo de este sistema tomó en cuenta las características del sistema visual humano para apreciar con mayor facilidad los cambios de luminancia (Y) que los de matiz o saturación y así, asignar más *bits* a la representación del parámetro luminancia (Y) que a los de color (I) y (Q).

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,275 & -0,321 \\ 0,212 & -0,523 & 0,311 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

La importancia de este modelo es la separación de la información luminancia (Y) de la de color (I y Q), lo que permite procesar la luminancia sin afectar el color. La conversión de un modelo RGB a un YIQ es apreciable en las siguiente secuencia de imágenes (Figura 12).

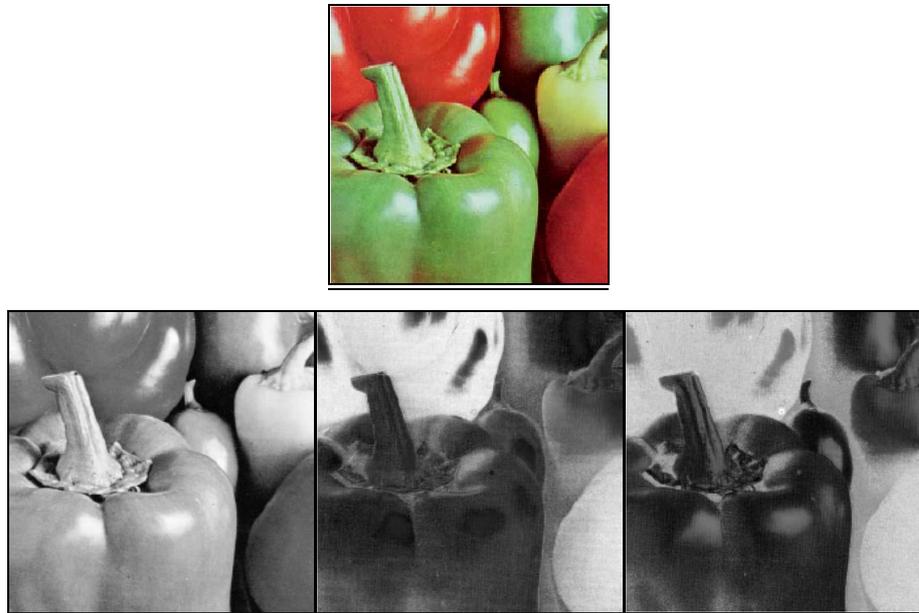


Figura 12. Imagen RGB e imágenes de luminancia (Y) y comp. cromáticas (I)-(Q).

Fuente: Molina (1998).

II.2.3.4 Triángulo cromático CIE

En el Triángulo Cromático CIE (Commission Internationale de L'éclairage), todos los colores están ordenados respecto a tres coordenadas cromáticas x , y , z , cumpliéndose la igualdad $x + y + z = 1$ (Figura 13). Esto significa que a partir de dos coordenadas cualesquiera puede definirse un color ó mezcla de colores. En realidad, este sistema deriva de sistemas planteados inicialmente por la CIE en los que los coeficientes triestímulos primarios necesarios para conseguir adaptar un color son a veces negativos.

El triángulo presenta una forma curva en su parte superior que es el lugar geométrico de las radiaciones monocromáticas, cerrándose en su parte inferior por una línea recta llamada "línea de los púrpura". La zona central del triángulo es acromática y sobre ella se pueden localizar los colores de todas las fuentes de luz artificial. El centro de esta zona es un punto blanco donde los valores de las coordenadas x , y , z son iguales entre sí (0.333 cada una). Cuanto más alejado del centro esté el punto buscado, más saturado será el color resultante.

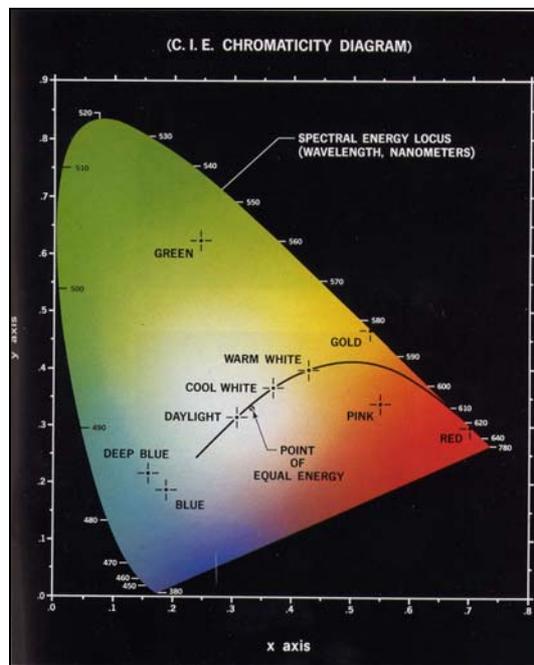


Figura 13. Diagrama cromático CIE.

Fuente: General Electric Co.

II.2.4 Antecedentes del Procesamiento y Análisis de Imagen

Históricamente la primera aplicación de las técnicas de imágenes digitales puede fecharse a principio de los años veinte, con la transmisión de imágenes periodísticas entre Londres y New York por el cable submarino que unía estas dos ciudades. Esto permitió que el tiempo requerido para transportar una imagen a través del Atlántico de más de una semana pasara a menos de tres horas. Las imágenes para su transmisión por cable eran codificadas en su origen, luego, reconstruidas por un equipo especial de impresión en destino. Estas imágenes estaban compuestas en un principio por cinco tonos de gris, pero posteriormente con el desarrollo de las técnicas de codificación y reproducción de las imágenes se logró la representación de imágenes en quince tonos de gris.

En realidad, estos antecedentes pueden considerarse aislados ya que no es hasta los años 50-60, debido al inicio de la carrera espacial y a la fabricación de los primeros ordenadores, cuando estas técnicas empiezan a ser desarrolladas de forma sistemática. La principal investigación para mejorar las imágenes provenientes del espacio con la utilización de computadoras correspondió al Jet Propulsion Laboratory (Pasadena-California) en 1964.

Como consecuencia de los resultados obtenidos en el tratamiento y procesado de imágenes satelitales, fueron ejecutados nuevos proyectos de investigación entre finales de los sesenta y los años setenta. Estos estudios se enfocaron al desarrollo de técnicas relativas tanto al estudio de los mecanismos de la visión como al tratamiento y análisis digital de imágenes. El National Institute of Health (EEUU) dedicó considerable esfuerzo al estudio de imágenes de microscopía óptica y electrónica, estableciendo de esta forma un método alternativo al del contador de puntos (Thompson, 1930) para la cuantificación de parámetros petrográficos (Chayes, 1956). Durante la década de los setenta, surgen los estudios sobre cuantificación de parámetros petrográficos mediante análisis de imágenes; éstos se aplicaron al análisis y cuantificación de porosidad en rocas sedimentarias (Delfiner, Etienne and Fonk, 1972 y Rink and Schopper, 1978), etc.

Los profesores G. Matheron y J. Serra de la École National Supérieure des Mines de París (Francia), a finales de los setenta, desarrollaron a partir de resultados de la geometría integral y del cálculo de probabilidades la metodología denominada morfología matemática, para la caracterización y medición de formas. Esta metodología ha tenido su principal aplicación en los campos de la Geología (Petrografía), la Biología y la Medicina. Fabbri (1984) describe varios aspectos en la cuantificación y caracterización de texturas en rocas cristalinas a partir de la digitalización de las trazas en los bordes de grano.

A partir de este momento se inicia el comienzo de cierta especialización y catalogación de las técnicas existentes. Así mismo, aparecen los conceptos de técnicas para el procesamiento y análisis de imágenes digitales. El procesamiento se define como el conjunto de todas aquellas técnicas relacionadas con la adquisición, digitalización, tratamiento y representación de las imágenes, sin introducir sobre las mismas ningún tipo de interpretación. Por su parte, el análisis se refiere a aquellas técnicas que tratan de extraer la información presente en la imagen (segmentación) con el fin último de hacer una interpretación de los datos representados por dicha imagen.

En los años ochenta las técnicas de ADI se desarrollan de forma vertiginosa, debido al espectacular impulso de la microelectrónica, que repercutió en un considerable aumento de las prestaciones de los equipos informáticos. Las mayores contribuciones se han centrado en el desarrollo de algoritmos para la detección de características (bordes, líneas, texturas) que ayudan a definir lo que Marr (1982) llamó el esbozo primitivo, así como en el desarrollo de técnicas globales de segmentación de una imagen en regiones.

A partir de la década de los noventa se inicia un creciente interés hacia el desarrollo de nuevas teorías y algoritmos para la interpretación de la imagen 2D como proyecciones de escenas 3D. En particular, cabe mencionar los problemas asociados a la reconstrucción de escenas a partir de distintas proyecciones (Cabri *et al*, 1990), el estudio del flujo óptico y sus múltiples aplicaciones a la caracterización de superficies 3D, la caracterización de superficies a partir del estudio del movimiento, las técnicas de representación y búsqueda de objetos, etc.

II.2.5 Elementos del Equipo de Análisis Digital de Imagen

En términos generales, el sistema de análisis y procesamiento de imagen está formado por un dispositivo para adquisición de imágenes y una estación de trabajo con tarjeta *hardware* y *software* especiales para trabajo con imágenes digitales. Para este estudio en particular se incluyen como elementos del equipo de ADI el microscopio óptico de reflexión y la fuente de luz utilizados. Los sistemas comúnmente utilizados para la captura de imágenes son las cámaras fotográficas digitales, los *scanners* y las cámaras de video. A continuación serán descritos los elementos del equipo de ADI.

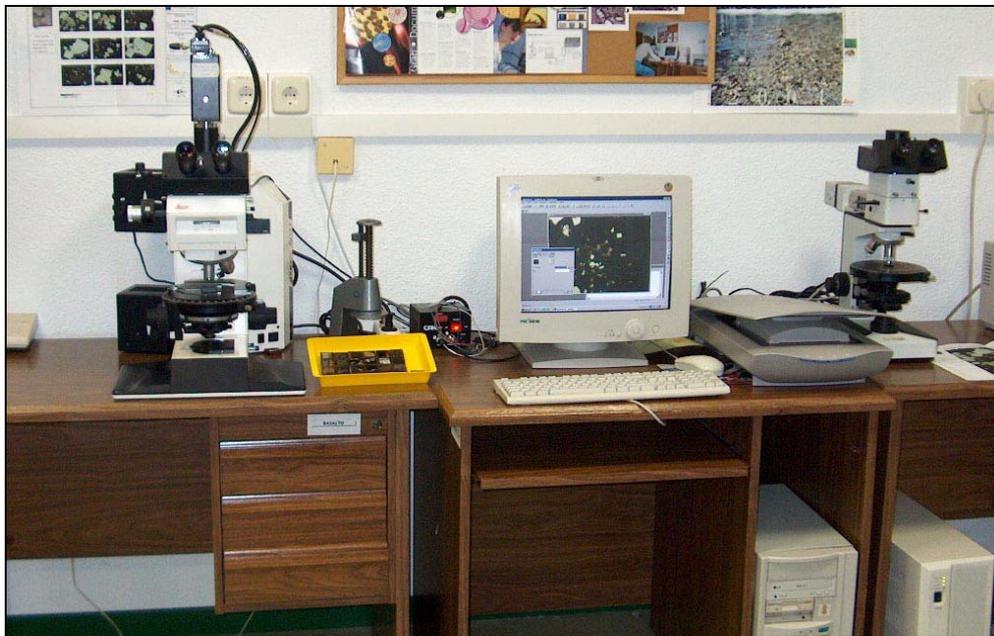


Figura 14. Equipo de Análisis Digital de Imagen.

Fuente: Laboratorio de Microscopía Aplicada y ADI. Dep. Ing Geológica. ETSIM de Madrid

II.2.5.1 Cámara de Video 3 CCD (*Charge Coupled Device*)

Uno de los más importantes sistemas de captación de imágenes digitales es la cámara de video. Existen dos tipos fundamentales: las de tubo y las CCD. Las cámaras de tubo están formadas por un tubo fotosensible cuya respuesta es proporcional a la intensidad de luz incidente. Si la cámara es en color, habrá tres tubos con sus

respectivos filtros. Actualmente, las cámaras de tipo CCD (Figura 15) son la más utilizadas debido a su versatilidad y prestación. Este tipo de cámaras están formadas por una matriz de elementos sensibles a la luz (fotodiodos). Cada uno de ellos mide la intensidad de luz en un punto de la imagen. La cámara de video utilizada en el presente estudio es del tipo CCD, y tiene las siguientes características técnicas:



Figura 15. Cámara video CCD Sony.

CAMARA VIDEO CCD: SONY -Modelo DOPHINSA 3CCD -

Sistema de Imagen

- Dispositivo de la imagen: 1/3 inch. CCD.
- 752 (H) * 582 (V) pixels.
- Iluminación mínima: 31 lux.
- Sensibilidad: 2 000 lux.
- Área sensible: 6.00 mm * 4.96 mm.
- Salidas RGB (con SYNC), Y/C
- Agitación de pixels: ± 3 ns.

Sistema Óptico

- Sistema de señal: PAL color system.
- 625 scanning lines.
- Sincronización externa e interna.
- Frecuencia de scanning: (H) 15.625 KHz, (V) 50.00 KHz.
- Resolución horizontal: 570 líneas de TV.
- Resolución Vertical: 575 líneas de TV.
- Velocidad de captura: variable.
- Balance de Blanco: Manual y Automático.

Fuente: Sony

II.2.5.2 Procesador de imagen o tarjeta digitalizadora (*frame-grabber*)

Consiste básicamente en varios convertidores analógico-digital (A/D) para digitalizar la imagen recogida por la cámara de video CCD, memoria para permitir almacenar imágenes, tablas de color (VLT o LUT, *Video Look up Table*) para traducción de los valores de la imagen digital y convertidores analógico-digital (A/D) para la visualización de imágenes en el monitor. La tarjeta digitalizadora (Figura 16) se encuentra incorporada a la unidad central de la estación de trabajo haciendo posible la gestión de la información desde el ordenador.

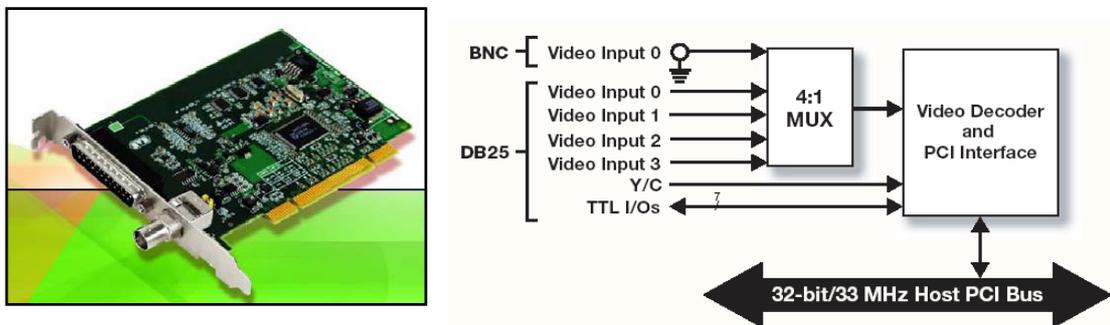


Figura 16. Tarjeta digitalizadora Matrox. Foto: Matrox Imaging. -Fabrímex-

Las características técnicas de la tarjeta digitalizadora utilizada son las siguientes:

TARJETA DIGITALIZADORA: *Matrox -Modelo Meteor-*

- Transfiere información con señal de entrada vídeo PAL en tiempo real.
- Captura en color (RGB) con resolución 768*576 puntos.
- Agitación de *pixels*: ± 3 ns
- Interfase analógica:
 - Con selección de entrada.
 - Triple convertido analógico-digital (A/D) de 8 bits.
 - Sampling rate: 14.75 MHz PAL.
- Ajuste de vídeo:
 - Canales de ajuste Rojo, Azul y Verde independientes.

Fuente: Matrox

II.2.5.3 Estación Central

Conocido también como ordenador central (Figura 17), debe contar con un potente procesador numérico y gran capacidad de disco duro para gestionar con velocidad y de manera eficiente la información a tratar.



Figura 17. Ordenador Personal Pentium IV.

El ordenador utilizado en este proyecto tiene las siguientes características:

Estación de Trabajo: Pentium IV

- Disco duro: Toshiba MK 20118GAS 20 Gigas Bytes.
- Memoria RAM: 512 MB.
- Monitor: Mitsubshi 17 pulgadas.
- Periféricos: CD writer + 9100, CD-ROM 52X, Lector Zip 100 Mega Bytes, Disquetera 1.44 Mega Bytes.
- Procesador: INTEL 1,2 GB.
- Puertos: 2 USB.
- Sistema Operativo: Windows 2000.

Fuente: Fabricante

II.2.5.4 Software ADI

El *software* son las instrucciones electrónicas que van a indicar al ordenador que es lo que tiene que hacer. También se puede decir que son los programas usados para dirigir las funciones de un sistema de computación o un *hardware*. Si se trata de un *software* científico, éste ha sido diseñado para la resolución de aplicaciones del entorno científico relacionado con la bio-medicina, los materiales, la geología, la física, etc., si bien también se utiliza con gran profusión en el entorno industrial y en los laboratorios de control de calidad.

El *software* de análisis de imagen en muchas ocasiones está ligado a la investigación a través de microscopio pero también puede estar relacionado con cualquier otro método de captura de imagen, cuyo resultado deba obtenerse mediante el proceso y el análisis de la imagen. Estos programas también tienen la opción de programación básica, con el fin de dar más potencia y flexibilidad en el caso que sea necesario.

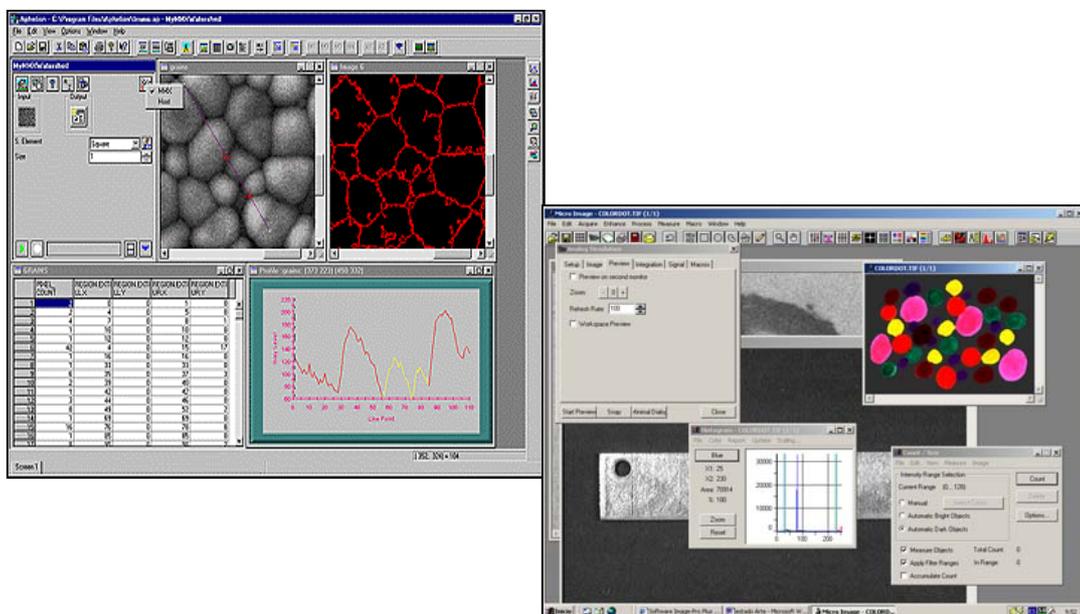


Figura 18. Ventanas principales de *Software* de ADI *MicroImage* y *Aphelion*.

En muchos aspectos, el análisis de imágenes digitales petrográficas tiene mucho en común con el análisis de imágenes satelitales. En ambos casos la información es obtenida a través de sensores. En teledetección a través de sensores multiespectrales mientras que en el ADI aplicado a petrografía por medio de la cámara de vídeo CCD. Como base para desarrollar el sistema planteado se ha utilizado el *software* APHELION. Las características técnicas principales de este programa son:

Software: APHELION 3.1

- *Important libraries available as ActiveX controls, for easy integration into third-party products.*
- *TWAIN interface for convenient image input from any external device.*
- *Calibration interface, especially designed for microscope users.*
- *Intel MMX support for dramatically improved performance of classic Image Processing functions (image processing, segmentation, mathematical morphology, and recognition operators).*
- *Message Passing between windows in the GUI to facilitate image and data exploration.*
- *Porting Kit to help users and hardware manufacturers interface non-supported frame grabbers.*
- *Pen/Eraser and other interactive tools for rapid measurement computation.*
- *Drivers for the Corona, IC-PCI with AM-STD, FlashPoint, IV450, Meteor RGB, and Pulsar boards.*
- *Visual Basic compatible scripting language.*

Fuente: Aphelion Developer

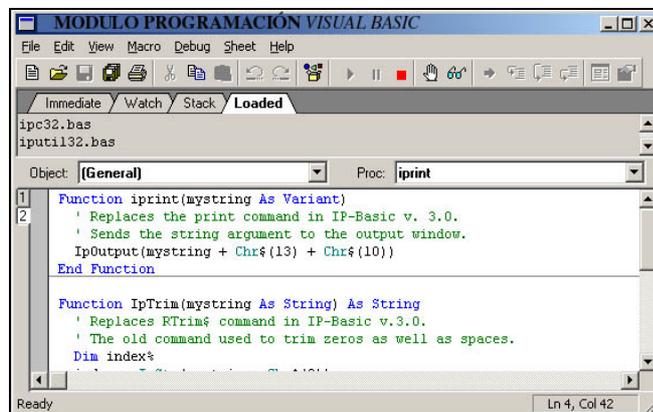


Figura 19. Ventana para programación en el *Software* de ADI.

II.2.5.5 Microscopio óptico de reflexión

El microscopio es un instrumento óptico que amplifica la imagen de un objeto pequeño. Además del aumento, una propiedad importante de un microscopio es su poder resolutivo, es decir, la capacidad de mostrar distintos y separados dos puntos muy cercanos. Cuanto mayor sea el poder resolutivo, mayor será la definición de un objeto.

Los microscopios de gran poder resolutivo son especialmente buenos para ver pequeñas estructuras. El poder resolutivo de un microscopio compuesto depende de la longitud de onda utilizada y de una propiedad óptica de la lente conocida como apertura numérica. Como los microscopios ópticos (Figura 20) utilizan luz visible, la longitud de onda está fijada y es por lo que la resolución de un objeto es función de la apertura numérica; cuanto mayor sea la apertura, el objeto resuelto será más pequeño. Un microscopio óptico esta formado por las siguientes partes.

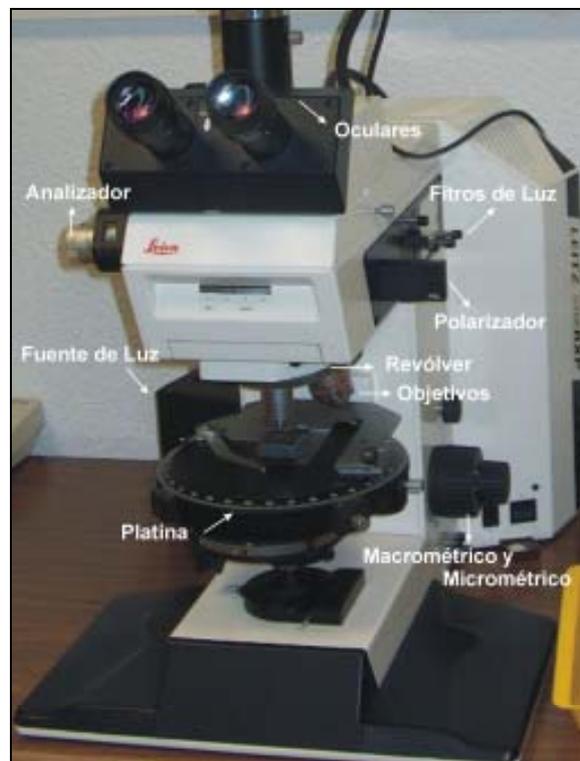


Figura 20. Descripción de las partes básicas de un microscopio (Leitz DMRXP).

Sistema óptico

- OCULAR: Lente situada cerca del ojo del observador. Amplía la imagen del objetivo.
- OBJETIVO: Lente situada cerca de la preparación. Amplía la imagen de ésta.
- CONDENSADOR: Lente que concentra los rayos luminosos sobre la preparación.
- DIAFRAGMA: Regula la cantidad de luz que entra en el condensador.
- FOCO: Dirige los rayos luminosos hacia el condensador.

Sistema mecánico

- SOPORTE: Mantiene la parte óptica. Tiene dos partes: el pie o base y el brazo.
- PLATINA: Lugar donde se deposita la preparación.
- CABEZAL: Contiene los sistemas de lentes oculares. Puede ser monocular, binocular, triocular.
- REVÓLVER: Contiene los sistemas de lentes objetivos. Permite, mediante un giro, el cambio de los objetivos.
- TORNILLOS DE ENFOQUE: Macrométrico que aproxima el enfoque y micrométrico que consigue el enfoque correcto.

Las características técnicas básicas del microscopio utilizado en el presente proyecto son:

MICROSCOPIO ÓPTICO DE REFLEXIÓN: LEICA -Modelo DM-RXP-

- Óptica: Plana corregida
- Fuente de luz: Lámpara halógena
- Objetivos: 20 X, 10 X, 5 X, 2.5 X
- Filtros: Azul (25 %).

Fuente: Casa Leica

II.2.5.6 Fuente de iluminación

Einstein postuló que la energía de un haz de luz, en lugar de estar distribuida en el espacio en los campos eléctricos y magnéticos de una onda electromagnética, estaba concentrada en fotones o cantidades discretas, sin negar la existencia de una onda electromagnética estableciendo así una dualidad entre ellas.

En nuestro trabajo aceptaremos la luz como una forma de energía capaz de excitar la retina humana y producir sensaciones visuales. La luz solar es el iluminante de referencia que servirá como elemento de evaluación y comparación subjetiva para cualquier otra luz diferente de ella. Objetivamente la diferencia de radiación se debe hacer por su composición espectral y su radiancia total. Por estas razones la CIE estableció una serie de iluminantes patrones, reproduciendo con medios artificiales la luz solar, especificando ciertas condiciones. En este trabajo se ha utilizado una lámpara halógena debido a que :

- Utilizan la energía de una manera más eficaz.
- Ofrecen una duración más larga, de hasta cinco veces la vida media estimada.
- Proporcionan una luz más blanca y más nítida.
- Proporcionan un mejor control de haz, permitiendo dirigir la luz con mucha más precisión.

La fuente de luz instalada en el microscopio utilizado tiene las siguientes especificaciones:

<p style="text-align: center;">FUENTE DE LUZ: OSRAM</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Tipo: Halógena➤ Voltaje: 12 V➤ Potencia: 100 W <p style="text-align: right;">Fuente: Osram</p>
--

II.2.5.7 Materiales de referencia y patrones

Los materiales en general pueden clasificarse en tres grupos: opacos, transparentes y translúcidos. Los cuerpos opacos no dejan que la radiación pase a través de ellos, los transparentes permiten que la radiación pase por ellos sin modificarla mayormente y los translucidos reflejan y transmiten la radiación incidente en distintas direcciones a la de incidencia. Un cuerpo está definido por cuatro propiedades dependientes todas ellas de la longitud de onda:

- absorbancia (α_λ)
- reflectancia (ρ_λ)
- transmitancia (τ_λ)
- difusividad (S_λ)

Las tres primeras propiedades hacen referencia a la relación entre la radiación incidente sobre el material, mientras que la difusividad indica su propiedad de transportar partículas eléctricas como electrones.

En colorimetría es importante conocer la capacidad de su superficie para reflejar la radiación que incide sobre ella, para materiales opacos resulta complicado referirse a un patrón. La referencia o patrón para evaluar las características de otros materiales más selectivos es que sea un material opaco mate casi ideal (difusor perfecto), que su reflectancia sea igual a 1 y que su absorbancia sea independiente de la longitud de onda.

Si el patrón de reflexión tiene un porcentaje de reflexión igual para luz roja, verde y azul, éste se considera como patrón blanco. La Commission Internationale de L'éclairage (CIE) recomienda como patrón Sulfato de Bario (SO_4Ba) denominado *Eastman White Reflectance Standard* (KODAK, 1969) y "Hanlon" (Grum y Bartleson, 1980) que es un polímero fluorinado alipático.

Los patrones utilizados en este trabajo son los habitualmente empleados en la calibración de reflectómetros. Son 4 patrones (Figura 21), con porcentajes de reflexión equivalentes a 60%, 50%, 41 % y 17% respectivamente, dos de ellos de la casa Leitz y los otros dos fabricados y calibrados para este laboratorio por el Dr. Bernhardt (Ruhr-Universitat Bochum, Alemania).



Figura 21. Patrones utilizados.

II.2.6 Secuencia del Proceso y Análisis de Imágenes.

Normalmente, la secuencia de tareas llevada a cabo para obtener unos resultados concretos de la aplicación del ADI implica la realización de una serie de procesos, que van desde la adquisición de la imagen hasta la obtención del resultado deseado.

González & Wintz (1993) definen cuatro etapas en el proceso de imágenes: Digitalización de las imágenes; tratamiento de las imágenes (realce y restauración); codificación de las imágenes y, finalmente, segmentación y representación de las imágenes. Otros investigadores (Rosenfeld & Kak, 1982) distinguen tres etapas dentro del campo de ADI: Digitalización y compresión de las imágenes; realce, restauración y reconstrucción; comparación, descripción y reconocimiento. Russ (1990) establece una clasificación más detallada que se presenta a continuación (Figura 22).

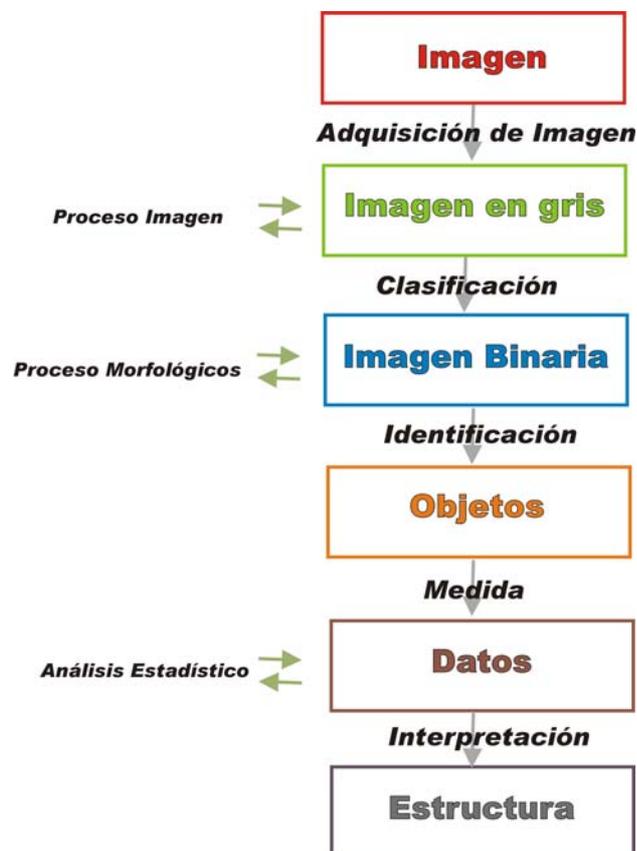


Figura 22. Principales etapas del ADI (modificado Russ J.C. 1990).

La adquisición de la imagen digital es el primer paso en el procesado de la imagen. Para ello es necesario un equipo con la capacidad de digitalizar la señal producida por el sensor. La adquisición de imágenes es el proceso mediante el cual una imagen analógica es digitalizada y almacenada en memoria. Es importante señalar que la adquisición de una imagen, de mayor o menor calidad, supone un paso decisivo que influirá de manera directa sobre todas las operaciones posteriores, dando lugar a un mayor o menor grado de fiabilidad en los datos obtenidos y medidas realizadas con posterioridad.

El Proceso de Imagen incluye las operaciones donde el resultado final es otra imagen. Entre las operaciones están aquellas que afectan a los valores de gris (filtros, transformadas, procesos morfológicos, etc) y operaciones que alteran las coordenadas de los *pixels* (rotaciones, traslaciones, etc).

Según Molina (1998): “el principal objetivo de las técnicas de mejora de imágenes es procesar una imagen dada de forma que la imagen resultante sea más apropiada que la imagen original para unas aplicaciones específicas o concretas” Es decir, el fin de estas operaciones es realzar la información en zonas interesantes de la imagen, corregir defectos originales de ellas y comparar las imágenes, etc.

Para este estudio, las técnicas de tratamiento estarán enfocadas a mejorar la imagen original. Es decir, a la aplicación de técnicas de mejora del contraste y eliminación de ruido. Entre la amplia variedad de técnicas de procesado de imagen destacamos las presentadas por Friel *et al.* (2000) y son las siguientes.

- a) Las de procesamiento puntual, que en forma general permiten cambiar el valor puntual de la imagen sin tomar en cuenta la información local. Ejemplos podrían ser: Compresión de rango, ampliación de contraste, potenciación, promediado de imágenes, etc. La técnica aplicada en este estudio es la del promediado de imágenes a fin de eliminar ruidos parásitos. El detalle de esta técnica será descrito con detalle en la metodología de trabajo.

- b) Las de Modificación del Histograma, aunque podrían entenderse como del grupo anterior, sus características especiales obligan a un estudio independiente. En forma resumida podemos decir que esta técnica modifica los *pixels* de una imagen por medio de una función de transformación basada en la distribución total de los niveles de gris presentes en la imagen.
- c) Las de filtrado espacial están basadas en el uso de plantillas espaciales (matrices). Existen dos tipos de filtrados: lineales y no lineales. Los lineales son de la forma:

$$g(i, j) = \sum_{m,n \in M} h((i-m, j-n)) f(m, n)$$

Donde: $f(m, n)$ es imagen de entrada, $g(i, j)$ imagen de salida y $h(i, j)$ es el llamado núcleo de convolución. Un retículo de vecinos (Matriz) M rectangular con un número impar de filas y columnas. Entre este tipo de filtros tenemos los siguientes.

- Filtros paso bajo (*low pass*): Atenúan o eliminan las componentes de alta frecuencia actuando sobre los detalles con alta variación en las imágenes.
- Filtros paso alto (*high pass*): Amplían las componentes de alta frecuencia actuando sobre los detalles con alta variación en las imágenes.

Es importante indicar que la operación básica de estos filtros es sumar los productos entre los cocientes de la plantilla y las intensidades de los *pixels* en la plantilla.

<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>
<i>M4</i>	<i>M5</i>	<i>M6</i>
<i>M7</i>	<i>M8</i>	<i>M9</i>

<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>
<i>N4</i>	<i>N5</i>	<i>N6</i>
<i>N7</i>	<i>N8</i>	<i>N9</i>

$$\text{Final Central} = (M1*N1 + M2*N2 +M9*N9) / 9$$

Los filtros no lineales operan sobre sus vecinos basando sus operaciones directamente en los valores de los *pixels* que se consideran y sin usar coeficientes en la forma de los filtros lineales. Así, es posible por ejemplo reducir el ruido reemplazando el valor de un píxel por el valor: mediana, media, etc., de entre un grupo de *pixels* vecinos.

<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>
<i>N4</i>	<i>N5</i>	<i>N6</i>
<i>N7</i>	<i>N8</i>	<i>N9</i>

$$\text{Final Central} = \text{mediana} (N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9)$$

$$\text{Final Central} = \text{media} (N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9)$$

- d) Finalmente, las de tratamiento en el dominio de frecuencias, basadas en el teorema de convolución. La mejora en el dominio de frecuencias está basada en el cálculo de la transformada de Fourier de la imagen que queremos mejorar, multiplicada por una función de transferencia, un filtro y el cálculo de la inversa de la transformada para producir la imagen mejorada.

Una técnica relativamente joven de procesamiento y análisis de imágenes es la Morfología Matemática. Esta técnica ha demostrado gran capacidad para solventar una amplia gama de problemas sobre imágenes binarias (en blanco y negro) o numéricas (en escala de grises o a color).

El rango de aplicaciones de la morfología es grande, principalmente en el estudio de tamaños y formas de partículas microscópicas. Suele ser en algunos casos la opción más eficiente y de más fácil implementación (Real Jurado, 2002).

La clasificación y extracción de características tiene el fin de obtener de la imagen digital aquello que nos interesa: “objetos”, eliminando el resto de los elementos. El resultado de este proceso deriva en la extracción de una imagen binaria donde cada punto de la imagen tiene valor (1) o (0), o en otras palabras, blanco o negro. Las imágenes binarias pueden ser tratadas, si es necesario, con técnicas de restauración o reconstrucción (Serra, 1982 y 1988), como erosión, dilatación, esqueletización, etc.

El primer paso del proceso de extracción de información es segmentar la imagen en “regiones” (grupo de *pixels* con propiedades similares). La correspondencia entre las “regiones” y los “objetos” de la escenas, representa el condicionante esencial para que la interpretación sea correcta. En la realidad, debido a errores en la segmentación, la correspondencia entre regiones y objetos será imperfecta.

Existen dos aproximaciones para diferenciar una imagen en regiones: la segmentación basada en regiones y la estimación de la frontera utilizando detectores de borde.

- En la estimación basada en regiones, los *pixels* que corresponden a un objeto se agrupan juntos para indicar que pertenecen a una región. Los *pixels* son asignados a regiones según algún criterio que los diferencia o distingue del resto de la imagen. Es importante tomar en cuenta el valor de similitud y proximidad espacial de los *pixels* a la hora de su clasificación en regiones. Esos principios aparecerán por la hipótesis de partida, que dice que los puntos de un mismo objeto producirán en la imagen *pixels* con nivel de gris similares y espacialmente próximos (Russ, 1991 y Rosenfeld, 1979).

- En el caso de la estimación de la frontera o del borde de los objetos, el procedimiento se basa, al contrario que en el caso anterior, en el principio de disparidad. Es decir, en detectar los *pixels* que suelen tener diferentes niveles de gris a cada lado (*pixeles* frontera) a través de medir las diferencias entre *píxels* vecinos.

La medida de los diferentes parámetros será realizada sobre las imágenes binarias y posteriormente sometida a tratamiento estadístico que nos facilite su interpretación. Finalmente, los datos medidos serán interpretados a fin de obtener una descripción significativa de la estructura que representan, basándose en las relaciones de los parámetros bidimensionales para extraer estructuras tridimensionales que estudia la estereología.

II.3 APLICACIÓN DEL ADI EN LA CARACTERIZACIÓN DE MENAS

II.3.1 Introducción

Los primeros pasos en la cuantificación de parámetros petrográficos fueron dados por Dellese en 1848, Sorby en 1856 y Rosiwall en 1898. En 1936, Thompson propone el método del contador de puntos que basado en relacionar el grado de proporciones volumétricas de un agregado respecto al número de puntos de una plantilla colocada sobre una sección cualquiera orientada aleatoriamente, que caen sobre cada constituyente. Actualmente, la caracterización, cuantificación y mapeo de las fases minerales opacas presentes en una sección pulida se obtiene de la utilización de la técnica de ADI.

En el caso particular de las imágenes microscópicas, las distintas técnicas microscópicas permiten observar una misma zona desde diferentes perspectivas (bandas electromagnéticas) pudiéndose considerar cada una de las imágenes obtenidas como diferentes bandas de la misma imagen (Montoto *et al.*, 1987; Bel-Lan, 1978 y 1984; Martínez-Nistal, 1984 y 1993).

La utilización de varias imágenes de una misma escena permiten una clasificación y extracción de características más eficientes y es a lo que se denomina Análisis Multiespectral. Este término en análisis digital de micro-imágenes petrográficas es equivalente al término multibanda utilizado en teledetección.

En general, multiespectral se refiere a la información de una misma localización geográfica con diferentes respuestas según el espectro electromagnético.

II.3.3 Enfoques del ADI en la caracterización de menas metálicas

En términos generales se puede decir que la aplicación de la técnica de ADI en la caracterización de menas metálicas presentes en secciones pulidas, ha seguido los siguientes enfoques:

1. Imágenes digitales en nivel de gris obtenidas a partir del Microscopio Electrónico de Barrido, MEB.

El funcionamiento del MEB se basa en la incidencia de una haz de electrones sobre la muestra lo que provoca la emisión, entre otras señales, de electrones secundarios y rayos X característicos. Los primeros, por su sensibilidad topográfica y alta resolución espacial, dan lugar a la formación de imágenes microscópicas, mientras que los rayos X proporcionan información sobre la composición elemental de la muestra (Azaroff *et al.*, 1958).

Según Lloyd (1985), la función fundamental del MEB es producir imágenes de alta resolución y gran profundidad de campo que permitan identificar los elementos existentes en las áreas de observación.

El mismo MEB permite discriminar una fase con determinada composición química (mineral) según las variaciones en el número atómico de los diferentes componentes. Segmentada la fase de interés (ver ejemplo en Figura 23), la imagen digital resultante puede ser almacenada y posteriormente cuantificada (área, tamaño, etc) utilizando el equipo de ADI.

Como ejemplo de aplicación innovadora de caracterización de fases minerales utilizando imágenes obtenidas a través del MEB se tiene los desarrollados por Rolando Lastra en el laboratorio CANMET en Ottawa, Canadá (Lastra *et al.*, 1999).

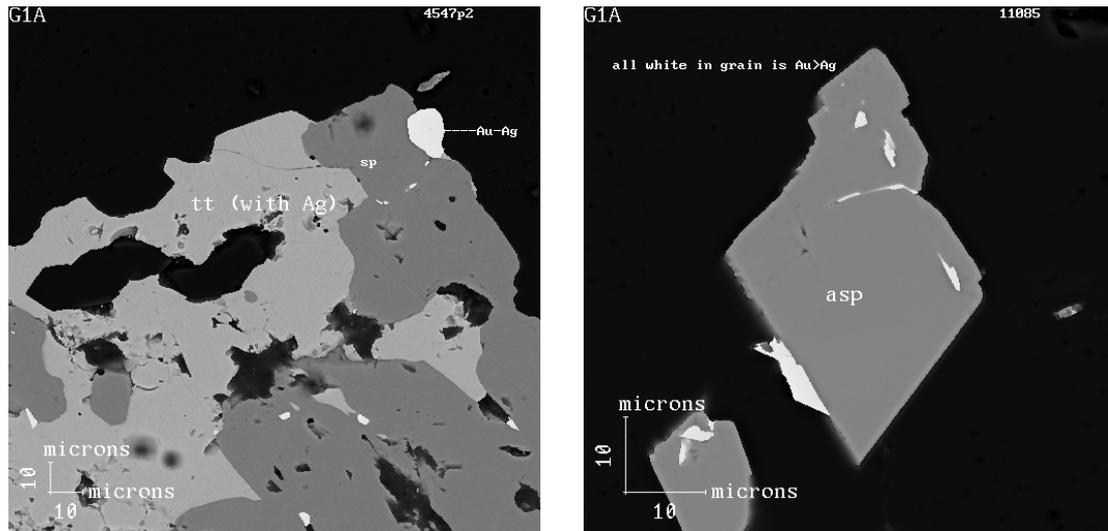


Figura 23. Imágenes obtenidas de MEB. Mineralogía y escalas gráficas en la figura.

2. Imágenes digitales monocromáticas obtenidas a partir de una cámara de video (B/N) acoplada a un Microscopio Óptico (M. Op.)

Para la captura de imágenes monocromáticas a través de una cámara (B/N) acoplada a un M. Op., es necesario la utilización de filtros de luz (monocromadores) que restrinjan el paso de luz a rangos de longitud de onda pequeños (aproximadamente 20 nm).

La caracterización de fases minerales con imágenes monocromáticas se sustenta en la definición de los rangos de luz en los cuales la fase o fases a segmentar presenten una respuesta en NG diferente de otras fases para así facilitar su segmentación. La utilización de esta técnica requiere un enfoque particular en función del problema a resolver.

Esta técnica está siendo aplicada actualmente por Eric Pirard en la Universidad de Lieja, Bélgica. Sus trabajos y publicaciones son obras básicas de referencia en el presente trabajo, concretamente en lo que se refiere al calibrado del equipo de ADI y a la metodología para garantizar la reproducibilidad de las medidas en el tiempo.

3. Imágenes digitales en color (RGB) obtenidas a partir de una cámara de video (Color) acoplada a un M.R.

La fabricación de cámaras de video que posibilitan la digitalización y descomposición de la información en tres bandas (R, G y B) a través de una tarjeta digitalizadora, ha permitido la obtención de imágenes digitales con alta resolución. La utilización de imágenes en color permite de forma práctica trabajar con tres imágenes o bandas, generando el llamado análisis multibanda. Este análisis se sustenta en la caracterización de las fases minerales mediante una segmentación unibanda y la posterior intersección de las segmentaciones parciales.

Entre los estudios más relevantes que se han desarrollado sobre la caracterización de minerales opacos con imágenes en color, merecen especial mención los realizados por la Universidad de Oviedo (Montoto *et al.*, 1987; Bel-Lan, 1978 y 1984; Martínez-Nistal, 1984 y 1993).

En cualquier caso, ninguno de estos tres enfoques del ADI en la caracterización de fases minerales opacas presentes en secciones pulidas ha resuelto el problema de la falta de generalización y reproductibilidad de los datos de segmentación, independientemente de los equipos de ADI empleados y del objeto de la aplicación desarrollada. De ahí la necesidad de abordar este problema para intentar aportar métodos que permitan garantizar la reproductibilidad de la técnica de ADI y de los datos de segmentación de las fases minerales.

II.3.4 Aplicación el ADI en Petrografía y Mineralogía.

Existen varios estudios sobre análisis y procesamiento digital de imagen aplicados a Petrografía: destacamos, en primer lugar, el realizado por Bel-lan en 1984 en el que se aborda la discriminación y cuantificación de parámetros petrográficos aplicados a rocas ígneas y metamórficas. Posteriormente, los realizados por el Grupo de Petrofísica del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo para la extracción de información sobre componentes minerales, fisuras, poros y texturas (Martinez-Nistal, 1993; Montoto *et al* 1981).

En la última década, Petruk (2000) ha abordado la utilización del ADI en la caracterización de menas metálicas, aplicada a mineralogía industrial y al beneficio de minerales. En sus estudios, Petruk presenta ejemplos de los tipos de información que se puede obtener y los problemas que se pueden resolver, tomando en cuenta el depósito mineral de donde provienen las muestras o probetas pulidas estudiadas.

En el Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis Digital de Imagen donde se ha realizado este proyecto de tesis doctoral, se han llevado a cabo estudios previos entre los que cabe destacar las investigaciones sobre la puesta a punto del equipo de ADI (Muzquiz, 1997.; Castroviejo, 1999 (a) y (b); García del Amo, 2000.; Berrezueta, 2000; Berrezueta & Castroviejo, 2001; Coz 2002; Coz, *et al* 2003 y Coz & Castroviejo, 2002), en las que se aborda la importancia de observar y corregir la variación de los niveles de ruido de los equipos de ADI (microscopio, cámara de vídeo CCD y ordenador) y determinar la evolución de ruido en el tiempo (deriva temporal).

En este trabajo, la aplicación del análisis multiespectral está limitado a las tres bandas que componen a la imagen en color obtenida en origen con microscopía óptica sin polarización (rojo, verde y azul). El uso de bandas obtenidas a través de una sola técnica, garantiza que la información de cada una de éstas sea perfectamente superponible, omitiéndose el proceso de corrección geográfica en caso de que se hubiesen obtenido imágenes por medio de distintas técnicas. Por el contrario, la presencia de más bandas, garantizaría una mejor delimitación de las fases a

segmentar, desembocando en un análisis más eficaz, aunque eso sí, con un consumo de tiempo muy superior.

Las aplicaciones desarrolladas han estado enfocadas a la investigación tecnológica de menas metálicas, es decir, a la medida y cálculo de las composiciones modales y ponderales de partículas minerales y a su análisis granulométrico, a la evaluación granulométrica y mineralógica de los áridos y hormigones, al análisis automatizado de las fases sulfuradas contenidas en carbones para la mejora de su utilización industrial y de la protección del medio ambiente, etc.

III. METODOLOGÍA DE TRABAJO

III.1 INTRODUCCIÓN

La metodología de trabajo que se ha seguido a fin de lograr la consecución de los objetivos planteados en esta Investigación presenta, en términos generales, el esquema habitual de un diseño experimental.

En un primer apartado, la investigación se enfoca a la recopilación de información y la elección de las herramientas y técnicas adecuadas para el análisis. Posteriormente se analizan los datos generados y se contrastan las hipótesis de trabajo. El paso siguiente es la obtención de resultados, los cuales han de ser verificados y validados antes de extraer las conclusiones finales de la investigación.

La metodología a desarrollar en este proyecto ha sido dividida en dos etapas, una de tipo general, en la que se describen los procesos comunes previos que garanticen unas condiciones óptimas y homogéneas de adquisición de imágenes.

La segunda etapa, con un perfil más específico, ha sido enfocada a la programación de los pasos ejecutados con el fin de conseguir la solución del problema planteado, es decir, desarrollar un sistema experto que sea capaz de identificar las fases minerales presentes y visibles en una imagen.

A nivel internacional, han sido ensayadas diversas metodologías para afrontar el problema de identificación de fases minerales en secciones pulidas, obteniéndose en general soluciones específicas para problemas concretos; no obstante, lo que aquí se plantea es crear una metodología de aplicación general.

Para ello, se abordará el estudio detallado de todos los procesos que influyan en la caracterización de fases minerales mediante ADI: Preparación de muestras o probetas pulidas, elección de menas mas abundantes e importantes, reconocimiento de minerales presentes en las muestras, calibración del equipo de medida, análisis y procesamiento de imágenes, interpretación y validación de resultados, etc., basándose en los trabajos más relevantes que se han desarrollado sobre estos temas.

III.2 METODOLOGÍA GENERAL

La metodología general aborda y describe el conjunto de procedimientos y requerimientos necesarios para garantizar la reproductibilidad de las medidas, es decir, trata los aspectos previos a la adquisición y tratamiento de la imagen. Lo que en otros ámbitos se integra en la definición de condiciones experimentales. A continuación se presenta un esquema de los pasos que se siguen en la metodología se presentan a continuación (Figura 24):



Figura 24. Secuencia de la metodología general.

III.2.1 Clasificación de Los Principales Yacimientos Minerales.

El conocimiento de que la presencia de los minerales en una muestra no es aleatoria, sino que está condicionada por la paragénesis del yacimiento del que procede, ha permitido condicionar la búsqueda e identificación experta de fases minerales con el ADI, basándose en el estudio previo de las probetas pulidas con técnicas de microscopía tradicionales y en la definición del tipo de yacimiento del que proceden las muestras.

Ante la ausencia de una clasificación de yacimientos minerales universalmente aceptada, ha sido necesario plantear una nueva clasificación basada en las ya establecidas anteriormente y que además, pueda ser utilizada como un factor condicionante en el reconocimiento experto de fases minerales a través de la técnica de ADI.

El estudio de los yacimientos minerales requiere el examen de un gran número y tipos de distritos mineros, describiendo y anotando sus semejanzas y diferencias con el mayor detalle posible. La agrupación conjunta de los yacimientos con características similares facilita la descripción y, como es de esperar, permite generalizaciones en lo que concierne a la génesis y localización mineral. Para poder ser utilizada, una clasificación debe ser lo más simple posible, especialmente si tiene que usarse para la cartografía en el campo durante el examen de una mina.

La secuencia de trabajo a desarrollar con el fin de obtener una clasificación y descripción de yacimiento minerales que nos sirva como un elemento de partida en el reconocimiento experto por ADI, está basada principalmente en una investigación y recopilación bibliográfica (Clasificación de Niggli (1929), clasificación de Scheneiderhóhn(1941) y clasificación de Lindgren (1928)).

En el desarrollo experimental de la clasificación se ha puesto énfasis especial en la descripción de las clasificaciones utilizadas como referencia y de su evolución a través de los últimos años.

En términos generales, los yacimientos han sido clasificados en cuatro grupos principales, según el ámbito en el que se desarrollan, Así:

- Ámbito Magmático
- Ámbito Hidrotermal
- Ámbito Sedimentario
- Ámbito Metamórfico (excluidos los yacimientos anteriormente tratados que han sufrido metamorfismo).

Un primer aspecto considerado en la clasificación de los yacimientos minerales es la inclusión de una definición general y resumida de cada yacimiento (Anexo 1). A esta labor se ha sumado la necesidad de definir la paragénesis típica y las principales fases minerales (riqueza, abundancia, condicionante en la concentración, etc.) presentes en cada yacimiento.

La selección de los minerales a estudiar mediante ADI ha sido realizada según los siguientes criterios:

- Reconocidos con técnicas tradicionales de microscopía.
- Presencia y abundancia en los yacimientos minerales.
- Importancia (riqueza o penalización) en el beneficio de la mena.

Finalmente, se incluirá también en la descripción de los yacimientos ejemplos de menas típicas.

III.2.2 Reconocimiento de los Minerales presentes en las Probetas Pulidas

El método clásico de observación de muestras petrográficas con minerales opacos es la microscopía óptica de reflexión. La información obtenida de la aplicación de esta técnica es de carácter mineralógico y textural. El reconocimiento de fases minerales con microscopio óptico ha sido realizado trabajando con aumentos de 2.5 X, 10 X, 20 X, tanto en aire como en aceite.

Aunque no existe una secuencia normalizada sobre los pasos a seguir en el reconocimiento de minerales opacos utilizando la microscopía de reflexión, es importante abordar el reconocimiento de las fases minerales mediante una sistemática de trabajo que garantice la optimización de la técnica al identificar las propiedades ópticas de los minerales. Como norma general, las propiedades ópticas de los minerales de mena se agruparán en dos conjuntos:

1. Propiedades Ópticas observadas SIN el Analizador (nícoles //):
 - Color y morfología
 - Pleocroísmo
 - Reflectancia
 - Dureza de pulido y calidad de éste

2. Propiedades Ópticas observadas CON el Analizador (nícoles X):
 - Anisotropismo - Isotropismo
 - Colores de Polarización
 - Reflexiones Internas
 - Maclas

Lo antes mencionado no representa una secuencia rígida y, en realidad, cada propiedad puede ser abordada en cualquier momento. Existen algunos aspectos que han de ser tomados en cuenta a fin de garantizar un reconocimiento óptimo de las fases minerales presentes en secciones pulidas (Melgarejo, *et al.*, 2002).

- **Limpieza de las muestras:** Las secciones pulidas se deben limpiar con alcohol (Etanol) y secarse con papel suave.
- **Montaje de las muestras:** Montar las secciones ya limpias sobre una lámina portaobjetos con plastilina, mediante una prensa manual para obtener una superficie perfectamente horizontal.
- **Sistema de iluminación:** Es conveniente realizar las observaciones siempre con la misma intensidad de luz. Únicamente hay que trabajar con la máxima intensidad cuando se realizan observaciones con analizador o ataques por luz.
- **Diafragma de apertura:** Con este diafragma regularemos la luminosidad global del campo. Al cerrarlo se acentúan la sensación de relieve y las sombras, así como la percepción del anisotropismo. Normalmente debe estar abierto al máximo.
- **Diafragma de campo:** Regula la superficie iluminada. Ésta debe coincidir con el campo visual, para evitar al máximo los rayos externos no paralelos.
- **Objetivos:** Observaremos las muestras con los objetivos más corrientes, con el aire como medio de incidencia. Se comparará la variación de resolución, nitidez, profundidad de campo y distancia de trabajo para los diferentes objetivos.
- **Analizador:** Para observar con el analizador intercalado habrá que aumentar la intensidad de luz. Se reducirá la intensidad de luz antes de desintercalarlo. Al descruzar ligeramente el analizador se acentúa el contraste entre los minerales. Sin embargo, para una correcta observación de la extinción y de los colores de interferencia es imprescindible asegurarse de que el analizador este perfectamente cruzado.

Reconocidos los minerales presentes en las secciones pulidas, es necesario en principio valorar de forma subjetiva la abundancia absoluta de éstos y, así, catalogarlos como:

- a. Componentes principales: si su abundancia es superior al 5 % del total.
- b. Componentes accesorios: si su abundancia es inferior al 5 % del total

Otra propiedad a valorar es la textura de la mineralización, es decir, la caracterización de los aspectos morfológicos de los granos y la relación de cada mineral con sus vecinos, a escala macro y microscópica. La descripción textural se basará en el siguiente plan:

- c. Descripción textural
 - Establecer las variaciones texturales internas de los granos.
 - Establecer las relaciones texturales entre las diferentes fases minerales, con el objetivo de discriminar qué fases se formaron simultáneamente y establecer la secuencia de su formación.
 - Ubicar, a partir de los anteriores criterios, puntos representativos para análisis cuantitativos posteriores (inclusiones fluidas, microsonda, isótopos, análisis digital de imagen, etc.).

La ampliación y localización de las características ópticas, mineralógicas y texturales visibles en la probeta pulida serán descritas en el apartado observaciones. Además, se incluirán en observaciones aquellas características con interés en el objetivo de caracterización de fases minerales con ADI, así: calidad de pulido, localización de fases a utilizar como referencia en la modelización, etc.

Finalmente, a partir de la mineralización presente en la sección pulida, de su textura y del conocimiento general del yacimiento de donde procede la muestra, se definirá la clasificación de ésta.

III.2.3 Consecución de Condiciones Estables y Reproducibles

El estudio individual y en conjunto de los elementos que intervienen en el proceso de ADI ha de permitir identificar las correcciones sobre cada elemento a fin de conseguir unas condiciones de estabilidad que garanticen el nivel de reproductibilidad que requiere la técnica.

III.2.3.1 Muestras a analizar

La correcta preparación de las muestras a partir de las cuales serán obtenidas las imágenes digitales representa, sin lugar a dudas, el condicionante indispensable para garantizar el éxito de la técnica de análisis de imagen en aplicaciones petrográficas.

➤ Probetas Pulidas

Una probeta pulida es un tipo de preparación de muestra de roca que permite la observación y estudio de las fases minerales presentes a través de un microscopio óptico de reflexión. La consecución de unas condiciones homogéneas de acabado de probetas minerales es posible a través del establecimiento de un procedimiento riguroso de elaboración que garantice un pulido óptimo.

Para conseguir el pulido óptimo, ha sido propuesta y aplicada la secuencia de elaboración de láminas transparentes y pulidas (LTP) utilizada en el Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis de Imagen (ETSI Minas de Madrid).

- a) Recortar un trozo rectangular de la muestra (35 * 24 *10 mm) con una cortadora de disco de diamante.
- b) Marcar el número de la muestra en la cara trasera del trozo.
- c) Rellenar poros superficiales en vacío utilizando *poliester* o *epoxy* en la estufa de vacío.

- d) Preparar una superficie de interés para pegar, usando tres abrasivos de carborundo 1) 400, 2) 600 y 3) 1000.
- e) Limpiar la sección con ultrasonido y secarla con la estufa eléctrica.
- f) Pulir manualmente la sección usando el *spray* de diamante y los paños DP-DUR de la casa Struers, siguiendo la siguiente secuencia (1° 3 μm , 2° 1 μm y 3° 0,25 μm) en la pulidora Buheler.
- g) Determinar subjetivamente la calidad de pulido según criterios del microscopista. Niveles óptimo, medio (repulir -f-) y bajo (iniciar pulido).
- h) Determinar la calidad de pulido de secciones calificadas como óptimas por el microscopista, comparando los valores de nivel de gris de minerales reconocibles presentes en la sección pulida con estándares minerales conocidos.



Figura 25. Probetas pulidas.

III.2.3.2 Equipo de Análisis Digital de Imagen

El equipo de trabajo está formado por la Cámara de vídeo CCD, microscopio óptico de reflexión, tarjeta digitalizadora, software de ADI y estación de trabajo (CPU). La “puesta a punto” del equipo al completo consiste en realizar los pasos pertinentes para conseguir una correcta adquisición y reproductividad de imágenes. Esto es, realizar medidas, observaciones y correcciones para cada uno de los elementos del equipo.

Existen unos condicionantes externos, como la corriente eléctrica, humedad, temperatura, ruidos-vibraciones, etc., que deben ser controlados a fin de que no condicionen las medidas.

➤ Microscopio Óptico

El instrumento utilizado para la visualización y estudio de las muestras es un Microscopio Óptico de Reflexión (Leitz DMRXP) con objetivo de 20X de óptica plana corregida. El valor del potenciómetro que se utilizara es el de 6,5 V, por cuanto permite que los minerales más reflectivos no se saturen de luz y que los menos reflectivos no se vean negros (Berrezueta , 2000).

Características físicas de los minerales, como el pleocroísmo o diferente orientación del corte del mineral (según su sistema) hacen que al ser observados bajo el microscopio, presenten variación en su reflexión. Esta característica, usando técnicas microscópicas tradicionales facilita el reconocimiento de los minerales observados. Usando la técnica de ADI, esta variación en la reflexión es un problema por cuanto el sistema desarrollado trabaja con rangos fijos. Para evitar esto, la luz del microscopio utilizada para iluminar las probetas pulidas no será polarizada, es decir, se trabaja sin polarizador ni analizador.

La iluminación del microscopio, sobre todo a bajas intensidades, produce una luz que tiende hacia el rojo. Para corregir este desplazamiento, será utilizado siempre el filtro azul. Es conocida la posibilidad de observar las secciones pulidas en aire o

aceite. En este estudio, la caracterización de las fase minerales mediante ADI se realizará bajo aire ya que permite una mayor rapidez de trabajo. El procedimiento que garantiza que la visualización de la escenas sea reproducible es el siguiente:

- a) Colocar el objetivo adecuado para esta aplicación (20X).
- b) Ajustar el potenciómetro a una posición constante (6,5 V).
- c) Trabajar en nícoles paralelos y sin polarizador para disminuir los efectos de pleocroísmo y anisotropismo característicos de los minerales.
- d) Corregir el espectro de luz (hacia el rojo) obtenido de una lámpara halógena utilizando un filtro azul a fin de obtener condiciones de luz de día (blanca).
- e) Asegurarse del correcto centrado de la fuente de luz del microscopio.

➤ Cámara de Vídeo CCD

Según Pirard (1999 a-b) y Pirard & Tarquini (1996): “La cámara de Vídeo CCD puede ser identificada como la mayor fuente de ruido (ruido de fotón, ruido recurrente por sombras y ruido de digitalización)”. Esto se debe a la dispersión de señales eléctricas que presentan los fotodiodos de la cámara al ser sometidos a una constante cantidad de fotones. En adición a lo antes citado, el sobrecalentamiento de la CCD por ausencia de un dispositivo de enfriamiento, provoca una mayor excitación de los electrones originando una significativa fluctuación de niveles de intensidad bajo iluminación constante.

Al adquirir dos imágenes con un mismo equipo e idénticas condiciones de adquisición, su respuesta digital debería ser idéntica, independientemente del momento en el que sea captada. En la práctica esto no es así, ya que la respuesta de la cámara habrá variado en ambos instantes, obteniendo dos imágenes similares pero no idénticas. La diferencia entre una y otra imagen será debida al “ruido” y a la “deriva” que se producen en la cámara.

- Ruido electrónico: Dispersión de la señal de salida en la cámara debida a varias causas: fotones, corriente y digitalización, entre otras. Para la disminución del ruido se recurre a la media aritmética de imágenes. Además va a existir un ruido de fondo residual debido a variación de la respuesta de la cámara *pixel a pixel*, causada por la construcción de los diodos.
- Deriva temporal: Variación de la respuesta de la cámara en función del tiempo que tarda en alcanzar una estabilización de su temperatura.

Para limitar la deriva temporal y el ruido electrónico deben seguirse los siguientes pasos:

- a) Determinar el tiempo de calentamiento de la CCD para estabilizar la señal. El tiempo necesario para estabilizar el equipo se obtiene de estudiar la respuesta de un conjunto de *pixels* homogéneos (ventana 10*10 para garantizar esta homogeneidad) a intervalos conocidos de tiempo (Pirard, 1997 a). Con los datos obtenidos se realizará una gráfica en la que se pueda observar la variación de dicha ventana a lo largo del tiempo.
- b) Tomar la media aritmética de una secuencia de imágenes (promedio de imágenes) para mejorar la estimación de la intensidad del *pixel*.

Si suponemos que el valor del ruido ϵ en cada píxel es una variable aleatoria con una media cero y desviación típica σ , tenemos el siguiente modelo:

$$g(i, j) = f(i, j) + \epsilon(i, j)$$

Donde: $g(i,j)$ es la imagen adquirida y $f(i,j)$ es la imagen original para todo i,j . El resultado de realizar el promedio sobre n imágenes distintas de la misma escena sería:

$$\left[\frac{f_1 + \dots + f_n}{n} \right] + \left[\frac{\varepsilon_1 + \dots + \varepsilon_n}{n} \right]$$

Lo que ocurre es que ahora la desviación típica del ruido es σ / \sqrt{n} . Por lo tanto, si tenemos n imágenes de la misma escena, podemos obtener una nueva versión de la imagen original con menos ruido, mediante:

$$f(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{K=1}^n g_k(i, j)$$

El número de medidas de la misma escena a fin de obtener una imagen promedio deberá realizarse intentando compatibilizar los requerimientos de calidad de imagen con el consumo de tiempo.

En la práctica es conveniente que el número de imágenes a promediar sea una potencia de 2 (2,4,8,16,32,64...), ya que dada la estructura de la memoria del ordenador, la operación se realiza con los bits necesarios, agilizando la misma. La desviación típica de la operación de promediado vendrá dada por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum B_i^2 - n * B_{media}^2}{(n-1)}}$$

Según esto, la reducción del ruido estará relacionada con el incremento del número de medidas (potencias de 2) en una proporción de 1:16. Es decir que para reducir el ruido imagen original (2^0) a la mitad, deberán tomarse 4 imágenes (2^2). La siguiente media que reducirá de nuevo a la mitad el ruido será la de 16 imágenes (2^4) (Pirard, 1997).

Otro aspecto a tomar en cuenta es la necesidad de **determinar la respuesta de la cámara** (teóricamente lineal) en comparación con la intensidad de luz. En la práctica, la variación de la intensidad de la luz con el potenciómetro, altera el espectro, por lo cual, es preferible trabajar con luz constante y medir la respuesta de la cámara usando patrones reflectivos conocidos. La secuencia es la siguiente (Pirard, 1999 a-b):

- a) Revisar que la cámara y el grabado de imágenes estén trabajando en condiciones estándar (precalentamiento de la CCD y media aritmética de las medidas).
- b) Ajustar el voltaje de la luz incidente con la utilización de un patrón de reflectancia homologado bajo el microscopio hasta la saturación justa. Para evitar la sobresaturación de luz se debe controlar que los valores en nivel de gris leídos para el patrón usado no sobrepasen los 255.
- c) Sin cambiar el voltaje de la fuente, grabar las imágenes de otros patrones de reflectancia homologados conocidos.
- d) Relacionar los valores calculados de nivel de gris sobre ventanas de 10×10 *pixels* (0 - 256) *versus* los valores de reflectancia conocidos para cada patrón (%).

Es necesario también **adaptar los niveles de *offset* y *gain*** (ajuste de rangos de niveles de gris para corrección de blancos) de la cámara para garantizar una buena exposición del vídeo. El procedimiento es el siguiente (Pirard, 1999 a -b):

- a) Desactivar el ajuste por omisión *offset* y *gain* con que cuentan las CCD.
- b) Poner la referencia oscura bajo el microscopio. Ésta puede ser un material estándar o el objeto más oscuro de interés en escena.
- c) Modificar el *offset* tanto como la intensidad de la referencia oscura sea diferente a la deseada, como valor límite inferior. El límite inferior no debería ser tomado tan cercano de cero, en orden a evitar valores negativos después de correcciones locales.
- d) Poner la referencia de blanco bajo el microscopio. Éste puede ser un material estándar o el objeto más brillante de interés en escena.
- e) Ajustar el *gain* tanto como la intensidad de la referencia de blanco sea diferente de la deseada, como valor límite superior. El límite superior debería ser elegido de tal forma que se evitara la saturación excesiva después de correcciones locales.

En la práctica, aunque se consiguiera unas condiciones de adquisición estables, un mismo objeto no da la misma respuesta en nivel de gris en función de su localización bajo el microscopio (deriva espacial). Esto se debe a defectos de fabricación de las cámaras CCD, iluminantes y óptica, que provocan la heterogeneidad en reflectores homogéneos.

La única forma de conseguir valores constantes para una imagen homogénea sería **ajustar el *gain* y *offset*** para cada *pixel* individual, lo que no es posible con la técnica actual. Pirard (1999) plantea una corrección numérica aproximada bajo condiciones de linealidad de la CCD a partir de escenas del componente aditivo y multiplicativo del ruido. Para su consecución es necesario seguir los siguientes pasos:

- a) Adquirir una imagen de ruido negro en condiciones estables. La imagen de ruido negro da una medida de cómo fotodiodos individuales difieren en respuesta cuando se someten a la misma cantidad de fotones.
- b) Adquirir una imagen de una perfecta escena homogénea y grabar la deriva espacial generada por factores como el mal centrado de la fuente de luz, óptica y la ganancia heterogénea de los sensores. En orden a ser representativa, la imagen de deriva espacial debería ser adquirida usando una muestra que de una respuestas dé (175 +/- 25 NG) bajo los posiciones de *gain* y *offset* definidos por el usuario.

Para ilustrar la idea de la corrección numérica, se puede decir que el ruido negro es una aproximación de la situación de oscuridad que será adicionado al *pixel* respuesta mientras que la deriva espacial representa la variación en intensidad del fotón y actuará como un factor multiplicativo.

En otras palabras, la imagen negra actuará como un *offset* mientras que la imagen blanca como un *gain*. La fórmula numérica a aplicar es la siguiente:

$$\left[I^R_{(x,y)} = (I^R_{(x,y)} - NI^R_{(x,y)}) / (BI^R_{(x,y)} - NI^R_{(x,y)}) * (BI^R_{(h,l)} - NI^R_{(h,l)}) + NI^R_{(h,l)} \right]$$

Donde:

$I^R_{(x,y)}$: El NG del *pixel* de coordenada x,y en la imagen ingresada I.

$NI^R_{(x,y)}$: El NG del *pixel* de coordenada x,y en la imagen de ruido negro (NI).

$BI^R_{(x,y)}$: El NG del *pixel* de coordenada x,y en la imagen de deriva espacial (BI)

(h,l) : Coordenadas del *pixel* central de la imagen

$I^R_{(x,y)}$: NG corregido.

➤ *Software y Hardware*

Al momento de plantearse la utilización de técnicas de análisis y proceso digital de imágenes, es posible optar por el uso de un sistema comercial de análisis de imágenes que presente una rápida operatividad, sin necesidad de desarrollar las aplicaciones generales, pero que sí permita su adaptación a aplicaciones específicas mediante el desarrollo de rutinas propias. Otra opción es montar un propio sistema orientado a problemas concretos en el que es necesario desarrollar el *software* completo.

El sistema utilizado en el presente proyecto, aun cuando es del tipo comercial, es suficientemente flexible para permitir la interacción del usuario y presenta un perfil adecuado a aplicaciones petrográficas. El hardware del equipo de ADI está compuesto por una tarjeta de digitalización "*frame-grabber*" modelo "*Meteor Board*" y el *software* Aphelion 3.1 formado por un conjunto de aplicaciones y funciones de tratamiento de información digital.

Estas dos partes del equipo de ADI no han sufrido ajuste por nuestra parte. Sin embargo, se ha realizado es la determinación de la magnificación que produce el software a la hora de presentar la imagen en pantalla y la relación entre N° *pixels* / tamaño real del objeto visualizado, llamada también calibración geométrica. El procedimiento es el siguiente:

- a) Adquirir una imagen de un patrón de medida (micrómetro) con un aumento conocido.
- b) Determinar la relación entre la dimensión en pantalla de una unidad de medida y la dimensión real de medida (magnificación).
- c) Determinar la relación entre la dimensión real de una medida y los *pixels* (escala geométrica).
- d) Colocar el objetivo adecuado para esta aplicación.

La calibración de los elementos del equipo de ADI puede resumirse según el siguiente esquema (Figura 26):

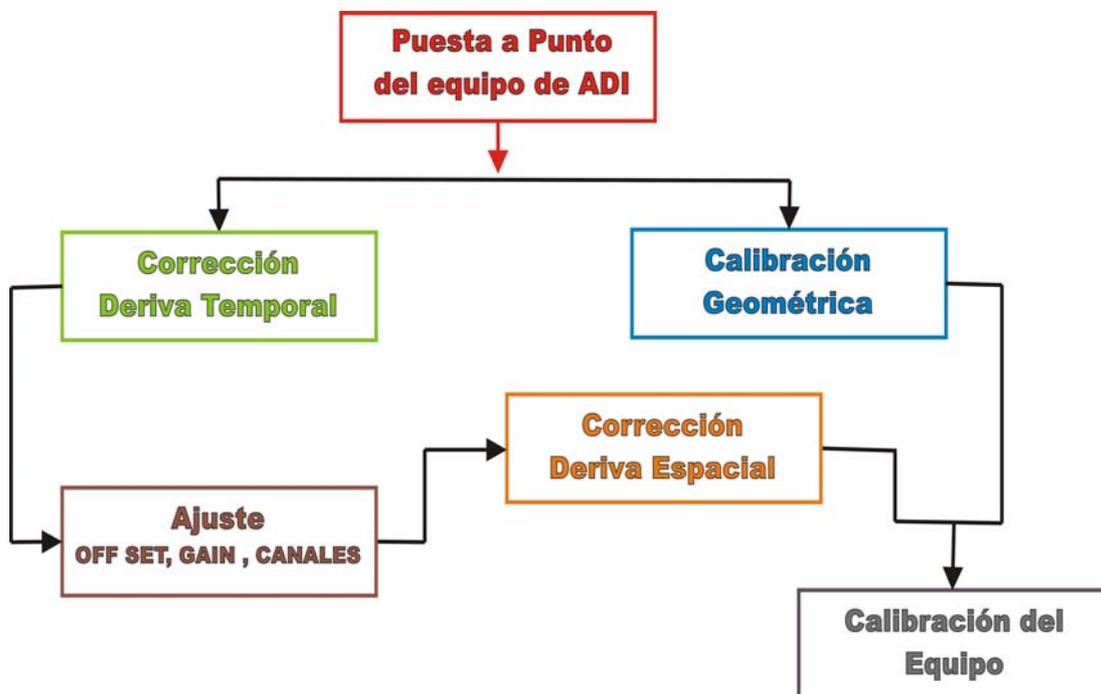


Figura 26. Secuencia de operaciones para conseguir la calibración del equipo.

III.3 METODOLOGÍA ESPECÍFICA

Una vez conseguidas las condiciones óptimas de adquisición de imágenes, es necesario describir los pasos para adquirir, tratar y segmentar las imágenes digitales mediante la utilización del equipo de ADI. Cada una de las etapas planteadas se describen a continuación (Figura 27):

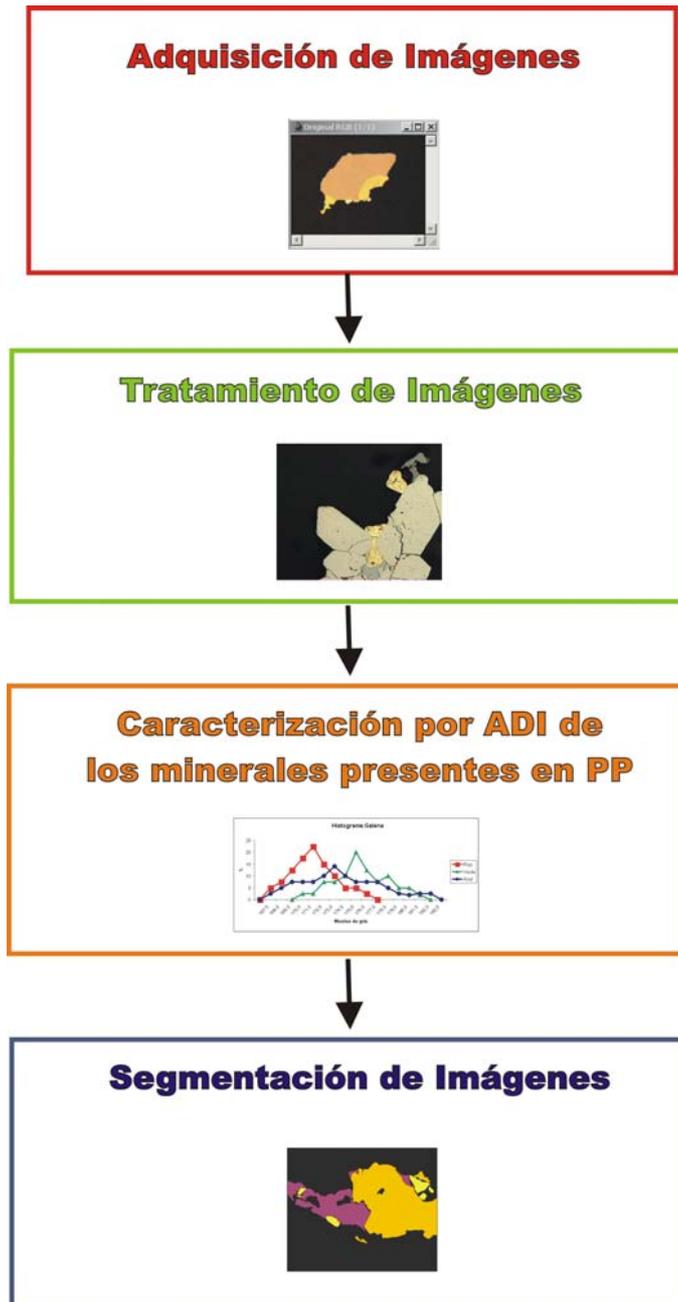


Figura 27. Secuencia de la metodología específica.

III.3.1 Adquisición de las Imágenes

El proceso de adquisición de las imágenes será realizado de forma independiente a cualquier otro proceso como el tratamiento y/o segmentación. Esto es debido al ahorro de tiempo en el proceso total y a que es posible un control más preciso de la adquisición. Se trata de un proceso semi automático en el que el enfoque de las escenas será realizado por el operador del microscopio de forma manual. El proceso será el siguiente:

- a) Precalentamiento del equipo de ADI a fin de garantizar las condiciones óptimas de estabilización (ver metodología general Cámara de video).
- b) Ajustar los parámetros del microscopio a condiciones adecuadas (voltímetro, tipo de luz, filtros, aumentos etc). El ajuste de la instrumentación ha sido ya definido con anterioridad y ha seguido unos criterios que garanticen la representatividad de las observaciones. Estos criterios han sido establecidos en aplicaciones desarrolladas en el Laboratorio de ADI de la ETSI Minas de Madrid (Muzquiz, 1997; Castroviejo *et al.*, 1999 a-b; Berrezueta *et al.*, 2000; Coz *et al.*, 2002).
- c) Enfocar manualmente la escena (fases minerales).
- d) Ejecutar la función de adquisición presente en el *software* Aphelion (ver rutina adquisición Anexo 3) tomando en cuenta el promediado de las imágenes. El número adecuado de imágenes para el cálculo de la imagen promedio final ha sido evaluado mediante la comparación de los resultados obtenidos en diferentes casos. Así, se han tomado imágenes promedio de 2, 8, 16 y 32 imágenes de una misma escena. En concreto, la evaluación consistió en comparar la mejoría de la imagen en cada caso.
- e) Guardar la información.

En el caso de querer realizar un montaje con varias imágenes, será necesario referenciar las imágenes en un programa de SIG. El programa utilizado para realizar la referenciación de las imágenes microscópicas ha sido *Arc Map 8.3*.

III.3.2 Tratamiento de las Imágenes

Una vez digitalizada y almacenada la información digital de la imagen en color (RGB) como un archivo tipo *tif*, el siguiente paso es, tal como se había descrito en apartados anteriores, aplicar una secuencia de tratamientos enfocados a mejorar, restaurar y resaltar la información que buscamos. El proceso seguirá la siguiente secuencia.

- a) Recopilación bibliográfica sobre la aplicación de técnicas de procesado de imágenes (RGB) obtenidas de una cámara de video CCD (Russ, 1992; Pirard y Tarquini, 1996; Molina, 1998). Este apartado teórico ya fue descrito en el apartado de procesado de imágenes y ha permitido seleccionar aquellas técnicas más apropiadas a nuestros fines que son: mejora de imágenes y atenuación o eliminación de ruidos parásitos.
- b) Aplicación de secuencias de tratamiento (filtros espaciales y morfológicos) en imágenes digitales (Muzquiz, 1997; Castroviejo *et al.*, 1998; Berrezueta *et al.*, 2000; Coz *et al.*, 2002).
- c) Selección de la secuencia óptima de tratamiento. La evaluación de la secuencia óptima de procesamiento de imágenes ha sido realizada mediante la comparación de las imágenes finales resultantes (imágenes tratadas). La evaluación ha consistido en estudiar estadísticamente, para cada imagen tratada, el comportamiento de las distribuciones de las fases minerales presentes. Además, ha sido tomado en consideración el tiempo de ejecución de cada secuencia.
- f) Guardar la información.

III.3.3 Caracterización por ADI de los minerales y tratamiento estadístico

III.3.3.1 Condiciones de muestreo y toma de datos

Obtenida la imagen final de la que se pretende extraer la información, es necesario obtener, a través de un muestreo estadístico, los valores con los cuales es posible segmentar cada una de las fases minerales de interés planteadas en este estudio.

A fin de garantizar la representatividad de los datos obtenidos, para cada una de las fases minerales a caracterizar, han sido planteados los siguientes criterios o condiciones de muestreo (Múzquiz, 1997; Berrezueta y Castroviejo, 2002 (a)-(b)).

- a) Las fases minerales deberán estar correctamente reconocidas en la probeta pulida de referencia.
- b) Las imágenes con las fases a caracterizar mediante ADI provendrán de por lo menos dos yacimientos diferentes y /o tres probetas diferentes.
- c) Para cada fase mineral se tomarán ventanas de muestreo de 10×10 *pixels*

El número de muestras a tomar por fase mineral será abordado en el proceso experimental de toma de datos

La localización de la ventana de muestreo se realizará manualmente por parte del operador. La obtención de los valores de NG de las imágenes serán realizadas automáticamente a través de la ejecución de una rutina diseñada específicamente para este fin. La rutina además permitirá exportar los valores calculados a programas como *Microsoft Excel* y *Statistica 6.0*, que serán las herramientas utilizadas en el tratamiento estadístico de los datos.

III.3.3.2 Tratamiento estadístico de los datos medidos

Los datos en NG obtenidos a través de las ventanas de muestreo para cada fase mineral, han de ser separados en tres grupos (bandas R, G, y B) y recibirán un estudio estadístico individualizado. En general, este estudio estadístico pretende entre otras cosas definir el tipo de distribución a la que se ajusta la muestra y delimitar el rango óptimo de segmentación de cada fase con la mayor precisión y fiabilidad posible.

Una vez que han sido definidas las condiciones de partida, el análisis estadístico de los resultados obtenidos ha seguido los siguientes pasos:

- a) Cálculo de los estadísticos característicos de la muestra (media, mediana, desviación estándar, etc.).
- b) Desarrollo de histogramas, diagramas de cajas (*box-plots*) y curvas de distribución a fin de caracterizar la muestra.
- c) Determinación y comprobación del tipo de distribución de frecuencia (pruebas de normalidad, etc.) con el que se presenta la muestra.
- d) Obtención de rangos de detección para las fases minerales con diferentes valores de fiabilidad o ajuste.

Los resultados del muestreo y estudio estadístico serán presentados de forma individualizada para cada una de las fases minerales. A fin de poder tener una visualización clara de estos resultados, ha sido planteado un modelo de ficha en la que se presentarán los resultados más representativos del estudio.

El procedimiento que se seguirá aquí con las variables cuantitativas (NG para bandas R, G y B) no difiere del tratamiento que se da habitualmente a este tipo de variables. Se analizará el comportamiento de cada una de ellas mediante diversos gráficos y pruebas, esto es, si se ajustan a la de una variable normal, si son independientes entre ellas, etc. El objetivo fundamental del análisis de los datos es obtener una síntesis de la variable estudiada que permita expresar sus características generales y su estructura básica de manera más económica y clara que la lectura de

todos sus valores concretos. En este sentido, se pueden aplicar criterios de estadística clásica que, en general, parte de dos postulados:

1. Los datos recogidos forman una muestra representativa de una población mucho mayor que no se está en condiciones de representar en su totalidad.
2. La distribución de frecuencias de la variable sigue la ley normal o de Gauss.

Ambos aspectos son discutibles cuando se trata de poblaciones “geográficas”. De ahí que sea necesario verificarlos mediante la aplicación de la estadística clásica.

El modo empleado para representar las características internas de una variable (su tendencia central, la forma y variabilidad de su distribución de frecuencias, etc.) que aporta el Análisis Exploratorio de Datos AED es el “**Resumen Numérico**” de la variable. Se basa en la **Mediana** (individuo de la población que, dispuesta ésta en orden, deja por encima y por debajo, respectivamente, las dos mitades de dicha población) que se caracteriza por ser una variable de tendencia muy resistente y aconsejable, por cuanto representa, con un elevado grado de fiabilidad, lo que ocurre dentro de la variable. Esto se podría representar en otro de los gráficos ideados del AED ,por Tukey (1977): “*Box and Whisker Plot*” conocido como *Boxplot* o Diagrama de Cajas, en el que el dato más importante es el número de casos anómalos que convendría sacar del análisis.

Aunque en este trabajo solo se presentará el resultado final expresado en un gráfico *BoxPlot*, a continuación se presentará un resumen básico de los fundamentos en que se sustenta el Resumen Numérico. En concreto, este procedimiento ordena los casos que forman la población, dividiéndola en dos partes iguales. A su vez, estas dos mitades se pueden dividir en dos nuevas partes, a partir de sus respectivas Medianas y así sucesivamente se van estableciendo las diferencias entre las distintas medidas a ambos lados de la Mediana y se representan en una tabla

La **Profundidad** refleja la distancia entre los valores extremos y el valor central. En las columnas **Bajo** y **Alto** se representan respectivamente los valores de los cuartiles y los valores más extremos de la variable (máximo y mínimo). La **Diferencia**, indica la diferencia entre los dos estadísticos con la misma profundidad. Si esta diferencia se mide entre el valor del cuartil superior (25% casos con valores mayores) y el del cuartil inferior (25% casos con valores inferiores) se tiene **el Recorrido Intercuartílico (RIC)**. El RIC representa una alternativa a la medida de dispersión clásica en estadística (Desviación Típica). Este parámetro estadístico indica que el 50% de la distribución se encuentran entre ambos cuartiles, situación similar a la que sucede cuando se dice que en una distribución normal el 68.27% de los casos se encuentran entre la media o Mediana ± 1 unidad de Desviación Estándar.

En el campo **Media**, se representa el valor promedio de los estadísticos de esa fila; no debe confundirse con la Media de la estadística clásica. Su variabilidad proporciona una idea de la distribución de frecuencias y, por tanto, de si la variable se aproxima a un comportamiento de tipo gaussiano. Con los valores de la Mediana y el RIC es posible detectar casos extremos (bien atípicos o bien atribuibles a un error de medida). El criterio utilizado para catalogar los datos como extremo es:

$$\text{Mediana} + 3\text{RIC} < \text{Extremos} < \text{Mediana} - 3\text{RIC}$$

Otro de los métodos para representar el comportamiento de las variables es el Diagrama de Frecuencias. En particular, a través de la visualización del diagrama de frecuencias se puede comprobar su distribución. Para ello se establecen una serie de clases que se representan en abscisas frente a la frecuencia de aparición de eventos en cada una de las clases que se representa en ordenadas.

Finalmente la valoración de la hipótesis de normalidad con la que se parte en este tipo de estudios se comprueba a través de la ejecución de un test de normalidad. Para ello, utilizaremos una representación gráfica que compara cada valor observado,

con su valor “esperado”. Este valor esperado se extrae a partir de una variable normal aleatoria, con Media y Desviación Estándar iguales a las de la variable que se está estudiando. Si la muestra ha sido extraída de una población normal, cabrá suponer que ambos puntos, el valor observado y el esperado, se encuentren en una línea recta.

La medida de la fuerza de la relación que existe entre las dos variables, viene dada por el Coeficiente de Correlación lineal de Pearson, **R** (también: **r**). Este estadístico refleja el grado de relación lineal que existe entre dos variables. El resultado numérico fluctúa entre los rangos de +1 a -1. Su fórmula viene dada por la expresión:

$$R = \frac{\sum_i ((X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{\sum_i (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

El valor de $R = 1$ indica que entre las dos variables existe una relación lineal muy fuerte y positiva. Mientras que, cuando R más se aproxima a 0, más débil es la relación lineal. El valor de 0 se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables. Una correlación de -1 significa que existe una relación lineal inversa perfecta (negativa) entre las dos variables, es decir, que las puntuaciones bajas en X se asocian con los valores altos en Y y viceversa.

Como información complementaria se establecerá el grado de relación que existe entre las diferentes variables (R, G y B) para una misma fase mineral. Esto se llevará a cabo mediante las pruebas de Correlación Lineal de Pearson que permite medir la fuerza de la relación entre dos variables. Esta prueba, como las anteriormente descritas, se aplicará e interpretará para cada fase mineral estudiada en el apartado de Resultados.

III.3.4 Segmentación y validación de resultados

Como ya hemos visto, el proceso de extracción de la información de una imagen digital recibe el nombre de análisis de imagen. En este caso, la información que queremos obtener son las “regiones” que corresponden a cada una de las fases minerales presentes en la imagen (“objetos”). El procedimiento llevado a cabo es el siguiente:

- a) Abrir la imagen tratada para segmentar.
- b) Aplicar los rangos de segmentación anteriormente encontrados para cada una de las bandas: R, G y B en la imagen en color (Segmentación *Color Threshold*).
- c) Guardar la segmentación obtenida (imágenes binarias).
- d) Transformar la imagen binaria en imagen de gris.
- e) Segmentar la imagen en gris (Segmentación por objetos: *Threshold Obj*).
- f) Aplicar filtro por tamaños a los objetos.
- g) Guardar la información resultante (segmentación final).

La automatización de esta secuencia ha sido posible a través de una rutina diseñada específicamente para esta labor (ver Anexo 3).

La validación de los resultados encontrados (rangos de segmentación) será realizada evaluando si la segmentación realizada es adecuada. La descripción en detalle de cada una de las etapas, de segmentación y de validación, será abordada en detalle durante el proceso experimental a desarrollado más adelante (Segmentación y Validación de resultados: IV.4).

IV. PROCESO EXPERIMENTAL

IV.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS YACIMIENTOS MINERALES

IV.1.1 Introducción

Un yacimiento es una concentración de mineral con un valor económico probado, o sea, explotable. Si aún no está probado el interés económico, se trata de un indicio que podría ser de interés en un futuro. Al ser la diferencia entre indicio y yacimiento de tipo económico, y al estar ésta condicionada por factores como precio del mineral, tecnología disponible, distancia de transporte, etc., deducimos que el estudio de yacimientos no puede depender exclusivamente de condicionantes geológicos sino también de factores económicos.

Los yacimientos minerales pueden ser descritos atendiendo a su ámbito geológico, origen de la mineralización (génesis) y su forma. La variación de estos parámetros permite establecer las características comunes y las diferencias entre los distintos yacimientos, posibilitando su clasificación (Vázquez, 1995).

El Establecimiento de la génesis de los yacimientos y su respectiva clasificación utilizando este criterio, permite la comprensión del tipo de procesos generadores de mineralización, los factores que la condicionan y su distribución. En algunos tipos de yacimientos sus límites genéticos no pueden definirse de un modo preciso y por lo tanto, la clasificación debe ser flexible. Desde el punto de vista metalogenético, las clasificaciones más completas son las genéticas, aunque también sean las más difíciles de elaborar.

Los primeros intentos de clasificación hicieron énfasis en la forma, textura y en el contenido mineral y asociaciones de los yacimientos minerales. Posteriormente, las clasificaciones se desarrollan sobre las teorías de la génesis y medios de deposición. Aún así, no ha sido propuesta ninguna clasificación universalmente aceptada de los yacimientos minerales. Actualmente, hay tres sistemas de uso común.

El esquema más ampliamente usado en los Estados Unidos ha sido y es en parte la clasificación profundidad-temperatura de Lindgren (1928); por el contrario, en Europa, el sistema que predominaba tradicionalmente es el basado en la clasificación vulcánico-plutónica de Niggli (1929) y la clasificación mena-asociación de Schneiderhöhn (1922). Pero hay que decir que los avances actuales han introducido muchas novedades en los sistemas de clasificación.

Las tres clasificaciones antes mencionadas se desarrollaron a principios de siglo cuando los tipos más frecuentes de yacimientos minerales eran los filones. Si bien yacimientos como los sulfuros masivos asociados con masas volcánicas, diseminados de Cu-Mo y estratiformes del tipo de Mississippi Valley eran conocidos, su valor económico era bastante inferior que el actual.

Los estudios modernos han proporcionado una gran cantidad de información y es necesaria una revisión y modernización de las antiguas clasificaciones.

➤ **Clasificación de Niggli**

La clasificación de Niggli (1929) está basada en asociaciones químicas y asociaciones mena-mineral. Agrupó las menas epigenéticas en volcánicas (próximas a la superficie) y plutónicas (profundas). Los yacimientos plutónicos son divididos en hidrotermales, pegmatíticos-neumatolíticos y subgrupos ortomagmáticos, dependiendo de si las menas se formaron a partir de líquidos o de gases, o como productos directos de cristalización dentro del magma.

Los criterios utilizados en la clasificación de Niggli son aplicables en la de Lindgren. Pero ya que los fluidos de alta presión por encima del punto crítico no son

ni gases ni líquidos, la distinción neumatolítico-hidrotermal no siempre es posible. Desborda la aplicación de campo, ya que un yacimiento mineral que se forme a partir de minerales transportados en medio gaseoso no puede distinguirse de los formados a partir de materiales transportados en medio líquido, lo que si se consigue por medio de la investigación de inclusiones fluidas.

➤ **Clasificación de Schneiderhöhn**

Schneiderhöhn (1922) clasificó los yacimientos minerales de acuerdo con : 1)la naturaleza del fluido mineral; 2)las asociaciones minerales; 3)distinción entre deposición cercana a la superficie y deposición profunda, y 4)el tipo de deposición, huésped o ganga. La categoría significativa en esta clasificación es el grupo segundo, asociaciones minerales. Schneiderhöhn propuso una lista detallada de asociaciones minerales típicas, clasificándolas según los tipos de mena, huésped y ganga encontrada en cada una.

Este sistema sostiene una clasificación genética en el que las asociaciones minerales representan asociaciones metálicas en los fluidos formadores de las menas. Aunque los esquemas de Schneiderhöhn y Lindgren tienen semejanzas fundamentales, difieren en el énfasis. Según el sistema de Schneiderhöhn, un yacimiento que no se adapte a ninguna de las asociaciones dadas mena-mineral o sus subdivisiones es rápidamente clasificado formando solamente un nuevo grupo o subdivisión.

El éxito de este sistema para uso de campo, sin embargo, es inversamente proporcional al número de grupos principales necesarios para acomodar todos los yacimientos minerales; es decir, cada nueva categoría que se necesite debilita la clasificación.

➤ **Clasificación de Lindgren**

Lindgren introdujo su sistema de clasificaciones en 1928; actualmente se usa en su forma casi original. El sistema de Lindgren está considerado como el mejor para uso en el campo. Una modificación que parece esencial es una atenuación del papel del magma. Los valores de temperatura y presión en el esquema de Lindgren son a lo más, solamente aproximados y sujetos a modificación constante. Por ejemplo, aunque la mayor parte de la metalización en los yacimientos mesotermales tiene lugar posiblemente entre los 300° y 200° C, los estadios iniciales y finales de la deposición mineral pueden pasar de estos límites.

La clasificación de yacimientos que utilizaremos como referencia en el presente trabajo estará inspirada en la presentada por Schneiderhom (1952) de tipo genético, en la que se toman en cuenta las condiciones de formación, las rocas relacionadas y las asociaciones mineralógicas. Se han introducido modificaciones con las que se pretende comprender el tipo de procesos fundamentales en la formación de los yacimientos y sus relaciones entre sí.

La clasificación de yacimientos minerales elaborada para este estudio pretende aportar además de la información genética del depósito, una ayuda directa en el diseño del sistema experto de identificación automática planteado en este estudio. Por ello, se ha simplificado para adaptarla a este objetivo: identificar las asociaciones minerales características de cada yacimiento considerado, pues ésta va ser la realidad sobre la que se va a trabajar. La clasificación planteada se encuentra desarrollada en el Anexo I.

IV.1.2 Clasificación y Descripción de los principales Depósitos Minerales

I. AMBITO MAGMÁTICO

1. En rocas ultramáficas y complejos ofiolíticos.

- 1.1 Cromitita.
- 1.2 Cromitita podiforme.
- 1.3 Óxidos Fe-Ti
- 1.4 EGP.
- 1.5 Form. sulfuradas (Sulf Ni-Cu-Fe, *cf.r* máficas 2, Sulf. masivos en serie ofiolíticas, *cf.VMS*, 8).

2. En rocas máficas.

- 2.1 Sulfuros Ni-Cu.
- 2.2 Óxidos Fe-Ti (tratados en Ultramáficas).

3. Pegmatítico - Neumatolíticos.

- 3.1 Pegmatíticos.
- 3.2 Neumatolíticos y neumatolíticos-hidrotermales

II. AMBITO HIDROTERMAL

4. Filones Hidrotermales

- 4.1 Filones (Pb-Zn-Ag) y otros.

5. Pórfido

- 5.1 Pórfido de Cu y Cu-Au
- 5.2 Pórfido de Mo y Cu-Mo

6. Epitermales

- 6.1 Alta Sulfuración.
- 6.2 Baja Sulfuración.

7. Carlin.

III. AMBITO SEDIMENTARIO

- 8. Vulcano Sedimentario (VMS) y Formaciones bandeadas de hierro (BIF) y manganeso.**
 - 8.1 Sulfuros Masivos.
 - 8.2 *Stockwork* o raíz de sulfuros masivos.
 - 8.3 Equivalentes metamórficos.
- 9. Yacimientos Cu-Pb-Zn en rocas sedimentarias.**
 - 9.1 Tipos *SEDEX* y *Mississippi Valley*
 - 9.2 Tipo *Kupferschiefer / Copperbelt*
- 10. Detríticos.**
 - 10.1. Aluviones o placeres.
 - 10.2. Paleoplaceres.

IV. AMBITO METAMÓRFICO

(cualquiera de los yacimientos ya tratados pueden ser metamorfizados; en este caso, no se individualizan)

- 11. Skarn.**
- 12. En "greenstone belts" y terrenos metamórficos.**
 - 12.1 Oro orogénico o ligado a zonas de cizalla.
 - 12.2 Sulfuros masivos e itabiritas. (8).

La descripción de los depósitos minerales incluidos en la clasificación planteada se presentan en detalle en el Anexo 1. Un ejemplo de la ficha en la que se resume cada tipo de depósito y la apariencia (Ver Figura 28) de los minerales (MR) se presenta a continuación.

AMBITO DE FORMACIÓN: **HIDROTHERMAL**

TIPO DE YACIMIENTO: **PÓRFIDO**

Definición:

El término pórfido se aplica a yacimientos relacionados con rocas intrusivas de composición intermedia a ácida, caracterizados por una

intensa alteración de las rocas de caja, mineralizaciones diseminadas o en *stockworks*, bajas leyes y grandes reservas (Evans, 1993). Pueden contener sustancias variables como Cu, Mo, Au, Ag, Sn, Bi, etc., pero los más productivos actualmente desde el punto de vista minero son los de Cu (Au) y Mo.

Estos depósitos también se pueden definir (Lowell & Guibert, 1970) de la siguiente forma: *“A copper and/or molybdenun sulfide deposit consisting of disseminated and stockwork veinlet sulfide mineralization emplaced in various host rocks that have been altered by hydrothermal solutions into roughly concentric zone patterns. The deposit is generally large, on scale of thousands of feet...and...is associated with complex, passively emplaced, stock of intermediate composition including porphyry units.”*

Los Pórfidos de Cobre y Molibdeno constituyen aproximadamente el 50% y 70% de las reservas mundiales de Cobre y Molibdeno, respectivamente (Castroviejo, 1998).

Mineralogía -Pórfidos Cu-Au, Cu-Mo- (Craig & Vaughan, 1994).

Minerales Principales: Pirita, Calcopirita, Molibdenita, Bornita.

Minerales Accesorios: Magnetita, Hematites, Ilmenita, Rutilo, Enargita, Cubanita, Casiterita, Oro y Plata nativos, Sulfosales (Au, Ag, Se, Te, etc).

Minerales Secundarios: Covellina Hematites, Covellina, Calcosina, Cobre nativo, Digenita.

Ejemplos:

- Pórfidos de Cobre: Chuquicamata, Chile; Bisbee, Arizona-USA.
- Pórfidos de Molibdeno: Climax, Colorado-USA; Toquepala, Perú.

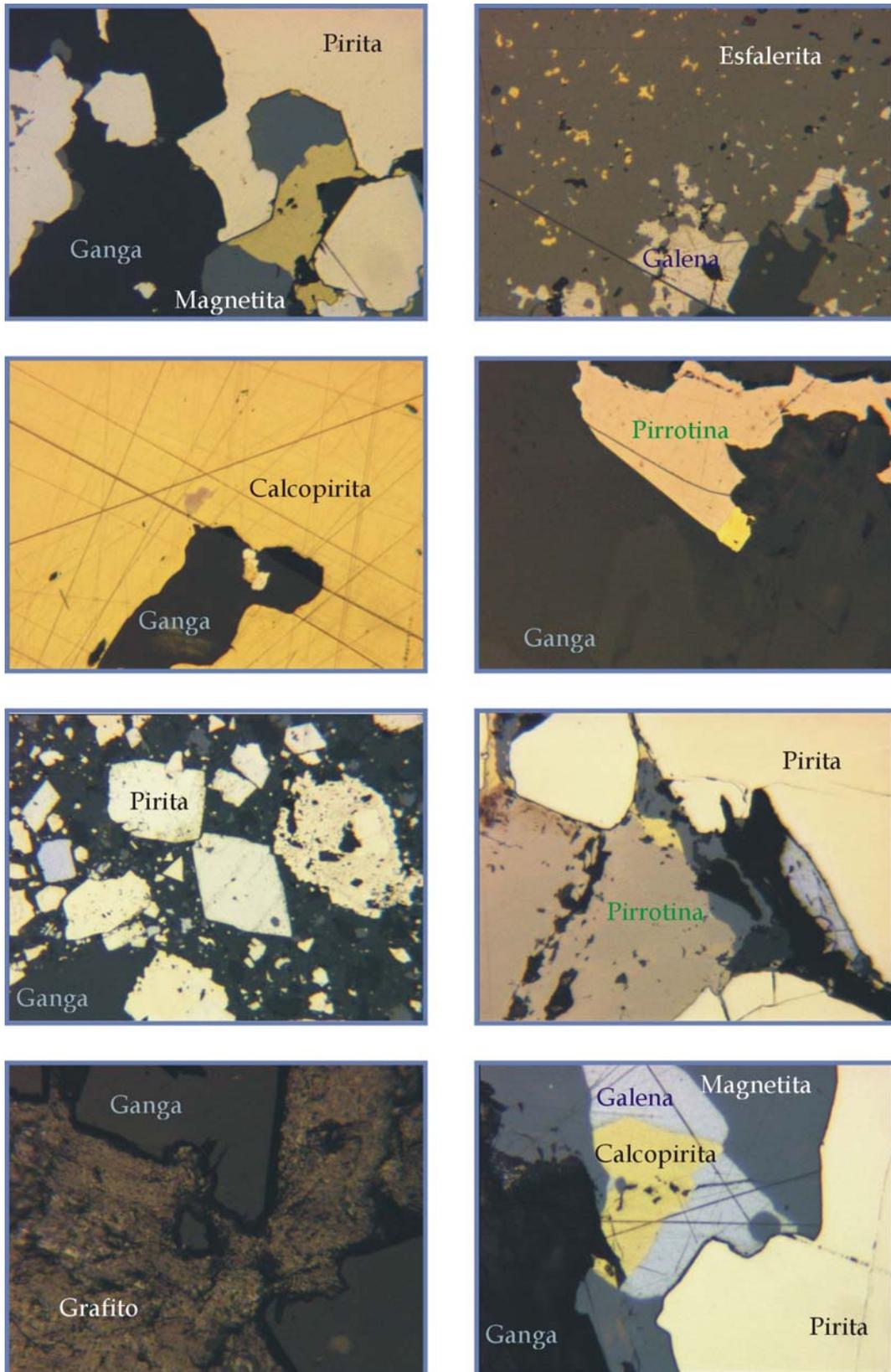


Figura 28. Aspecto de los minerales (M.R.) presentes en los depósitos estudiados.

IV.2 ESTUDIO MINERALOGICO DE LAS PROBETAS PULIDAS

IV.2.1 Introducción

Las probetas seleccionadas para su caracterización mineralógica por técnicas tradicionales de microscopía y, a continuación, por ADI pertenecen a una colección privada (Colección de Rehwald, base de la obra fundamental de Ramdohr). Las probetas pulidas han sido tomadas de los principales yacimientos mundiales y son 52. La descripción mineralógica ha sido realizada utilizando todas las opciones posibles que da el estudio al microscopio óptico de reflexión.

La descripción en detalle de cada una de las probetas que han sido seleccionadas como referencia, ha sido almacenada en una base de datos gráfica diseñada exclusivamente para este trabajo. En caso necesario, se ha completado la base de datos mineralógica con muestras adicionales, de otros yacimientos.

Una primera información es la inclusión del nombre identificativo de la muestra. En este caso, se tomara el código original de las probetas y la fecha de descripción. A continuación se describirán las generalidades del yacimiento de donde procede la probeta, es decir, el nombre del yacimiento de origen y la clasificación tipológica del yacimiento.

La descripción mineralógica tradicional comprenderá los siguientes campos: componentes principales ($\geq 5\%$ modal), componentes accesorios ($<5\%$ modal), textura, clasificación y las oportunas observaciones. Adjunto a esta información, la base de datos incluirá campos sobre las características del pulido y enlaces con los archivos de imágenes digitales con las fases minerales más representativas. El estudio mineralógico de las 52 probetas pulidas esta reflejado en detalle en el Anexo 2. Un modelo de ficha en el que se resume toda la información obtenida se presenta a continuación (Figura 29).

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 01-07-2003 Número de probeta: HD 6896

Yacimiento de Origen: Sudbury Tipo: Serie Magmática

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Pirrotina, pentlandita, magnetita

Componentes Accesorios: Ilmenita, calcopirita, espinela, esfalerita, galena

Textura: Masiva-granoblástica (po), llamas (pent)

Observaciones: Necesita repulido muy fino y suave. Masa pirrotina granoblástica con inclusiones frecuentes. Pentlandita llamas bandeada o en fisuras. Magnetita con exoluciones de uv, a veces rodeada de espinela (espinela-cromita?) y esfalerita. Ilmenita interfase mg-po

Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena masiva po.pentl-ccp

Imagen (a)

Imagen (b)

Registro: 5 de 57

Figura 29. Modelo de ficha para la descripción mineralógica de las probetas.

IV.2.2 Selección de minerales a caracterizar por ADI

Según Criddle & Stanley (2002), con tan solo una treintena de minerales opacos es posible caracterizar de forma significativa los yacimientos minerales. Esto es debido a que este grupo de minerales alcanza un 95 % de ocurrencia en los yacimientos. Siguiendo este criterio, los minerales a caracterizar mediante ADI se restringirán a estos minerales, definiendo la influencia de los minerales no incluidos en esta lista si se encuentran presentes en las probetas pulidas utilizadas de referencia. Los elementos de interés para su caracterización median ADI se presentan a continuación agrupados según su clasificación mineralógica (Tabla 1).

Grupo de Minerales	Minerales	Fórmula química
Elementos	<i>Electrum</i>	Au, Ag
	Oro	Au
Nativos	Plata	Ag
	Platino y EGP	Pt
Sulfuros (arseniuros)	Arsenopirita	FeAsS
	Bornita	Cu ₅ FeS ₄
	Calcopirita	CuFeS ₂
	Cinabrio	HgS
	Covellina	CuS
	Cubanita	CuFe ₂ S ₃
	Esfalerita	ZnS
	Estibina	Sb ₂ S ₃
	Galena	PbS
	Linneita	(Co,Ni) S ₂
	Marcasita	FeS ₂
	Molibdenita	MoS ₂
	Niquelina	NiAs
	Pentlandita	(Fe,Ni) ₉ S ₈
Pirita	FeS ₂	
Pirrotina	Fe _{1-x} S	
Sulfosales	Tennanita/Tetrahedrita	Cu ₁₂ (As, Sb) ₄ S ₁₃
Óxidos	Casiterita	SnO ₂
	Cromita	FeCr ₂ O ₄
	Hematites	Fe ₂ O ₃
	Ilmenita	FeTiO ₃
	Magnetita	Fe ₃ O ₄
	Rutilo	Ti O ₂
	Uraninita	UO ₂
Hidróxidos	Hidróxido Fe (goethita)	FeO(OH) _n H ₂ O
Tungstatos	Wolframita	(Fe, Mn)WO ₄
Ganga	(Cuarzo, carbonatos y minerales transparentes)	

Tabla 1. Minerales más comunes de las menas metálicas.

Tal como ha sido mencionado con anterioridad, no todos los minerales antes nombrados (Tabla 1) se presentarán juntos, esto dependerá del yacimiento y de sus asociaciones minerales típicas. A continuación, siguiendo el criterio de asociaciones minerales típicas y teniendo en cuenta que los minerales tienen un valor de reflectancia que los caracteriza, ha sido realizada una agrupación de éstos de acuerdo con los objetivos en este proyecto, a fin de detectar minerales con un grado de reflectancia semejante, susceptibles de generar problemas a la hora de segmentar estas fases mediante ADI.

Los valores de reflectancia tomados como referencia corresponden a los valores medios (%) calculados con luz blanca (Criddle & Stanley , 2002). Dentro de los grupos desarrollados, además de los minerales considerados importantes, aparecen otros menos comunes pero que podrían llegar a generar confusión durante el proceso de segmentación posterior.

Un aspecto importante es que no todos los minerales abundantes presentes en cada grupo serán interesantes para caracterizar mediante ADI, al no representar el mineral explotable del yacimiento y por no ser condicionantes en el proceso de recuperación mineral. Los minerales importantes presentes en los grupos irán en **negrita**.

o En rocas Ultramáficas y Complejos Ofiolíticos:

1. **Oro** (72), **EGP** (65).
2. Sulfuros (**Arsenopirita** (52), **Pirita** (51), **Calcopirita** (45),
3. **Pirrotina** (39), **Esfalerita** (19)).
4. **Martita** (29), **Hematites** (29), **Rutilo** (23,5), **Ilmenita** (19,5).
5. **Magnetita** (17), **Cromita** (12,5), **Espinela** (8).
6. **Ganga** (6).

○ En rocas máficas:

1. **EGP** (65), Awaraita (64), Millerita (64).
2. **Pirita** (51).
3. **Pentlandita** (49), Gersdorffita (46), Maucherita (49,5-39), Parkerita (49,5), Niquelina (50,5-45), **Calcopirita** (45).
4. **Pirrotina** (39), Calcopirrotina (37), Cubanita (35).
5. **Hematites** (29), Martita (29), Rutilo (23,5), Anatasa (20).
6. **Ilmenita** (19,5), **Magnetita** (17).
7. **Ganga** (6).

○ Pegmatítico -Neumatolíticos:

1. **Oro** (72), Bismuto (67).

Fases Sulfuradas

2. Arsenopirita (52), **Pirita** (51), **Calcopirita** (45), **Molibdenita** (42-19), **Galena** (43), Estannita (28), **Pirrotina** (39).

Fases Oxidadas

3. Rutilo (23,5).
4. **Wolframita** (17), **Casiterita** (13), **Scheelita** (11).

Silicatos

5. Berilo, Turmalina (6), Mica (5), Cuarzo (5).

* Pegmatíticos complejos: Esmeraldas, Piedras preciosas (*exigen tratamiento individualizado*).

○ Hidrotermales:

1. **Plata** (85), *Electrum* (80).
2. **Arsenopirita** (52), **Pirita** (51).
3. **Calcopirita** (45), **Galena** (43).
4. Bournonita (36), Argentita (32), **Tetrahedrita** (31) y otras sulfosales.
5. **Esfalerita** (19).
6. **Ganga** (6)

- Porfido de Cobre:
 1. **Plata** (85), *Electrum* (80), **Oro** (72).
 2. **Arsenopirita** (52), **Pirita** (51).
 3. **Calcopirita** (45), **Galena** (43), **Molibdenita** (42-19), **Pirrotina** (39),
Calcopirrotina (37).
 4. Calcosina (31,5), **Hematites** (29), Cuprita (27), **Covellina** (23-8), **Bornita**
(23).
 5. **Esfalerita** (19).
 6. **Ganga** (6).

- Epitermales:
 1. *Electrum* (80), **Oro** (72), Seleniuros / Telururos (70).
 2. **Pirita** (51),
 3. **Calcopirita** (45), **Galena** (43), **Pirrotina** (39), Calcopirrotina (37).
 4. **Argentita** (32), Calcosina (31,5), **Sulfosales** (31), **Tetrahedrita** (31),
Hematites (29),
 5. **Covellina** (23-8).
 6. **Esfalerita** (19).
 7. **Ganga** (6)

- Carlin:
 1. **Plata** (85), *Electrum* (80), **Oro** (72).
 2. **Arsenopirita** (52), **Pirita** (51),
 3. **Calcopirita** (45),
 4. **Pirrotina** (39), **Hematites** (29).
 5. **Goethita** (18 - 15),.
 6. Jarosita (7), **Jaspe oxidado** (7).
 7. **Ganga** (6).

- Vulcano - Sedimentario:
 1. **Plata** (85), **Electrum**(80), **Oro** (72),
 2. **Arsenopirita** (52), **Pirita** (51), Arseniuros Blancos (51).
 3. **Calcopirita** (45), **Galena** (43), **Pirrotina** (39).
 4. **Hematites** (29), **Rutilo** (23,5), **Magnetita** (17).
 5. **Goethita**(18 - 15), **Casiterita** (13), **Jarosita** (7).

- Yacimientos Cu-Pb-Zn en Rocas Sedimentarias:
 1. **Plata** (85), **Oro** (72),.
 2. **Pirita** (51).
 3. **Calcopirita** (45), **Carrollita** (44), **Galena** (43).
 4. **Pirrotina** (39), **Calcosina** (31,5), **Covellina** (23-8), **Bornita** (23).
 5. **Esfalerita** (19)
 6. **Ganga** -Materia Orgánica- (6-10).

- Yacimientos Detríticos:
 1. **Electrum** (80), **Oro** (72), **MGP** (65).
 2. **Pirita** (51).
 3. **Ilmenita** (19,5), **Magnetita** (17), **Wolframita** (17), **Casiterita** (13).
 4. **Columbo-Tantalita** (9).

- Skarn:
 1. **Oro** (72).
 2. **Arsenopirita** (52), **Pirita** (51).
 3. **Calcopirita** (45), **Galena** (43).
 4. **Pirrotina** (39), **Cubanita** (39), **Calcopirrotina** (37), **Calcosina** (31,5), **Covellina** (23-8), **Bornita** (23).
 5. **Hematites** (29), **Martita** (29), **Rutilo** (23,5).
 6. **Esfalerita** (19), **Magnetita** (17).
 7. **Ganga** -carbonatos- (6).

- En "Greenstone Belts" Y Terrenos Metamórficos:
 1. *Electrum* (80), **Oro** (72).
 2. **Arsenopirita** (52), **Pirita** (51).
 3. **Calcopirita** (45)
 4. **Galena** (43), **Estibinita** (47-30), **Molibdenita** (42-19), **Pirrotina** (39).
 5. **Hematites** (29), **Rutilo** (23,5).
 6. **Esfalerita** (19).
 7. **Ganga** (6).

IV.3 PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DE ADI

IV.3.1 Introducción

Tal como se había mencionado anteriormente, entre los elementos del equipo de ADI hay dispositivos electrónicos como la cámara de video y el microscopio óptico, que están condicionados por la energía eléctrica que los alimenta y las condiciones ambientales en las que funcionan.

El estudio de la respuesta de la cámara CCD y del microscopio óptico en el tiempo, permite obtener información sobre cómo evitar la deriva temporal y cómo limitar el ruido que se produce al operar con estos instrumentos.

Para realizar la puesta a punto del equipo es necesario evaluar cómo la señal en NG que se obtiene del equipo de ADI está influenciada por cada uno de los elementos que forman este equipo. Las condiciones y pasos a seguir para medir la respuesta de la cámara y del microscopio a través del tiempo y así definir la influencia de la deriva temporal y del ruido electrónico en las medidas, han sido ya detallados en la metodología de trabajo.

Es importante indicar que todos los equipos electrónicos utilizados (cámara de video CCD, microscopio óptico, etc.) están conectados a un estabilizador de corriente (Boar micro 100), con el fin de minimizar la influencia de factores externos en la composición de la energía eléctrica que alimenta a los equipos de ADI. La ausencia de un estabilizador de corriente haría casi imposible la reproductibilidad de la técnica de ADI aplicada al reconocimiento automático de fases minerales.

Para este estudio se han diseñado rutinas que realizarán medidas sobre una zona de muestreo de 10×10 *pixels*. La elección de la ventana, aunque se tomen medidas de patrones homogéneos, pretende garantizar con mayor fiabilidad este criterio de homogeneidad.

La zona de muestreo o máscara posee una dimensión establecida por el operador de acuerdo con el objeto de estudio y permite realizar medidas sobre la superficie que abarca. Otro punto interesante es que los valores que representarán a los valores de NG presentes dentro de la ventana ó máscara serán el estadístico media aritmética y mediana, en principio iguales debido a la teórica distribución normal con que se presenta la muestra.

IV.3.2 Deriva Temporal

La deriva temporal es la variación de la tendencia general de las medidas dadas por los equipos, debido principalmente al cambio de las condiciones de temperatura de éstos en el tiempo. Es evidente que desde el encendido de los equipos hasta un determinado tiempo de funcionamiento, ante la ausencia de un sistema de regulación, la temperatura del equipo aumenta hasta alcanzar un nivel de estabilidad.

Para determinar el nivel de estabilidad del equipo es necesario en primer lugar medir a través de la ejecución de la rutina "valores RGB" el valor promedio de los valores de NG definidos en la ventana de muestreo (10*10 *pixels*). La ventana de muestreo, tal como se describe en el proceso metodológico, debe intentar localizarse sobre una superficie con características homogéneas (reflectivas y ópticas).

La muestra a utilizar en este primer estudio debería ser un patrón negro. Ante la ausencia de éste, ha sido tomada en su lugar una imagen con el diafragma de la cámara de video cerrado (negro 0% reflectividad). Esto se hace para no incluir la deriva que posiblemente tenga la lámpara del microscopio, la cual será evaluada más adelante. Las condiciones de partida para este análisis de la deriva de la cámara CCD son:

- La cámara inicialmente sin ningún precalentamiento previo.
- Lámpara del microscopio apagada.

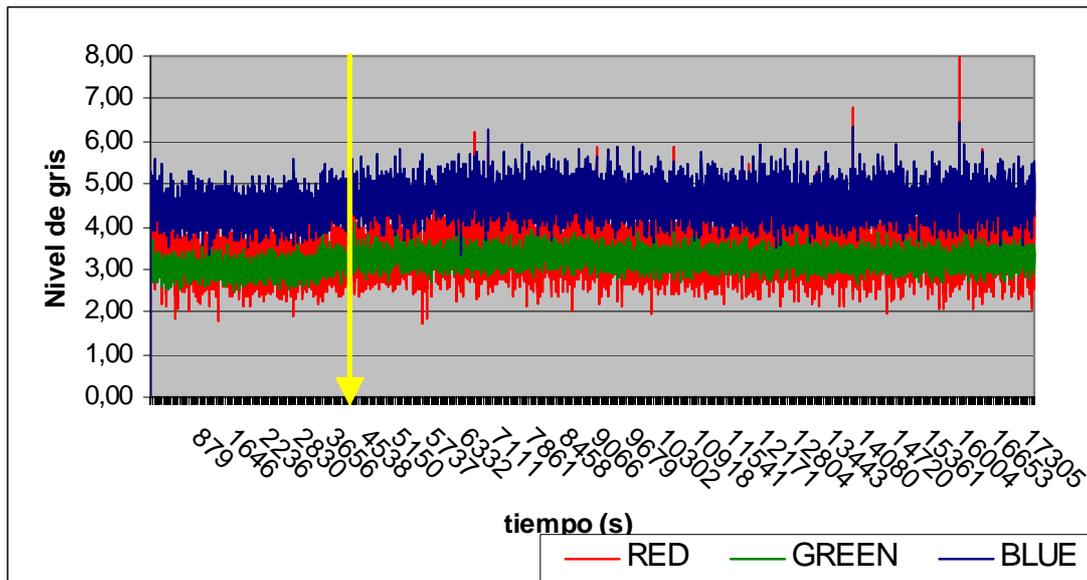


Figura 30. Curva de Respuesta de NG en el tiempo para una imagen negra.

Esta curva (Figura 30) representa la evolución temporal del valor medio en NG tomado sobre una imagen negra (ventana 10×10 pixels). En total se realizaron 18000 medidas a intervalos aproximados de 2,6 s. En la curva, el ruido de la cámara se manifiesta como las fluctuaciones periódicas de los valor de nivel de gris y la deriva temporal como la variación de la tendencia general de las medidas a través del tiempo. Es apreciable que mientras las fluctuaciones de los valores de gris siguen inalteradas a través del tiempo, la tendencia general de la curva (NG-t) tiende a estabilizarse.

El tiempo necesario para que la tendencia general de la señal (deriva) se estabilice es de aproximadamente 1 hora y 10 minutos. Así pues, éste será el período que se debe esperar para asegurar una respuesta estable de la cámara CCD.

A continuación, una vez determinado el periodo de calentamiento de la cámara CCD, es decir, el tiempo necesario para saber cuándo la tendencia general de las medidas se estabiliza, será necesario evaluar la lámpara del microscopio óptico de reflexión. Para esta evaluación se parte de las siguientes condiciones iniciales:

- La cámara inicialmente encendida 1 hora y 20 minutos.
- Lámpara del microscopio sin ningún precalentamiento.

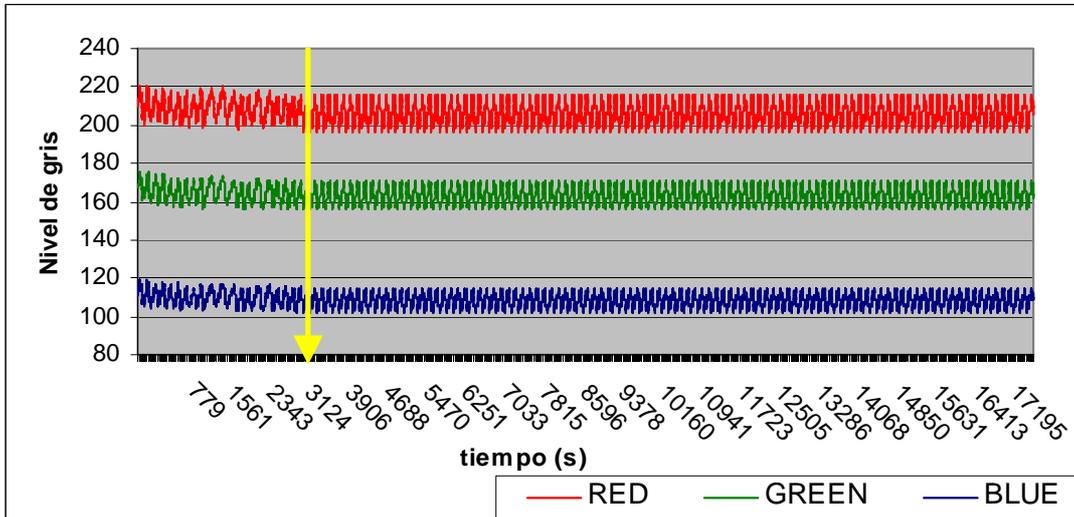


Figura 31. Curva de Respuesta de NG en el tiempo para una imagen negra.

Al igual que en el caso anterior, la curva NG-t (Figura 31) representa la evolución temporal de la media aritmética de los *pixels* de una ventana de muestreo (10*10), pero esta vez, de una imagen obtenida de un espejo pulido homogéneo. Tal como se había interpretado en el gráfico anterior, la fluctuaciones periódicas representan el ruido y, en cambio, la tendencia general de la curva, refleja la deriva temporal de la fuente de luz del microscopio.

Como resultado de la interpretación del las curvas del gráfico anterior, se obtiene que es necesario someter la lámpara del microscopio a un período de calentamiento previo a cualquier medida. Este tiempo es aproximadamente de 40 minutos.

IV.3.3 Ruido

La segunda fase del estudio de respuesta de la cámara de video CCD y del microscopio óptico es posible derivarla de la interpretación de las apreciables fluctuaciones de los niveles de gris en las curvas anteriores (ruido). Estas variaciones de tipo periódico se deben básicamente a variaciones en la corriente eléctrica y errores internos de los fotodiodos. La limitación de este ruido es posible a través de la adquisición de una secuencia de imágenes de una misma escena, que se obtendrá de las imágenes promedio.

Al momento de realizar la operación de promediado de imágenes, es importante considerar el período de recurrencia del ruido, por cuanto todas las imágenes adquiridas para el promediado deberán estar dentro de un rango de tiempo equivalente a dicho período. Será necesario verificarlo para cada una de las bandas (RGB) en que se ha separado la imagen en color.

El número de imágenes óptimo para calcular la imagen promedio ha sido determinando siguiendo los criterios de mejora de calidad de la imagen y tiempo empleado en la operación. Hay que indicar que el *software* de ADI utilizado tiene en su menú definida la operación de promediado, aunque ésta, por causas de origen, no permite indicar el intervalo de tiempo entre cada medida. Debido a esto, ha sido necesario desarrollar una rutina de promediado que permita la captura de las imágenes de una misma escena a intervalos de tiempo conocidos y a continuación, realizar las operaciones de promediado.

Al igual que en el caso anterior, una ventana de muestreo ha sido definida para determinar el valor medio en niveles de gris de cada una de las imágenes promedio calculadas. Las muestras estudiadas corresponden a un grano homogéneo de pirita. Tal como ha sido definido en la metodología, el número de imágenes a tomar dentro del denominado período de recurrencia, corresponderá a una potencia de 2.

En concreto, los números de imágenes tomados para esta experimentación son: 8, 16, 32 y 64 por adecuarse a la capacidad del procesador para ejecutar operaciones con nivel de rendimiento óptimo (Figura 32). Para la obtención de las medidas han de ser tomados en cuenta los siguientes condicionantes previos:

- La cámara previamente encendida 1 hora y 10 minutos.
- Lámpara del microscopio encendida 40 minutos.

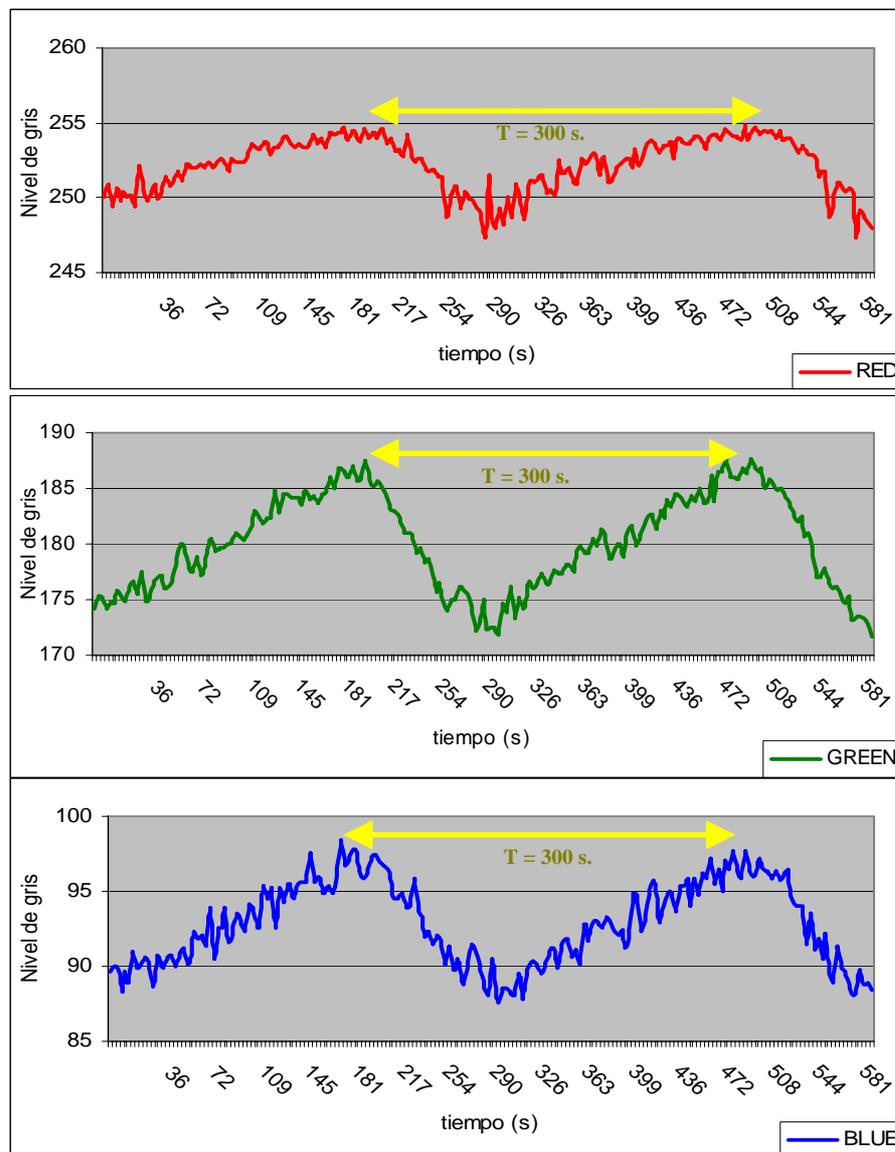


Figura 32. Período de la función de ruido en cada una de las bandas RGB.

El valor de ruido encontrado para cada una de las bandas RGB se representa a través de una *función seno* con un período aproximadamente equivalente a 300 segundos. Una vez determinado que el ruido se ajusta a una función con un período constante, el promediado de imagen con diferente número de imágenes nos proporciona los siguientes resultados (Figura 33).

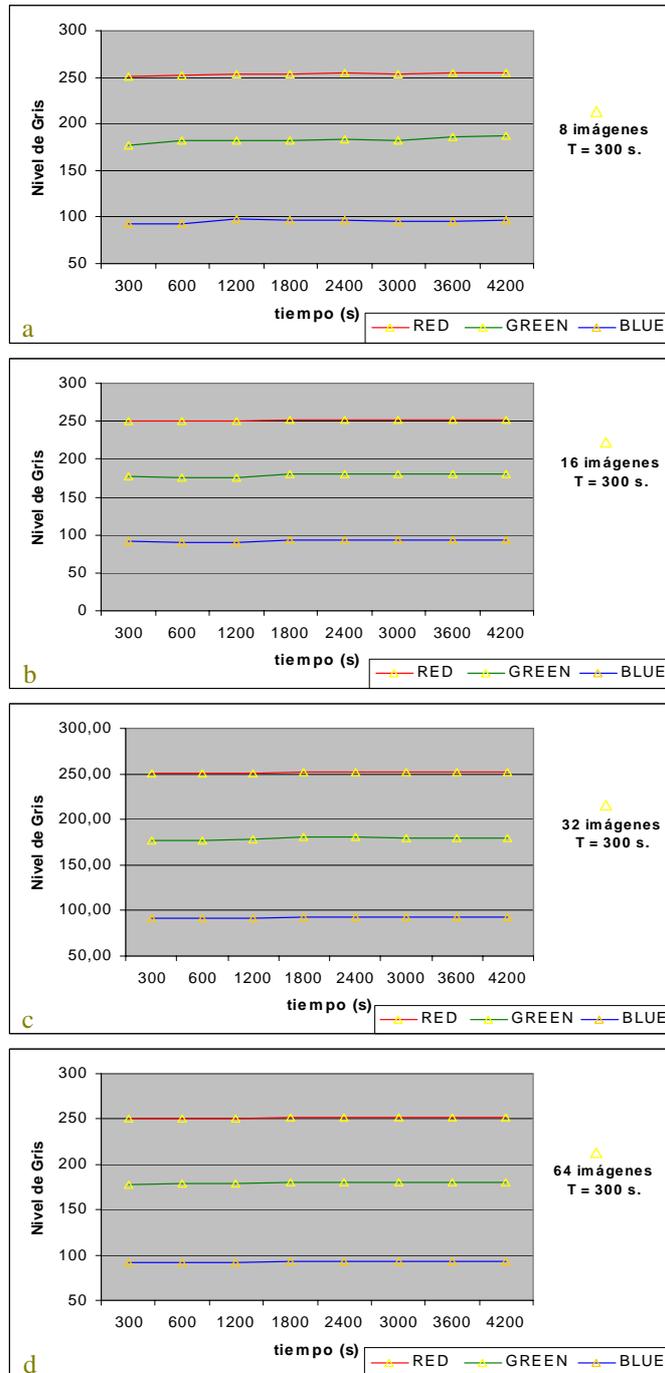


Figura 33. Promediado de imágenes con 8 (a),16 (b), 32 (c) y 64 (d) imágenes.

Obviamente, la opción de adquirir 64 imágenes en un periodo de 300 segundos, para su posterior promediado es el que mejor resultado proporciona. Pero existe un inconveniente sobre la utilización de este número de imágenes debido a que la rutina desarrollada sólo permite adquirir imágenes en secuencia continua de la misma escena a intervalos superiores a 6 segundos. Según esto, la adquisición de 64 imágenes sobrepasaría el tiempo estimado óptimo (periodo de la función que representa al ruido) de adquisición.

Por esta razón, el número de imágenes a tomar para el promediado de imágenes será de 32. La variabilidad en respuesta de escenas promedio con 32 imágenes está sobre $\pm 1 NG$.

Una apreciación representativa de la aplicación de operaciones de promediado es la comparación de los histogramas de respuesta de nivel de gris de imágenes completas (756*576).

Ante la dificultad de encontrar una sección completamente homogénea que abarque la extensión del campo de captura de la cámara, utilizando el objetivo de 20X, ha sido adquirida una imagen con el obturador de la cámara cerrado (en teoría una imagen negra) y otra con la luz transmitida encendida sin ninguna muestra entre la fuente y el sensor de la cámara (la lámpara utilizada con luz transmitida tiene iguales idénticas características que la usada para reflexión), ajustando el potenciómetro en una posición tal que no sobresature al sensor de la cámara (4 V).

Las curvas de respuesta en NG de estas dos escenas homogéneas (blanca y negra) se presentan en las siguientes figuras (Figura 34) y (Figura 35).

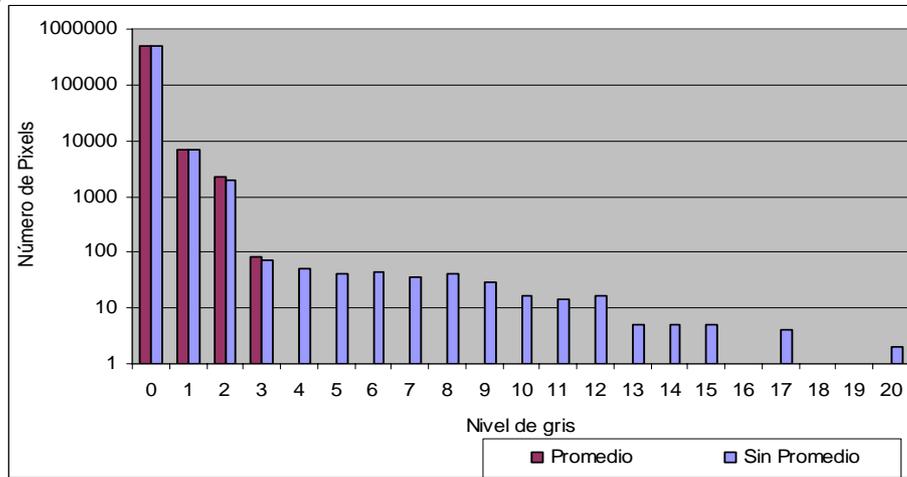


Figura 34. Histograma de NG para escena negra homogénea prom. y no prom.

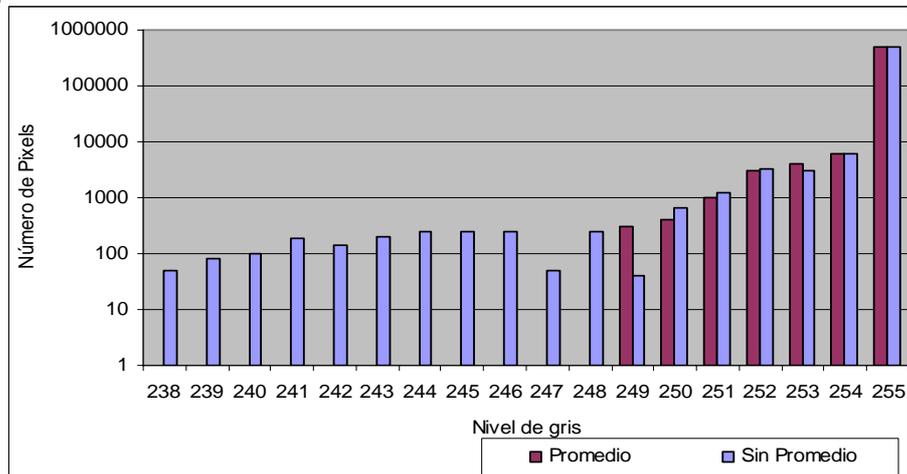


Figura 35. Histograma de NG para escena blanca homogénea prom. y no prom.

IV.3.4 Linealidad de Respuesta de la Cámara CCD

Teóricamente, los fotodiodos tienen una respuesta lineal con respecto a la intensidad de la luz incidente. No obstante, este hecho tiene que verificarse experimentalmente para cada cámara individual, porque la respuesta de los fotodiodos a veces se desvía de la linealidad cuando están cerca de la saturación. En la práctica, la determinación de la linealidad o no de la cámara de video CCD es posible por dos vías:

- a) Variando el voltaje de la luz sobre un único patrón.
- b) Utilizando distintos patrones reflectivos.

La primera opción se descarta por cuanto el incremento del voltaje de la luz provoca una variación en la composición de su espectro. Esto deriva en una pérdida de control sobre el comportamiento de una variable tan importante en este estudio. La segunda posibilidad representa la mejor opción al mantener constante el voltaje (6,5 V) y por tanto, su espectro. Además, permite obtener las curvas de reflectancia (nivel de gris) de los minerales estudiados y su posible utilización en diferentes trabajos de detección automática por parte del equipo de ADI.

El ensayo se iniciará con la medida a través de una ventana de muestreo (10*10) del valor medio (NG) de los *pixels* pertenecientes a una fase homogénea y perfectamente conocida (% reflexión teórico). Las medidas sobre cada una de las fases de referencia serán obtenidas de diferentes granos y de diferentes muestras (patrones o probetas) para que tengan un mayor rigor estadístico. A continuación los valores finales medidos para cada fase se compararán con sus valores teóricos (Picot & Johan , 1.977; Criddle & Stanley, 1.993) Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 36.

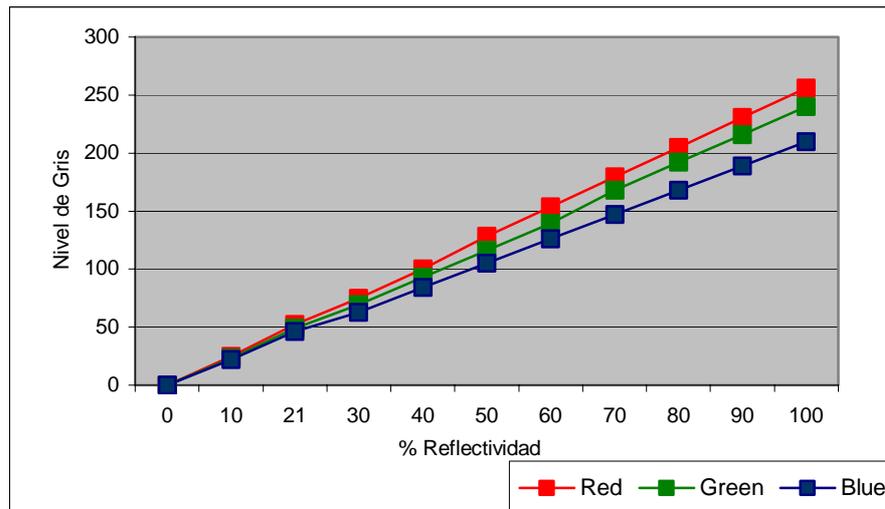


Figura 36. Diagrama de relación % de Reflexión Vs NG de la cámara CCD.

IV.3.4 Calibración del Color. Referencia para el Blanco

Las señales digitales RGB de la cámara de vídeo CCD no son medidas absolutas de color. Según esto, si se busca que una señal RGB sea reproducible, la cámara debe estar calibrada a un blanco de referencia (patrón homologado). El blanco para un sistema digital es el color que presenta, para cada uno de los canales en que es posible descomponer una imagen en color, los valores máximos de la escala (255 NG) para R, G y B. La función de calibración de color de la cámara pretende adaptar la señal RGB del sistema digital al campo encuadrado sobre el patrón blanco (Chang & Reid, 1996).

Para este estudio se utilizarán patrones de blanco homologados utilizados en la calibración de reflectómetros. En realidad, estos patrones no son completamente blancos, pues encontrar en la naturaleza un material que refleje la totalidad de la energía que le incide resulta prácticamente imposible. Estos patrones se consideran blancos debido a que reflejan igual porcentaje de energía para las bandas en que se descompone la luz.

Es necesario mencionar que al momento de ajustar el color del sistema digital con respecto a la referencia del blanco, la relación de las bandas R, G y B con el

porcentaje de reflexión del patrón blanco deberá garantizar la dinámica más elevada posible de la señal, es decir, que garantice que todas las fases minerales a caracterizar por ADI se sitúen entre (0 y 255).

En realidad, antes de cualquier calibración, ha sido ya establecido el valor de intensidad de luz con el que es posible trabajar con el ADI. Con el valor de la intensidad definido y el conocimiento de que el valor de reflexión del patrón de blanco tiene un valor de reflexión inferior a las fases minerales más reflectivas, será necesario ajustar los niveles RGB con la referencia de blanco a un valor cercano a 200 en la escala de NG.

Al igual que en los casos anteriores de muestreo sobre superficies homogéneas, las medidas se realizarán sobre un ventana de 10×10 *pixels* (Figura 37) en la escena de interés. En este estudio, los resultados se obtienen de medidas realizadas durante 10 minutos por ventana. En este caso en particular, aparte del estadístico media aritmética y mediana, con valores semejantes, será calculada la desviación estándar con el fin de garantizar con más eficacia que la ventana este localizada sobre un área homogénea y sin ningún poro o arranque. La elección de la ventana óptima para el ajuste deberá tener el valor mínimo de desviación estándar en cada banda. Los resultados obtenidos se presentan a continuación (Tabla 2).

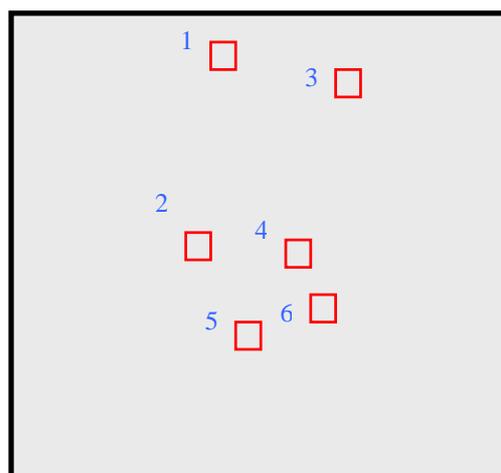


Figura 37. Esquema con la localización aprox. de las ventanas de muestreo.

Ventana	Banda Roja		Banda Verde		Banda Azul	
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.
1	198,2	3,7	180,3	4,2	168,8	3,6
2	199,2	2,8	183,6	2,9	172,2	3,1
3	197,6	3,3	182,5	3,8	170,3	3,4
4	198,7	2,1	178,5	2,4	171,6	2,5
5	201,8	3,2	185,9	2,8	173,4	3,2
6	196,1	3,4	176,2	3,6	167,9	4,1

Tabla 2. Respuesta de NG utilizados para la calibración del color.

Identificada la ventana con menor variación de los niveles de gris (ventana 4), se modificarán los controles de la cámara hasta obtener los tres niveles lo más parecidos entre sí e iguales a 200. En la práctica, la cámara solo permite variar directamente los valores correspondientes a las bandas Roja y Azul, dejando la banda Verde ligada a los valores de las otras dos bandas pero sin que el operador pueda controlar directamente sus cambios. El resultado del ajuste de *gain* óptimo se presenta a continuación (Figura 38).

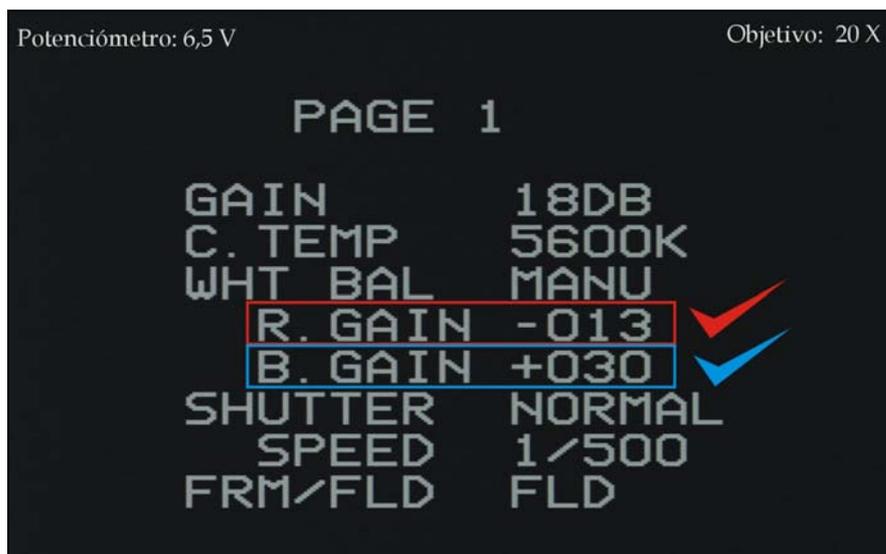


Figura 38. Configuración del *gain* de la cámara de video CCD.

El resultado de utilizar esta nueva configuración es el siguiente (Tabla 3):

Ventana de Muestreo (10*10) pixels. N-4		Sin Corrección de Color	Con Corrección de Color
Bandas de color	Estadísticos		
Banda Roja	Media	198,7	200,3
	Des. Est.	2,1	2,2
Banda Verde	Media	178,5	199,5
	Des. Est.	2,4	2,6
Banda Azul	Media	171,6	199,6
	Des. Est.	2,5	2,4

Tabla 3. Respuestas de NG utilizadas para la calibración del color.

Es importante señalar que la corrección de color de la cámara de video estará condicionada a que la intensidad de luz permanezca constante e igual a la previamente establecida. La variación de la posición del potenciómetro o de la intensidad de luz provocará que el espectro de luz incidente cambie, originando un nuevo sistema de referencia para el sistema digital que motivaría la calibración del color para esas condiciones.

IV.3.5 Deriva Espacial

Aunque se consiguieran unas condiciones de adquisición estables, los defectos de fabricación de los diodos de la cámara digital CCD, la inadecuada iluminación por incorrecto centrado de la fuente y los también defectos de fabricación de lámparas y óptica del microscopio, provocan que un mismo objeto no dé la misma respuesta en nivel de gris en función de su localización espacial bajo el microscopio. Este error o variación se conoce como deriva espacial.

El nivel de deriva espacial existente en el equipo de ADI será en primer lugar cuantificado a través del cálculo de variación en NG de una misma zona, pero en diferentes posiciones. Para este cálculo se ha localizado alguna referencia en la

probeta o patrón que permita aplicar una ventana de muestreo de 10*10 *pixels*, independientemente de su posición dentro del campo de visión y captura.

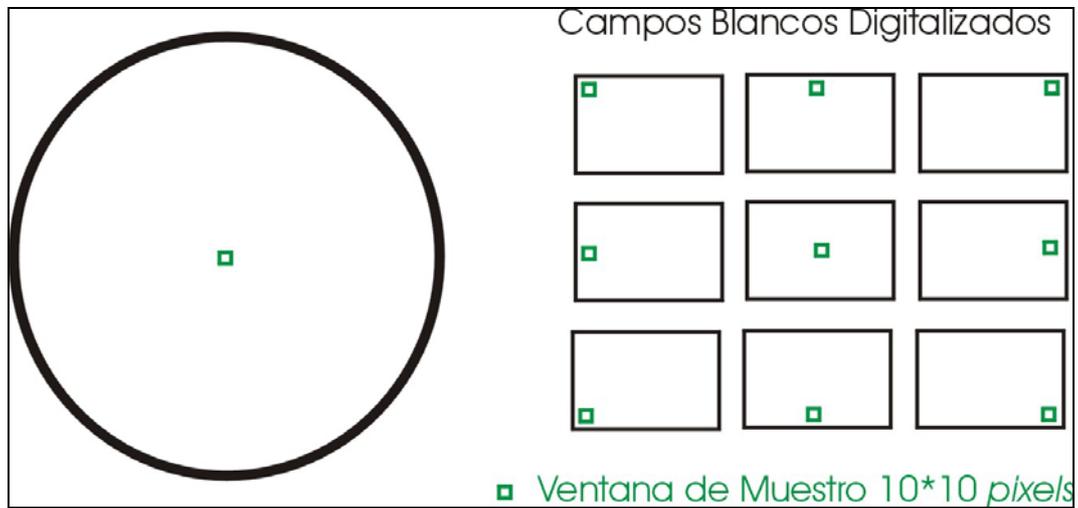


Figura 39. Esquema de localización de la ventana de muestreo.

Los valores medios de los *pixels* localizados dentro de la ventana de muestreo, de una misma escena en diferente posición (Figura 39) son los siguientes (Tabla 4):

Localización Ventana	Banda Roja		Banda Verde		Banda Azul	
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.
Izq-Sup	203,7	3,2	203,5	2,4	201,6	2,5
Izq-Centro	202,8	4,1	201,9	2,8	203,4	2,2
Izq-Inf	200,1	5,2	201,2	3,6	201,9	2,1
Centro-Sup	200,1	2,1	200,5	2,4	199,6	2,5
Centro-Cen.	201,8	3,2	199,9	2,8	199,4	3,2
Centro-Inf	197,1	3,4	199,6	3,6	198,9	3,1
Der-Sup	198,7	3,1	199,5	2,4	197,6	2,5
Der-Centro	197,8	4,2	198,9	2,8	198,4	3,2
Der-Inf	199,1	4,4	197,2	3,6	199,3	4,1

Tabla 4. Resultados de la valoración de la deriva espacial sobre imágenes sin corregir.

La interpretación de estos valores, aún tomando en cuenta la poca cantidad de datos extraídos, nos da ya idea de que existe una deriva espacial en las medidas. Según sea la localización óptica de la ventana de muestreo, de una misma escena, si ésta está más alejada del centro hacia la izquierda, el valor medio de NG para las tres bandas tiende a aumentar; en cambio, si se toman los valores más hacia la derecha, de forma general los valores medios tienden a disminuir.

El fundamento y aplicación de la corrección numérica de la deriva espacial presente en las imágenes minerales estudiadas ya ha sido abordada en el apartado de metodología correspondiente a la corrección de deriva espacial en la cámara CCD empleada (ver apartado III.2.3.2).

Como variables de la fórmula se encuentran: la imagen en color a corregir, la imagen de un patrón blanco y la imagen de un patrón negro. Todas estas imágenes han sido adquiridas, corregidas y tratadas según los procedimientos anteriormente detallados.

Es importante destacar que para hacer posible la aplicación de la fórmula de corrección, ha sido necesario cambiar el formato de la imagen en color RGB con 8 *bites*, a una con 16 *bites* para, de esta forma, evitar la pérdida de información durante las operaciones. Finalmente, el formato de la imagen en color resultante se convertirá a 8 *bites*.

Debido a la imposibilidad de cambiar la profundidad de las imágenes de 8 a 16 *bites* con el *software* empleado durante todo este trabajo, se ha realizado una rutina específica utilizando el *software* de ADI *Micro Image 4.0* (Olympus Optical Co.), empleado por el IGME en sus aplicaciones e investigaciones.

Un ejemplo práctico de su secuencia de aplicación se presenta en el siguiente esquema (Figura 40).

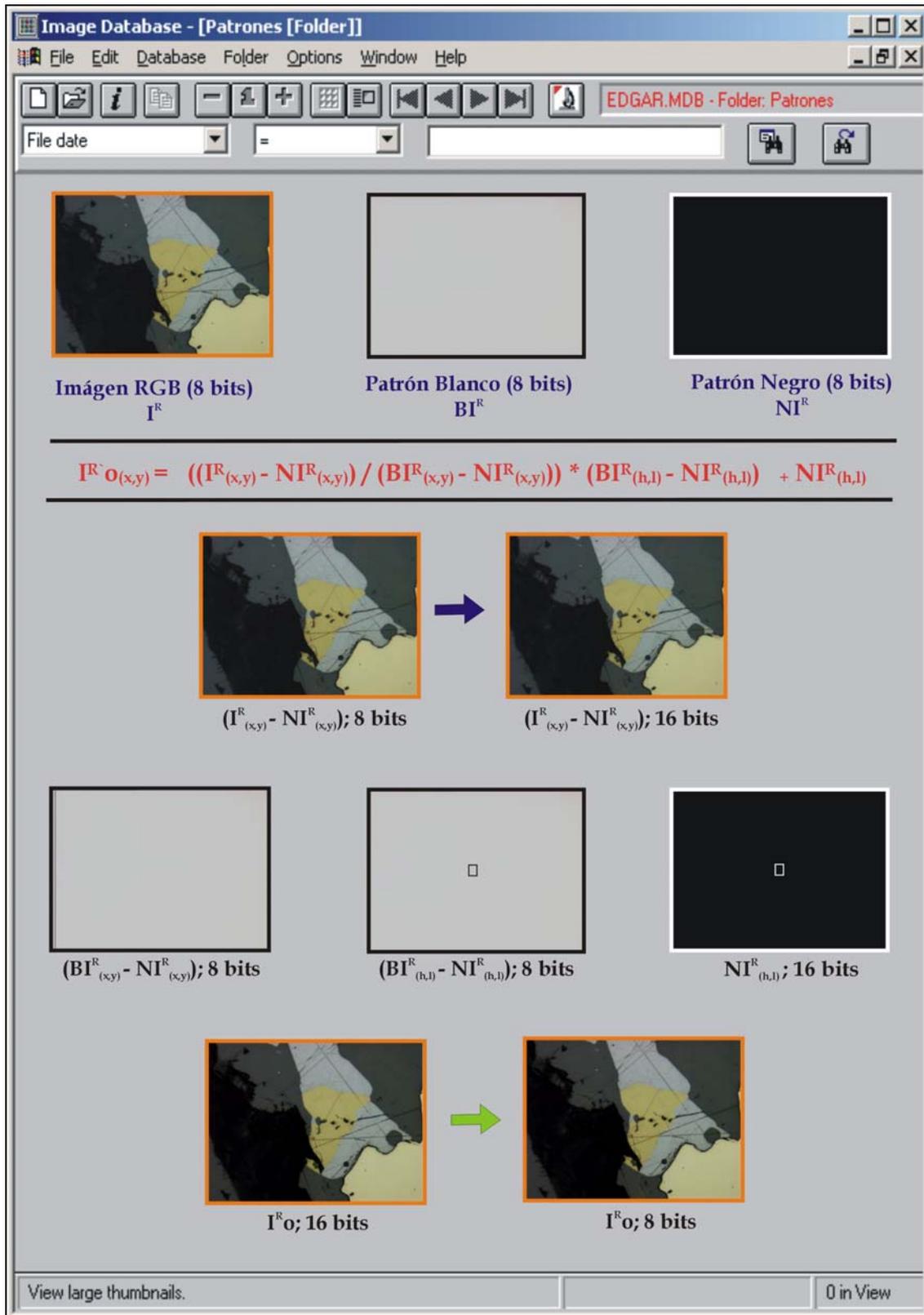


Figura 40. Corrección numérica de las imágenes (Micro Image 4.0).

Al aplicar la corrección numérica a la escena blanca antes caracterizada (Figura 39), y calcular los valores de la media y desviación estandar para ventanas de muestreo de 10×10 *pixels*, se han obtenido los siguientes valores (Tabla 5):

Localización Ventana	Banda Roja		Banda Verde		Banda Azul	
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.
Izq-Sup	200,5	3,1	200,3	2,3	201,3	2,9
Izq-Centro	200,6	4,1	200,7	2,9	200,4	2,5
Izq-Inf	200,2	5,2	201,6	3,3	200,2	2,3
Centro-Sup	200,1	2,1	200,5	2,2	200,3	2,4
Centro-Cen.	200,8	2,9	199,9	2,6	199,2	3,3
Centro-Inf	199,4	3,5	200,5	3,7	199,3	3,4
Der-Sup	199,5	3,1	200,4	2,5	199,4	2,4
Der-Centro	199,8	3,8	200,2	3,2	199,5	3,3
Der-Inf	200,1	4,3	200,1	3,6	199,3	3,9

Tabla 5. Resultados de la valoración de la deriva espacial sobre imágenes corregidas.

Los valores medios en NG calculados sobre la escena blanca corregida numéricamente (Figura 39), presentan mayor semejanza que los determinados sobre la misma escena sin corregir (Tabla 5). Esto avala la importancia de realizar esta corrección sobre todas las imágenes a caracterizar mediante ADI.

IV.3.6 Calibración Geométrica

La relación existente entre el tamaño real de los objetos o escenas presentes en una imagen digital y el valor asumido por el equipo de ADI en la digitalización de la imagen ha sido calculada utilizando un micrómetro (LEITZ G m. b.H.). Esta relación se encuentra expresada a través de las siguientes unidades: micras (μm) / *pixel*. Tal como ha sido mencionado con anterioridad, en este estudio se trabajará con un objetivo de 20 X. El resultado de la calibración geométrica (Tabla 6) con este objetivo nos da una equivalencia de 0,312 micras por píxel.

MICROSCOPIO DMRXP			
OBJETIVO	5x	10x	20x
Micras/pixel	1,248	0,624	0,312

Tabla 6. Valores de calibración geométrica para el equipo.

Según Rochow & Tucker (1994), unos parámetros a tener en cuenta en la calibración geométrica a desarrollar son la magnificación de la imagen y la resolución óptica de los objetivos utilizados.

La magnificación del sistema es definida como relación entre el tamaño real de la imagen digital y el tamaño de su visualización en el monitor. A continuación, en la Tabla 7, se presenta la magnificación por omisión que entrega el *software* de ADI (Castroviejo *et al.*, 2002), pudiendo ser variable según requerimientos del usuario.

MICROSCOPIO DMRXP			
OBJETIVO	5x	10x	20x
MAGNIFICACIÓN	50:1	100:1	200:1

Tabla 7. Magnificación de la Imagen presentada por el *Software* de ADI utilizado.

La resolución óptica teórica para los diferentes objetivos es función de la apertura numérica NA de cada objetivo y la longitud de onda de la luz utilizada ($\gamma \approx 0,55 \mu\text{m}$). Es decir, $R = \gamma/2NA$. Los valores encontrados se representan en la Tabla 8.

MICROSCOPIO DMRXP			
OBJETIVO/NA	5x/0.112	10x/0,225	20x/0,45
Tamaño mínimo (μm)	2,4	1,2.	0,61

Tabla 8. Resolución óptica teórica de los objetivos utilizados.

IV.4 PROCESO Y ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES

IV.4.1 Adquisición de las Imágenes

La adquisición de las imágenes ha sido realizada de forma independiente a las otras etapas del análisis y procesamiento digital de imágenes, a fin de facilitar el control de calidad de este proceso.

El procedimiento de adquisición tal como ha sido descrito anteriormente en la metodología específica, se desarrolla de forma semiautomática. La parte manual de la adquisición consiste en el enfoque y localización de la escena de interés. La captura, digitalización y almacenamiento de la información se realiza de forma automática, por medio de una secuencia de comandos incluidos en una rutina realizada para ese propósito (Anexo 3).

Tal como ya ha sido mencionado con anterioridad, es en este proceso donde se incluye el proceso de promediado a fin de eliminar el ruido oscilante que ha sido detectado en la señal respuesta. Por este motivo, la imagen original ya llevará en realidad un primer tratamiento denominado promediado. La operación de adquisición de las imágenes a través del equipo de ADI debe ser llevada a cabo tomando en cuenta los siguiente criterios iniciales:

- Equipo de ADI ajustado y puesto a punto.
- Probeta pulida en condiciones óptimas (pulido y limpieza).
- Microscopio con objetivo aire 20 X.
- Configurar en el *Software* de ADI la cámara de video CCD.

La rutina de adquisición, como el resto de rutinas desarrolladas en el presente estudio, han sido programadas en el lenguaje *Visual Basic*. El algoritmo general de la rutina de adquisición es el siguiente (Figura 41):

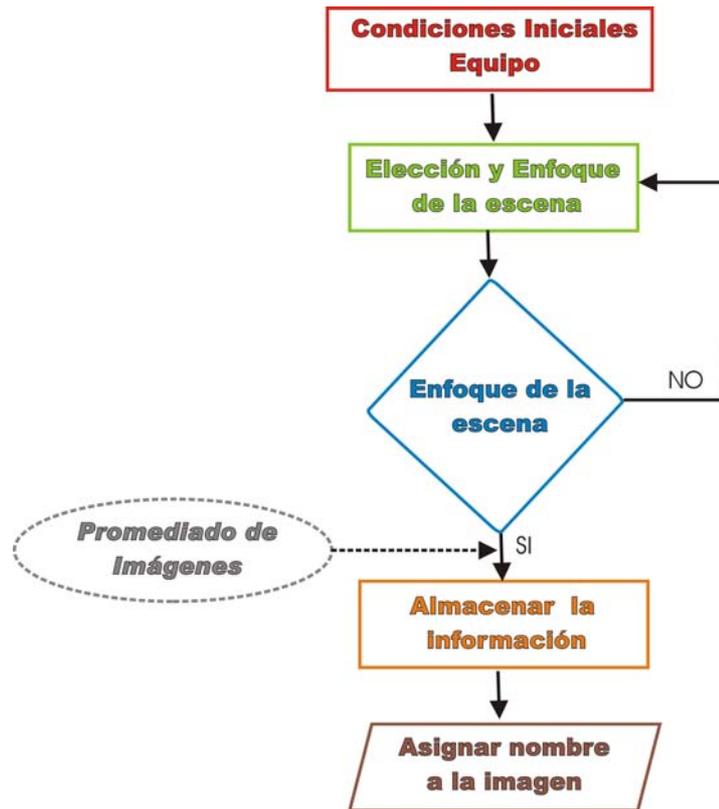


Figura 41. Algoritmo de adquisición de imágenes.

Las imágenes adquiridas son almacenadas en un archivo *.Tiff*. Un ejemplo de las imágenes adquiridas se ven en la Figura 42.

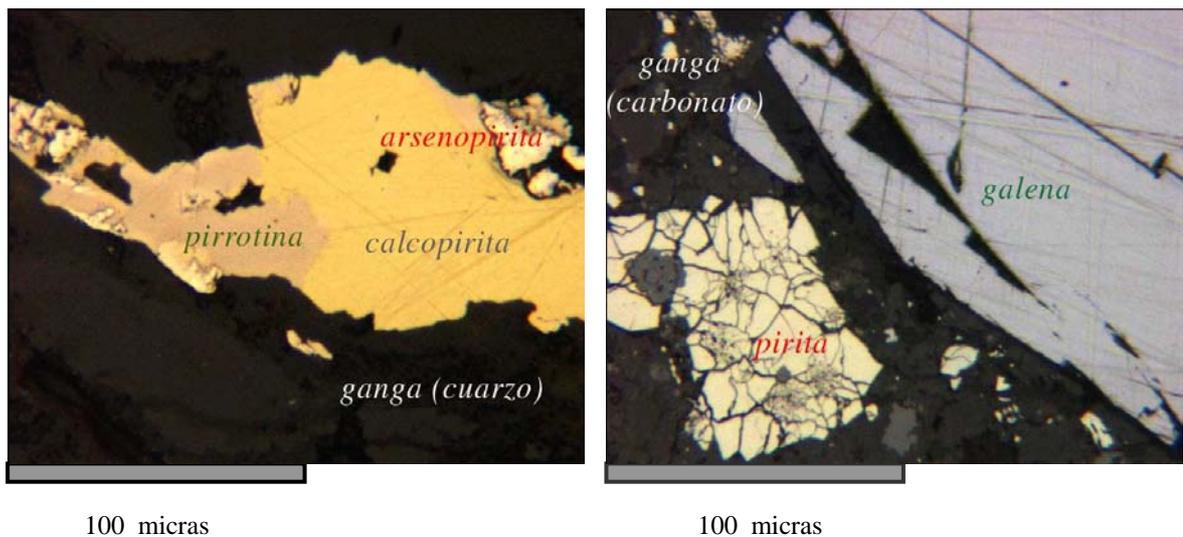


Figura 42. Imágenes adquiridas por ADI. Mineralogía y escala indicadas.

El número de imágenes tomadas y el aumento con que se adquieran éstas dependerá del tipo de medidas que se plantee hacer sobre las imágenes (áreas de granos, tamaño de granos, etc). Aunque no sea el objetivo de este apartado (ver aplicaciones IV.7), a continuación se presenta de forma general el procedimiento a seguir a fin de cumplir con los criterios de muestreo posibles durante la adquisición de imágenes.

- a) Muestreo aleatorio: Comprende la adquisición de imágenes con una localización en la probeta seleccionada de forma aleatoria.
- b) Malla de muestreo: La localización de las imágenes a adquirir corresponderá a una malla de muestreo diseñada previamente.
- c) Barrido total: Se obtiene como consecuencia del muestreo (adquisición de imágenes) de toda la probeta al completo.

De estas tres posibilidades, en la primera es necesario generar la localización de la zona para adquirir la imagen (coordenadas x,y) utilizando un función que nos dé valores aleatorios. Para la segunda forma de muestreo es necesario fijar la cantidad de imágenes que se adquirirá y el salto que habrá entre ellas. Finalmente, en la adquisición de imágenes que representan al completo la superficie de muestreo, es necesario fijar el salto de imagen adecuado, de tal forma que las imágenes se solapen correctamente.

En los tres casos puede producirse la situación de que una o más fases presentes en la imagen estén cortadas por el borde de la imagen. En los casos a y b, la solución supone cambiar el aumento del objetivo.

En el caso c, aunque la imágenes adquiridas representan toda la probeta, cada imagen es analizada y caracterizada de forma individual. En la situación en que el objeto de la aplicación sea el cálculo del área de una o más fases presentes, no habría ningún problema por cuanto los valores totales de la probeta resultarían de la sumas del análisis de cada imagen. No ocurre lo mismo si la información que se quiere

extraer de la imagen es el tamaño de grano de una o más fases. En este caso, si el grano está cortado por el borde de la imagen, el valor que se mida no será el que tiene en la probeta. Para solucionarlo será necesario realizar un montaje de las imágenes adquiridas, referenciando a cada una de ellas según su localización original para generar un mosaico de imágenes.

Para referenciar las imágenes se ha utilizado un Sistema de Información Geográfica (SIG) empleado habitualmente para trabajar tanto con datos raster como vectoriales (ArcMap 8.3). El procedimiento seguido ha consistido en asignar a tres puntos de la imagen (vértices) unos valores (X, Y) según su localización en la probeta. A partir de las imágenes referenciadas se obtiene un mosaico (conjunto de imágenes) con el número de imágenes que necesitemos. Es importante indicar que no es posible generar un mosaico con todas las imágenes de una probeta debido al gran tamaño que éste tendría.

Un ejemplo de este tipo de muestreo se presenta en la Lámina 1. En este caso, para el diseño del mosaico han sido utilizadas 48 imágenes adquiridas con el objetivo 20 X. Cada una de las imágenes presentadas ha sido adquirida utilizando un promediado con 16 imágenes pero no han sido tratadas con filtros.

Hay que señalar que con el equipo de ADI, utilizando un objetivo de 2,5 X, es posible adquirir imágenes que representan hasta el triple de la escena presentada en el mosaico de 48 imágenes. El problema está en que mientras la resolución del mosaico (objetivo 20 X) permite definir objetos de aproximadamente 0.61 μm , la de una imagen capturada utilizando objetivo de 2,5 X solo permite definir objetos con tamaño aproximado de 4.88 μm .

Al momento de guardar o almacenar las imágenes, el nombre que se le asigne a la imagen deberá estar formado por dos partes: cadena de texto y número, y a continuación la extensión correspondiente. Ejemplo: Imagen1.jpg, Imagen2.jpg.

Lámina 1. Mosaico -Barrido total-

IV.4.2 Tratamiento de las Imágenes

Debido al conjunto de correcciones realizadas al equipo instrumental y la calidad intrínseca del equipo, las imágenes originales (promediadas) presentan un buen contraste entre las fases minerales presentes y una gran resolución. Aún así, es posible mejorar la información de origen a partir de la aplicación de secuencias de tratamiento. En concreto, estas operaciones de tratamiento permitirán eliminar algún ruido residual, defectos de pulido, sombras, etc., permitiendo una mejora del contraste y resolución de las imágenes.

Aunque el fundamento teórico de las operaciones de tratamiento que pueden ser aplicadas ya ha sido tratado en apartados anteriores (fundamentos teóricos del tratamiento de imágenes), a continuación se presenta con más detalle la secuencia de aplicación y el tipo de filtros empleados en el presente trabajo:

La secuencia de tratamiento aplicada es fruto de la experimentación de muchas posibles alternativas. La elección de la óptima ha seguido los siguientes criterios:

- a) Tiempo de aplicación mínimo.
- b) Universalidad de la función a utilizar.
- c) Evitar pérdida de información.

La secuencia de tratamiento seleccionada es la siguiente:

1. Filtros de Mejora (*Enhancement*):

- a) *Median* (Mediana): Este filtro es utilizado a fin de eliminar ruidos aleatorios y picos sin significado. El filtro mediana reemplaza el *pixel* central con el valor mediana de entre sus vecinos. En este estudio se consideran 9 vecinos (incluido el *pixel* a modificar) definidos a través de una matriz 3*3. El número de veces que se pasa el filtro por la imagen es igual a 1.

Se observa que este filtro (Figura 43) es capaz de eliminar muestras ruidosas de tipo impulsivo a la vez que mantiene los bordes nítidos, cualidades muy interesantes en este trabajo.

- b.) *Low pass*** (Filtro Paso Bajo): Este filtro es utilizado a fin de suavizar la imagen por eliminación de información de alta frecuencia. El filtro de paso bajo reemplaza el *píxel* central con el valor medio de entre sus vecinos. En este estudio se consideran 9 vecinos (incluido el *píxel* a modificar), éstos están definidos a través de una matriz 3*3. El número de veces que se pasa el filtro por la imagen es igual a 1.

Este filtro (Figura 43) es capaz de eliminar principalmente ruidos aleatorios.

Para la aplicación de estos dos filtros ha sido necesario definir el tamaño del *Kernel* (matriz) y los *Passes* (número de veces que será aplicado el filtro en la imagen). Los valores utilizados son: *Kernel Size: 3 * 3* y *Passes: 1*.



Figura 43. Aplicación de los Filtros de mejora (*Median* y *Low Pass*).

2. Filtros Morfológicos:

- b) *Open*** (Apertura): Este filtro de tipo morfológico aplica una secuencia de erosión (*erode*, reducción de los objetos brillantes y ampliación de los cuerpos oscuros) y una de dilatación (*dilate*, dilatación de los objetos brillantes y reducción de los objetos oscuros).

En términos generales, el filtro *open* (Figura 44) rompe las pequeñas conexiones entre objetos o fases brillantes y elimina pequeños puntos brillantes dentro de cuerpos más oscuros.

- c) *Close* (Cierre): Este filtro de tipo morfológico aplica una secuencia de dilatación (*dilate*, dilatación de los objetos brillantes y reducción de los objetos oscuros) y una de erosión (*erode*, reducción de los objetos brillantes y ampliación de los cuerpos oscuros).

El fin de aplicar el filtro *close* (Figura 44) es romper las pequeñas conexiones entre objetos o fases oscuras y eliminar los pequeños puntos mas oscuros dentro de fases más brillantes.



Figura 44. Aplicación de los Filtros morfológicos (*Open* y *Close*).

Para la aplicación de estos dos filtros morfológicos ha sido necesario definir el *Kernel* (matriz) y los *Passes* (número de veces que será aplicado el filtro en la imagen). Los valores utilizados son: ***Kernel Size: 2 * 2*** y ***Passes: 1***.

Establecida la secuencia de tratamiento, ésta será ejecutada automáticamente a través de una rutina o programa específicamente desarrollado para el tratamiento de las imágenes digitales empleadas en este proyecto.

El detalle de la rutina se encuentre en el Anexo 3. En general, esta rutina presenta la siguiente estructura (Figura 45):



Figura 45. Algoritmo de adquisición de imágenes.

Un ejemplo más completo de la aplicación de los diferentes filtros se presenta en la Lámina 2. En este caso se presenta la evolución que sufren 8 imágenes digitales tomadas siguiendo un barrido total (Ver apartado IV.4.1) al ser sometida al proceso de tratamiento empleado en este proyecto.

En primera instancia aparecen las 8 imágenes sin ningún tratamiento previo. A continuación se presentan las mismas 8 imágenes pero adquiridas utilizando un promediado (16 imágenes). La siguiente escena representa a las 8 imágenes sometidas a los filtros de mejora (*Median* y *Low Pass*). Finalmente se observan las imágenes sometidas a los filtros morfológicos (*Open* y *Close*). La imagen resultante de todo este proceso se llama genéricamente “Imagen Tratada”. Es evidente que el paso más importante por lo que respecta a la calidad de las imágenes se da durante el proceso de adquisición de las mismas (promediado de imágenes). Si se fallara en este punto, ningún filtro podría solventar el problema presentado.

Lámina 2. Secuencia de tratamiento aplicada sobre 8 imágenes digitales.

IV.4.3 Caracterización de las fases minerales mediante ADI

IV.4.3.1 Introducción

Con la caracterización de las fases minerales de interés presentes en las probetas de referencia, se persigue determinar los rangos de segmentación con los cuales hacer posible la identificación correcta de los minerales presentes en imágenes digitales.

Para la consecución de los rangos de segmentación que permitan identificar las fases minerales, antes de plantear el estudio estadístico que permita valorar la posibilidad de encontrarlos y utilizarlos, será necesario asegurarse de que las poblaciones a analizar estén correctamente identificadas (ver apartado metodología III.3.3).

Para la toma de muestras de las distintas poblaciones (fases minerales presentes en muestras estudiadas), se ha diseñado una rutina especial que permite la extracción de los valores NG de los *pixels* de la imagen, dentro de una ventana de muestreo. El tamaño y localización de esta ventana pueden ser seleccionados por el operador.

Durante toda la etapa de muestreo, el tamaño de ventana utilizado ha sido de 10 * 10 *pixels*, garantizándose así que la toma de muestras corresponda a la población en estudio. Los datos resultantes del muestreo se exportan a una hoja electrónica para su posterior tratamiento estadístico.

IV.4.3.2 Condiciones de muestreo

A partir de la experiencia obtenida en el desarrollo de otras aplicaciones de ADI en la caracterización de menas metálicas (Berrezueta, 2000), el número de *pixels* a tomar para representar adecuadamente el comportamiento de una fase mineral (NG)

ha sido obtenido de la comparación entre el área resultante de los distintos muestreos aplicados (distinto número de ventanas) y el área total de la fase estudiada.

En la práctica, se asume que los datos de muestreo tienen una distribución normal igual que los de la población (fase mineral completa). Los rangos de segmentación con ajuste del 95 %, en los distintos muestreos, estarán definidos con la siguiente expresión: $m \pm 2\sigma$, siendo m el valor media y σ la desviación estándar.

La representación gráfica de los % de acierto, expresado como % de área segmentada con respecto al área total de la fase mineral, para algunos minerales, utilizando diferente número de ventanas se presenta en Figura 46.

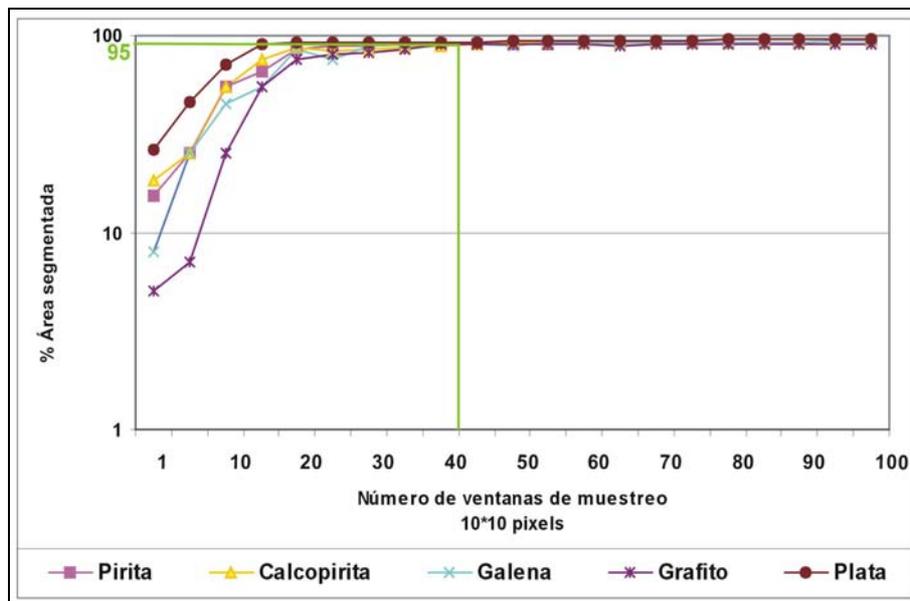


Figura 46. % de Área segmentada según el número de ventanas de muestreo utilizadas.

El análisis de estas curvas ha permitido establecer en 40 el número mínimo de ventanas de 10*10 píxeles (4000 píxeles) con las que es posible conseguir un rango de segmentación que abarque aproximadamente al 95 % de la población, para todos los minerales.

Aunque algunas fases minerales como la plata y pirita necesitan un número inferior de ventanas para alcanzar resultados de segmentación cercanos al 95 %, se ha tomado como referencia, a la hora de fijar el número mínimo de ventanas de muestreo, el número requerido por el grafito para alcanzar estos niveles de segmentación. En este trabajo, el número de ventanas de muestreos utilizado alcanza como media las 100 ventanas. En algunos casos, ante la ausencia de suficientes datos, el número de ventanas se reduce, pero nunca por debajo de 40.

IV.4.3.2 Toma de muestras

La selección de la zona donde será localizada la ventana de muestreo estará a cargo del operador. Los criterios a evaluar para tomar la muestra son:

- Asegurarse que la fase mineral esté perfectamente reconocida.
- La zona de muestreo ha de ser lo más homogénea posible (sin rayas de pulido, sombras, etc.).

Un ejemplo descriptivo de toma de muestras llevada a cabo en este trabajo se presenta en la Lámina 3.

Lámina 3. Ventanas de muestreo 10*10 sobre imágenes digitales.

IV.4.4. Presentación de resultados de caracterización mediante ADI.

Con el fin de facilitar y resumir la presentación e interpretación estadística de los datos del muestreo, ha sido elaborada una ficha para cada fase mineral estudiada.

La primera parte de la ficha comprende la descripción de las propiedades ópticas básicas del mineral en estudio (color, reflectancia, pleocroísmo, etc). A continuación se presentan los datos de muestreo llevados a cabo (procedencia de muestras, número de granos estudiados y número de ventanas muestreadas).

El apartado siguiente está dedicado a la presentación de los parámetros estadísticos calculados para las muestras (media, mediana, desviación estándar, rangos de segmentación, tipo de distribución y valoración de ésta). Además, se podrá observar el histograma y el gráfico "boxplot" con información individualizada de cada banda

En la ficha se incluye un apartado dedicado a la interpretación de los gráficos y parámetros estadísticos antes mencionados. Finalmente, se presenta un ejemplo de aplicación y verificación de los rangos encontrados.

El orden de presentación de las fichas depende, en primer grado, del grupo al que pertenecen los minerales (Elementos nativos, Sulfuros, Sulfosales, Óxidos, Hidróxidos, Tungstatos) y, en segundo término, del criterio alfabético.

GRAFITO C

Propiedades ópticas

- Color:** Gris claro con un tinte anaranjado.
Reflectancia: Baja (22%).
Pleocroísmo: Muy fuerte (marrón).
Anisotropismo: Fuerte (amarillo-marrón violeta).
Reflexiones Internas: No presenta.
Dureza: Baja (1-2)



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 773; HD - 775; Muestras IGME	100	100

Banda Roja

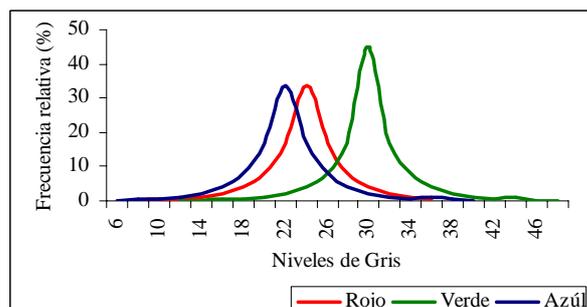
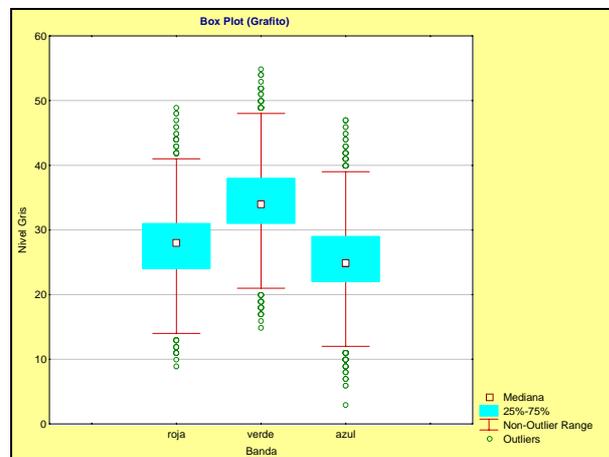
- Media:** 28,83
Mediana: 28
Desviación Estándar: 7,27
Tipo de distribución: Normal, R = 0,95
Rango segmentación 95 %: (13 - 43)

Banda Verde

- Media:** 34,39
Mediana: 34
Desviación Estándar: 6,46
Tipo de distribución: Normal, R = 0,96
Rango segmentación 95 %: (21 - 47)

Banda Azul

- Media:** 26,46
Mediana: 25
Desviación Estándar: 7,69
Tipo de distribución: Normal, R = 0,90
Rango segmentación 95 %: (11 - 41)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

El gráfico de “BoxPlot” nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas se encuentra que existe un comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de las tres bandas presentan una dispersión o desviación estándar alta en comparación con otras fases minerales no pleocroicas. El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre una población normal aleatoria con una media y desviación estándar igual a los de la muestra y los datos de la muestra. Los coeficientes de correlación encontrados para las bandas verde y roja son elevados, R , superior a 0,90.

Segmentación del Grafito:

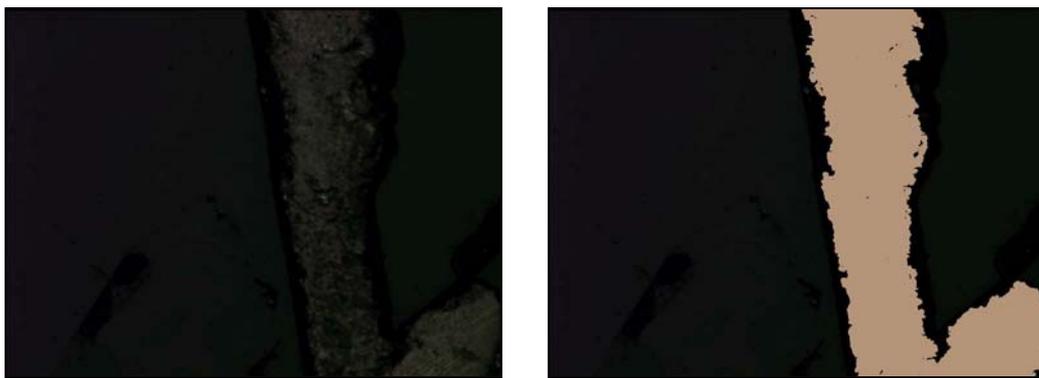


Figura 47. Grafito segmentado utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

ORO Au

Propiedades ópticas

- Color:** Amarillo dorado
- Reflectancia:** Alta (64 - 74 %).
- Pleocroísmo:** No presenta
- Anisotropismo:** No.
- Reflexiones Internas:** Sin reflexiones internas.
- Dureza:** Media-baja (2.5-3). Se raya con facilidad.



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
Muestras Vetas Bruja y Gruesa	30	100

Banda Roja

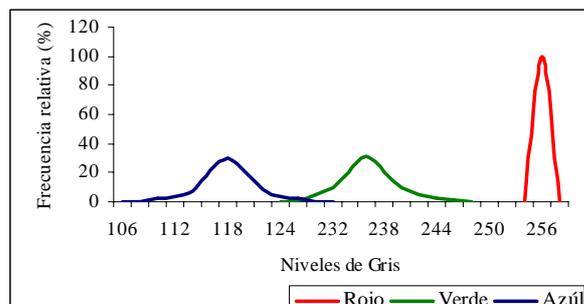
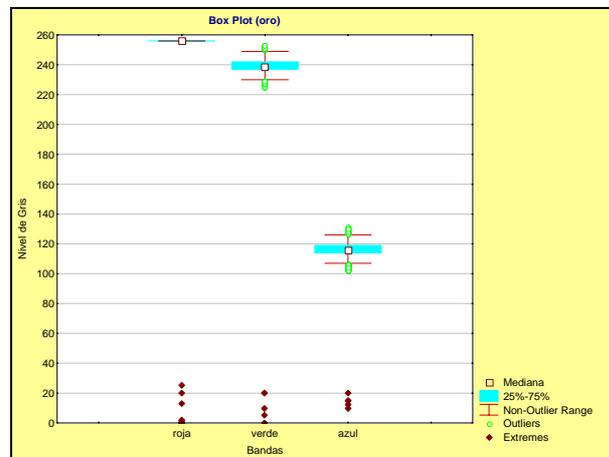
- Media:** 255
- Mediana:** 255
- Desviación Estándar:** 0
- Tipo de distribución:**
- Rango segmentación 100 %:** (255 - 255)

Banda Verde

- Media:** 239,23
- Mediana:** 239
- Desviación Estándar:** 2,12
- Tipo de distribución:** Normal, R = 0,92
- Rango segmentación 95 %:** (235 - 243)

Banda Azul

- Media:** 116,31
- Mediana:** 116
- Desviación Estándar:** 2,40
- Tipo de distribución:** Normal, R = 0,91
- Rango segmentación 95 %:** (112 - 121)



Interpretación de resultados

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango esperado. Es decir, pueden ser considerados como anómalos. Los valores que presentan estos denominados datos anómalos corresponden a las manchas o sombras típicas que se dan en el Oro debido a su muy baja dureza. Estos valores serán eliminados a la hora de determinar los rangos de segmentación del Oro.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

El diagrama de frecuencias relativas de los valores de NG calculados para las bandas verde y azul presentan un aparente comportamiento normal de la variable. En los dos casos, el coeficiente de Pearson R , es superior a 0,91. En el caso de la banda roja, se presenta un único valor de NG resultado de la saturación de luz en esta banda.

Segmentación del Oro:

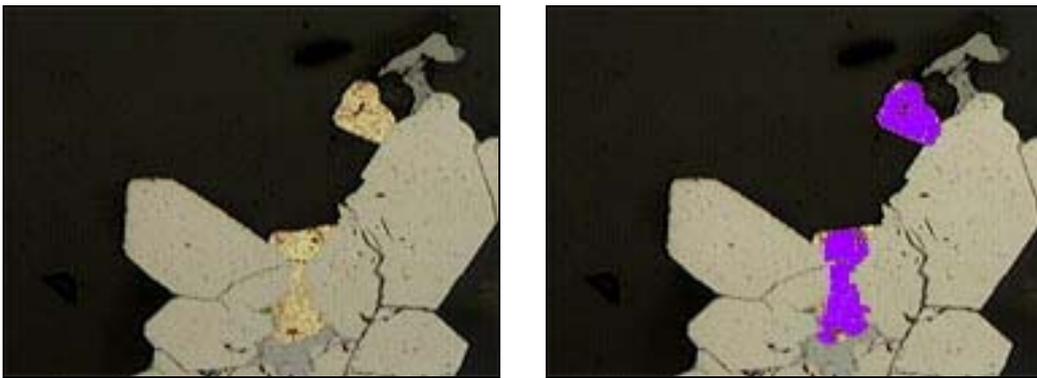
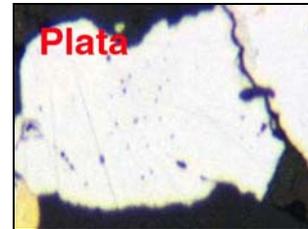


Figura 48. Oro segmentado utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

PLATA Ag

Propiedades ópticas

- Color:** Blanco brillante con tinte cremoso.
- Reflectancia:** Muy alta (93,8 - 96.8%).
- Pleocroísmo:** No presenta.
- Anisotropismo:** No.
- Reflexiones Internas:** Sin reflexiones internas.
- Dureza:** Media - baja (2,5 - 3).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 6153; HD - 6780	60	100

Banda Roja

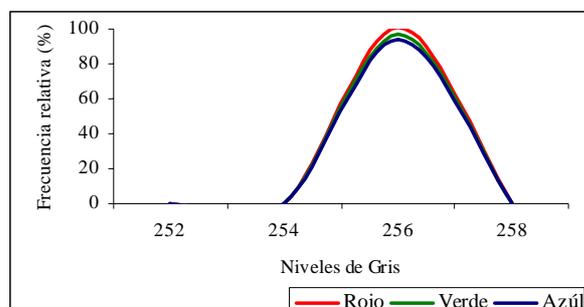
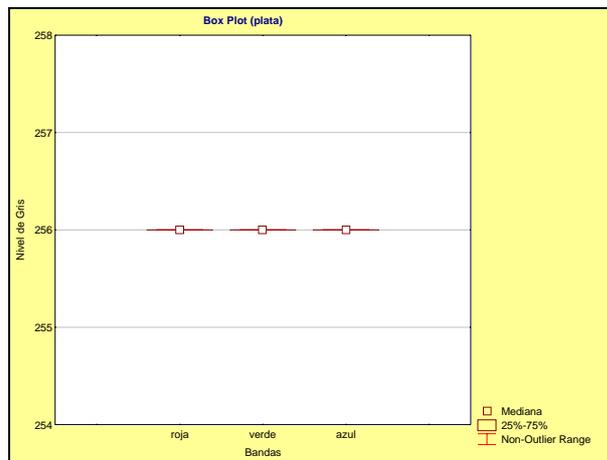
- Media: 255
- Mediana: 255
- Desviación Estándar: 0
- Tipo de distribución:
- Rango segmentación 95 %: (255 - 255)

Banda Verde

- Media: 255
- Mediana: 255
- Desviación Estándar: 0
- Tipo de distribución:
- Rango segmentación 95 %: (255 - 255)

Banda Azul

- Media: 255
- Mediana: 255
- Desviación Estándar: 0
- Tipo de distribución:
- Rango segmentación 95 %: (255- 255)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

En el gráfico de "BoxPlot" se presenta la concentración del valor de NG para las tres bandas en un único valor.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

Si se observa los diagramas de frecuencia desarrollados para las tres bandas en que se ha descompuesto la información, se encuentra que los valores, para los tres casos, se concentran en una sola clase (255 - 256), coincidiendo con el máximo valor en NG que es capaz de detectar el equipo de ADI. Esto sucede debido a que con la intensidad de luz con la que se trabaja y al alto nivel de reflectancia de este mineral, no es posible obtener unas medidas que reflejen el alto poder reflectante de la Plata nativa. Aún así, la presencia de estos valores tan altos en las tres bandas nos permitirán utilizarlos para diferenciar esta fase de los otros abordados en este estudio que no llegan a estos resultados.

Segmentación de Plata:

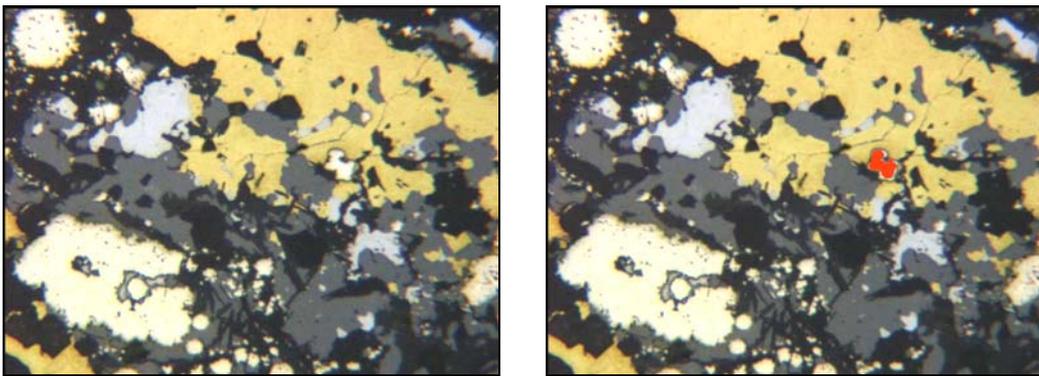


Figura 49. Plata segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

PLATINO Pt

Propiedades ópticas

Color: Blanco azulado

Reflectancia: Alta (70%).

Pleocroísmo: Ninguno.

Anisotropismo: No.

Reflexiones Internas: No presenta.

Dureza: Muy alta para ser un metal (4 . 4,5 %).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
Muestras IGME/Muestras Urales	10	100

Banda Roja

Media: 224,35

Mediana: 226

Desviación Estándar: 1,71

Tipo de distribución: Normal, R = 0.97

Rango segmentación 95 %: (221 - 228)

Banda Verde

Media: 220,64

Mediana: 221

Desviación Estándar: 1,36

Tipo de distribución: Normal, R = 0.96

Rango segmentación 95 %: (218 - 223)

Banda Azul

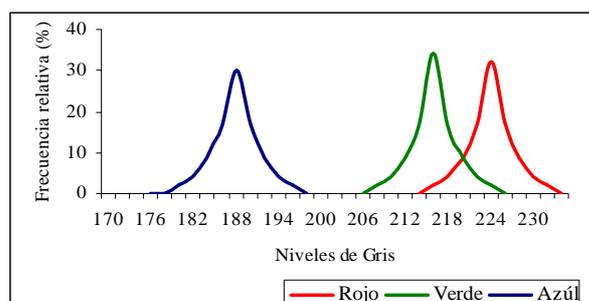
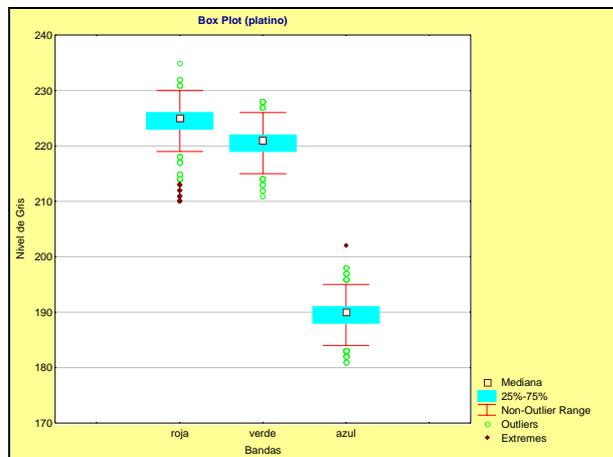
Media: 189,47

Mediana: 190

Desviación Estándar: 1,45

Tipo de distribución: Normal, R = 0.97

Rango segmentación 95 %: (187 - 192)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

El diagrama de frecuencias relativas de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un comportamiento normal, esta apreciación se ve ratificada al analizar los valores del coeficiente de correlación lineal de Pearson calculados para las tres bandas (R, G y B); R, superior a 0,96 para las tres bandas. Es importante mencionar que aunque la reflectancia media del Pt es parecida a la del Au (aproximadamente 70 %), el comportamiento de su valor en cada una de las bandas roja verde y azul es diferente, dando justificación al trabajo de separar el análisis para cada banda.

Segmentación de Platino:

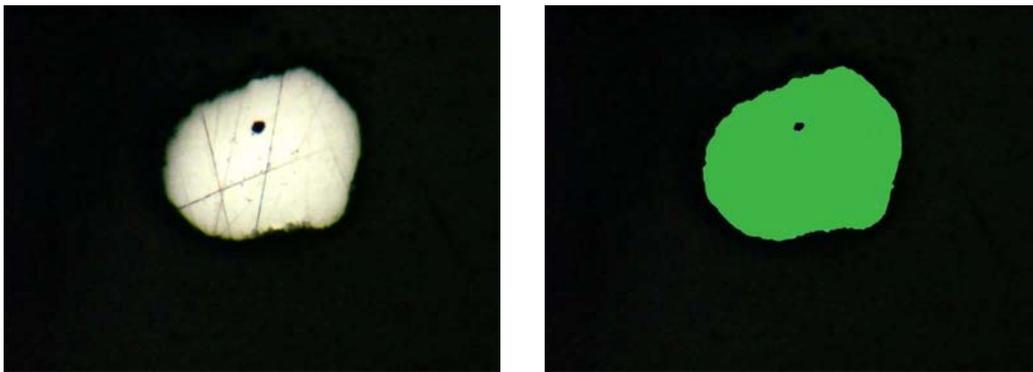


Figura 50. Platino segmentado utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

ARSENOPIRITA FeAsS

Propiedades ópticas

Color: Blanco a amarillo rosado

Reflectancia: Media (43%).

Pleocroísmo: Débil, pero se evidencia.

Anisotropismo: Débil a intermedio (azul claro - amarillo).

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Media (>galena y < esfalerita) (5,5 - 6,5)



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 997; HD - 6784; HD - 6199	70	200

Banda Roja

Media: 187,43

Mediana: 187

Desviación Estándar: 2,22

Tipo de distribución: Normal, R = 0.92

Rango segmentación 95 %: (183 - 192)

Banda Verde

Media: 191,48

Mediana: 191

Desviación Estándar: 2,27

Tipo de distribución: Normal, R = 0.94

Rango segmentación 95 %: (187 - 196)

Banda Azul

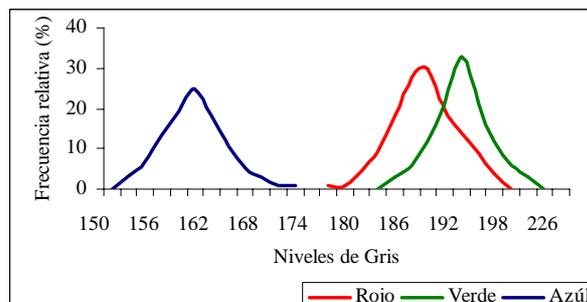
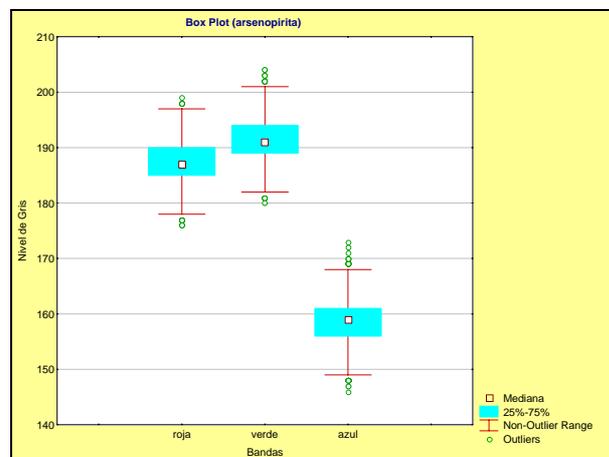
Media: 158,55

Mediana: 159

Desviación Estándar: 2,48

Tipo de distribución: Normal, R = 0.90

Rango segmentación 95 %: (154 - 164)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

El gráfico de “BoxPlot” nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

La observación de los curvas de frecuencia relativas de los valores de NG calculados para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un comportamiento normal de la variable. La desviación estándar de las tres bandas presenta valores semejantes. El supuesto de Normalidad para las tres bandas se verifica comparando la relación (coeficiente de correlación lineal de Pearson) entre una población normal aleatoria con una media y desviación estándar igual a los de la muestra y los datos de la muestra. Los coeficientes de correlación encontrados son altos, R , superior a 0,9 para las tres bandas.

Segmentación de Arsenopirita:

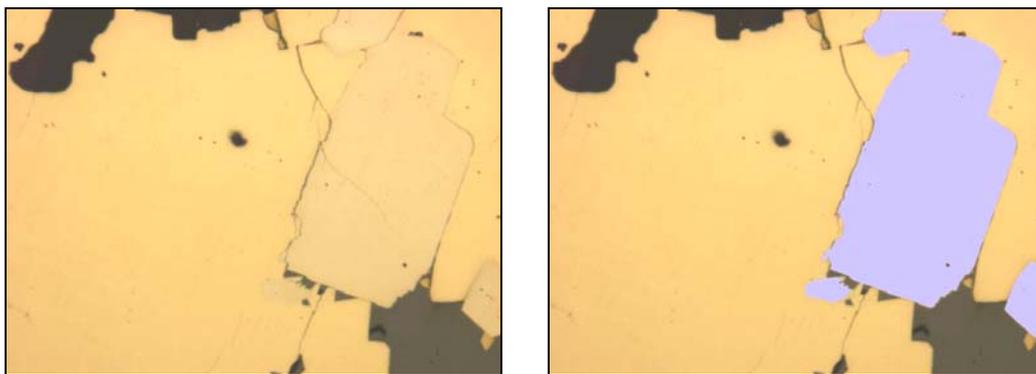


Figura 51. Arsenopirita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

BORNITA Cu_5FeS_4

Propiedades ópticas

Color: Rosado oscuro con tintes violetas

Reflectancia: Baja (22%).

Pleocroísmo: Bajo.

Anisotropismo: Débil, distinguible en aceite.

Reflexiones Internas: Frecuentes. Rojas (>Fe) ó Marrón (<Fe).

Dureza: Media (3).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 6615; HD - 897; HD - 708	60	100

Banda Roja

Media: 91,39

Mediana: 92

Desviación Estándar: 2,36

Tipo de distribución: Normal, R = 0.90

Rango segmentación 95 %: (87 - 96)

Banda Verde

Media: 68,52

Mediana: 68

Desviación Estándar: 2,60

Tipo de distribución: Normal, R = 0.91

Rango segmentación 95 %: (63 - 74)

Banda Azul

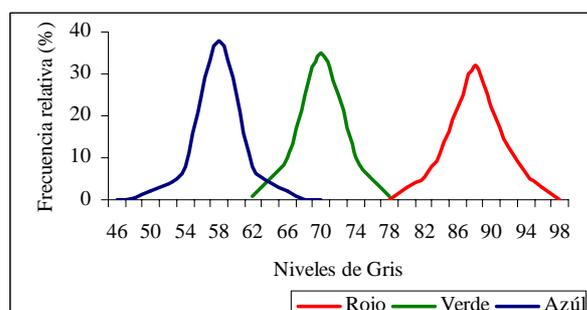
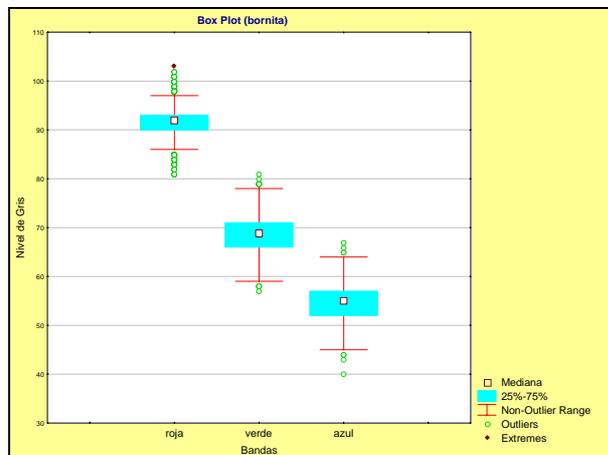
Media: 54,53

Mediana: 55

Desviación Estándar: 2,47

Tipo de distribución: Normal, R = 0.89

Rango segmentación 95 %: (50 - 59)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

La forma de las curvas de frecuencias relativas de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un aparente comportamiento normal de la variable.

La distribución de los NG de la banda azul presenta una desviación estándar superior a las bandas roja y verde. El coeficiente de Pearson da valores cercanos a 0,9, comprobándose el supuesto de normalidad en los tres casos.

Segmentación de Bornita:

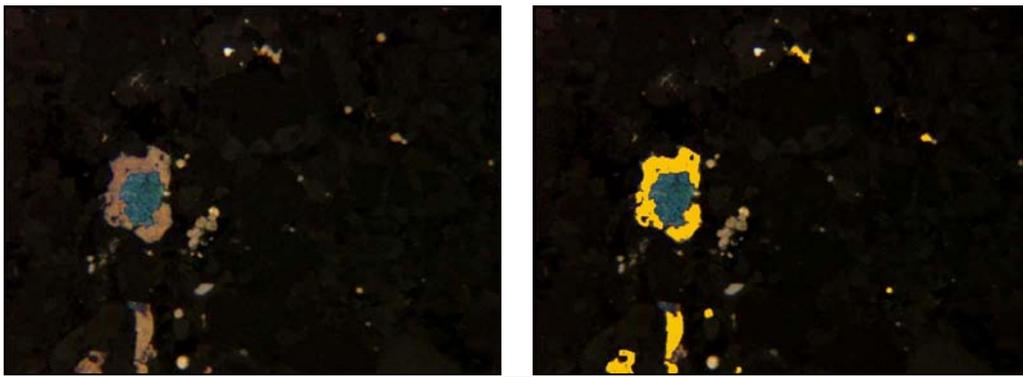


Figura 52. Bornita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

CALCOPIRITA $CuFeS_2$

Propiedades ópticas

- Color:** Amarillo brillante a amarillo verdoso.
- Reflectancia:** Media (43%).
- Pleocroísmo:** Débil, puede presentar maclado.
- Anisotropismo:** Débil.
- Reflexiones Internas:** Sin reflexiones internas.
- Dureza:** Media (>galena y <esfalerita)(3,4 - 4).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 1147; HD - 997; HD - 1146	120	200

Banda Roja

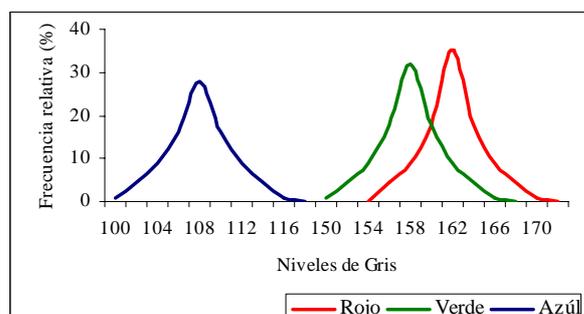
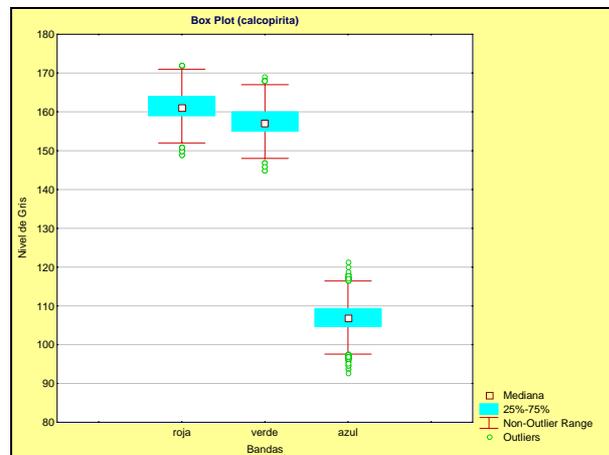
- Media:** 161,61
- Mediana:** 161
- Desviación Estándar:** 2,28
- Tipo de distribución:** Normal, R = 0.96
- Rango segmentación 95 %:** (157 - 166)

Banda Verde

- Media:** 157,44
- Mediana:** 157
- Desviación Estándar:** 3,17
- Tipo de distribución:** Normal, R = 0.95
- Rango segmentación 95 %:** (151 - 164)

Banda Azul

- Media:** 106,89
- Mediana:** 106
- Desviación Estándar:** 2,52
- Tipo de distribución:** Normal, R = 0.97
- Rango segmentación 95 %:** (102 - 112)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

El gráfico de “BoxPlot” nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

El diagrama de frecuencias relativas de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la banda azul presenta una desviación estándar superior a las bandas roja y verde.

La verificación del supuesto de supuesto de Normalidad en la distribución de los NG para las tres bandas, empleando el Coeficiente de correlación lineal de Pearson , presenta valores de R superiores a 0,95 para las tres bandas.

Segmentación de Calcopirita:

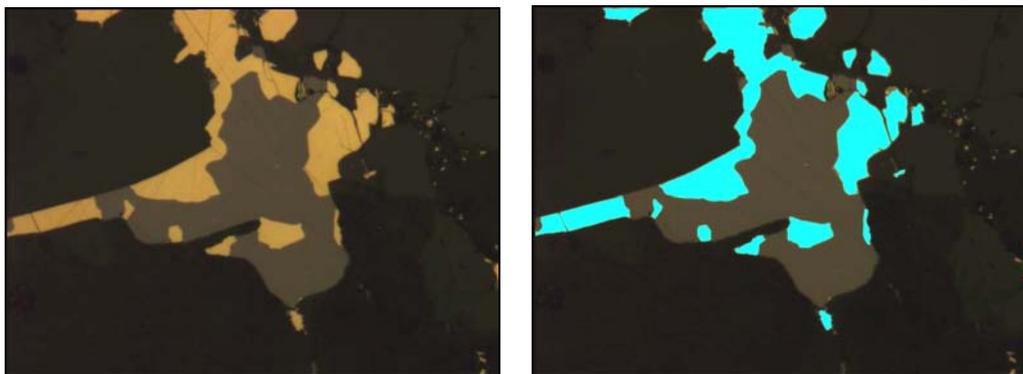


Figura 53. Calcopirita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

CINABRIO HgS

Propiedades ópticas

Color: Blanco a gris azulado.

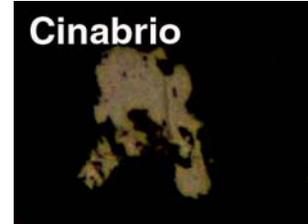
Reflectancia: Media (24 - 29 %).

Pleocroísmo: Fuerte, varía de blanco amarillento a pardo

Anisotropismo: Fuerte pero enmascarado por R.I.

Reflexiones Internas: Fuertes, en colores rojo intenso.

Dureza: Media baja (2 - 2,5).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 893; Muestras IGME	50	100

Banda Roja

Media: 79,64

Mediana: 80

Desviación Estándar: 3,33

Tipo de distribución: Normal, R = 0.86

Rango segmentación 95 %: (73 - 86)

Banda Verde

Media: 89,34

Mediana: 90

Desviación Estándar: 3,31

Tipo de distribución: Normal R = 0.93

Rango segmentación 95 %: (83 - 96)

Banda Azul

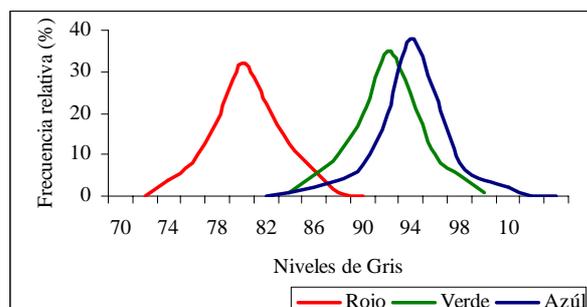
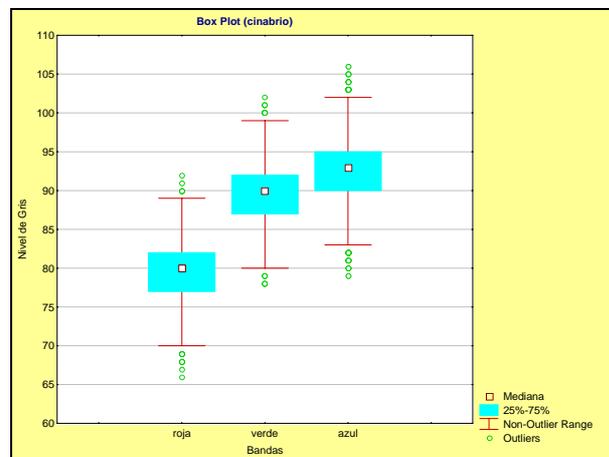
Media: 92,61

Mediana: 93

Desviación Estándar: 3,64

Tipo de distribución: Normal R = 0.90

Rango segmentación 95 %: (85 - 100)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

El gráfico de “BoxPlot” nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la curva de frecuencias relativas de los valores de NG para cada una de las bandas, es posible observar un aparente comportamiento normal de la variable. Esta apreciación se ve ratificada al comprobar que los coeficiente de correlación de Pearson presentan valores de R superiores a 0,89 para las tres bandas. Es importante también mencionar que los valores de desviación estándar de los valores en NG, para las tres bandas (R, G y B) son superiores a los calculados para fases minerales no pleocroicas.

Segmentación de Cinabrio:



Figura 54. Cinabrio segmentado utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

Propiedades ópticas

Color: Azul intenso a azul claro

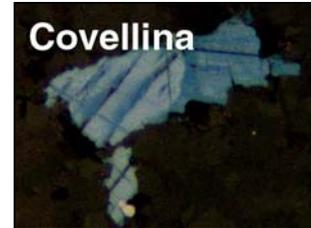
Reflectancia: Baja (14%).

Pleocroísmo: Muy alto

Anisotropismo: Extremo en color naranja.

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Media (> argentita; < galena, calcopirita, calcosina).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 893; HD - 673	20	100

Banda Roja

Media: 41,40

Mediana: 41

Desviación Estándar: 6,37

Tipo de distribución: Normal, R = 0,83

Rango segmentación 95 %: (29 - 54)

Banda Verde

Media: 46,58

Mediana: 47

Desviación Estándar: 5,64

Tipo de distribución: Normal R = 0,87

Rango segmentación 95 %: (35 - 58)

Banda Azul

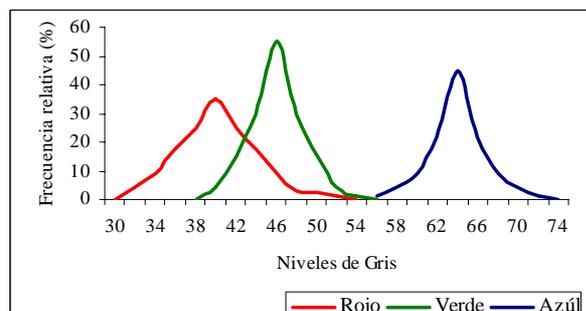
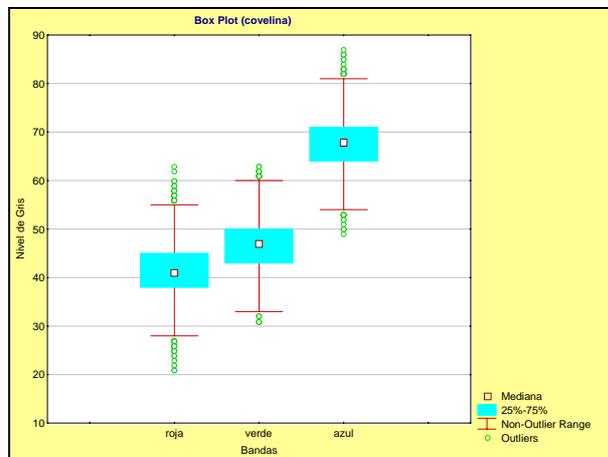
Media: 67,54

Mediana: 68

Desviación Estándar: 5,97

Tipo de distribución: Normal R = 0,88

Rango segmentación 95 %: (56 - 80)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que existen datos extremos o anómalos producto del carácter muy pleocroico de esta fase mineral.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas se encuentra que existe un comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de las tres bandas presentan una dispersión o desviación estándar alta en comparación a otras fases minerales no pleocroicas.

La verificación el supuesto de normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson. Los valores de los coeficientes R son menores a las encontrados hasta ahora en el análisis de otras fases minerales.

Segmentación de Covellina:

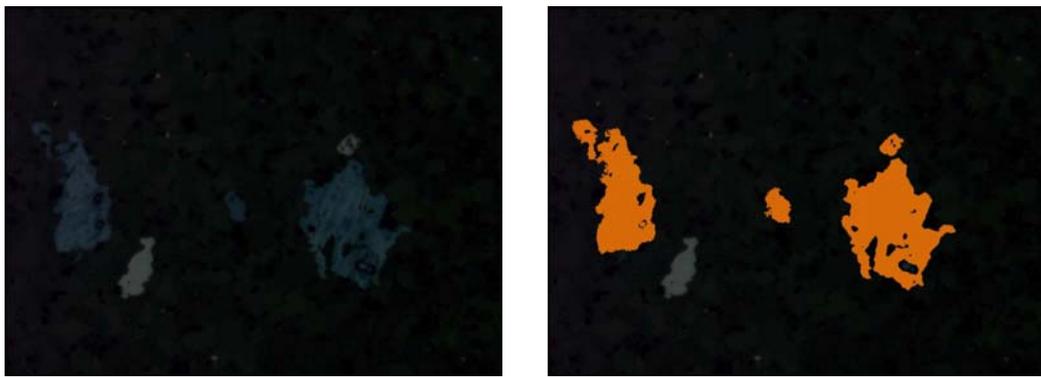


Figura 55. Covellina segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

CUBANITA CuFe_2S_3

Propiedades ópticas

Color: Blanco rosado

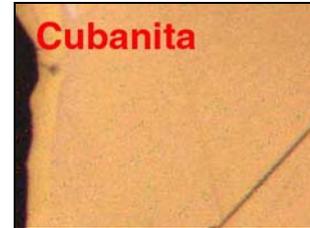
Reflectancia: Alta (71,2-81,2 %).

Pleocroísmo: No presenta

Anisotropismo: No.

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Media(=calcopirita).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 1217; HD - 1217b	60	100

Banda Roja

Media: 129,203

Mediana: 129

Desviación Estándar: 2,35

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (125 - 134)

Banda Verde

Media: 116,44

Mediana: 116

Desviación Estándar: 2,56

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (111 - 122)

Banda Azul

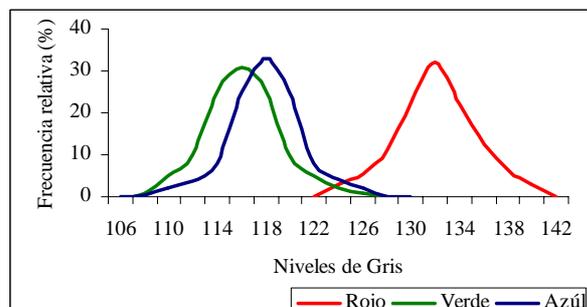
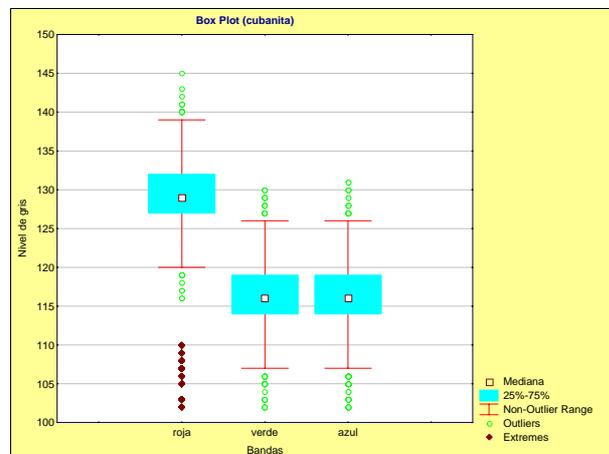
Media: 116,36

Mediana: 117

Desviación Estándar: 2,40

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (112- 121)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que existen valores extremos o anómalos que deberán ser eliminados al momento de establecer los rangos de segmentación.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación de las curvas de frecuencias relativas se encuentra que existe un comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de las tres bandas presentan una dispersión o desviación estándar baja, acorde al carácter no pleocroico de esta fases mineral.

El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson. Los coeficientes de correlación encontrados para las bandas Verde y Roja son elevados (R superior a 0,95).

Segmentación de Cubanita:

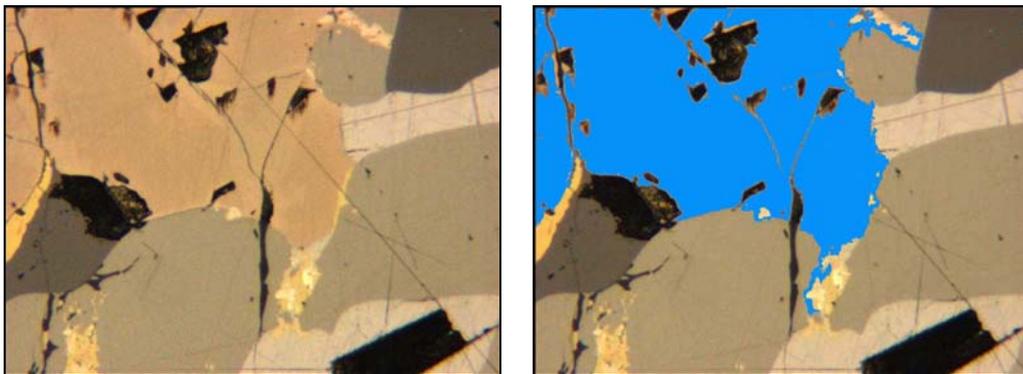


Figura 56. Cubanita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

ESFALERITA ZnS

Propiedades ópticas

Color: Gris

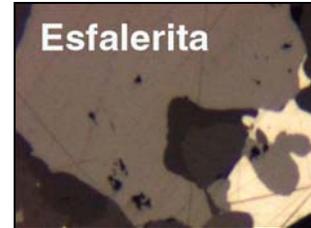
Reflectancia: Baja (17%).

Pleocroísmo: Ninguno.

Anisotropismo: No, isótropo.

Reflexiones Internas: Frecuentes. Rojas (>Fe) ó Marrón (<Fe).

Dureza: Media (> calcopirita, tetrahedrita; < pirrotina)



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD -1147; HD - 997; HD - 6679	120	200

Banda Roja

Media: 56,53

Mediana: 57

Desviación Estándar: 1,81

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (53 - 60)

Banda Verde

Media: 60,52

Mediana: 61

Desviación Estándar: 1,78

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (57 - 64)

Banda Azul

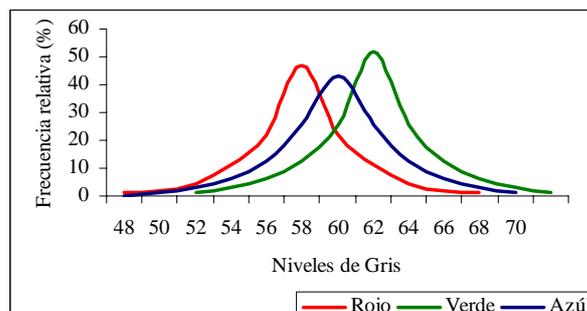
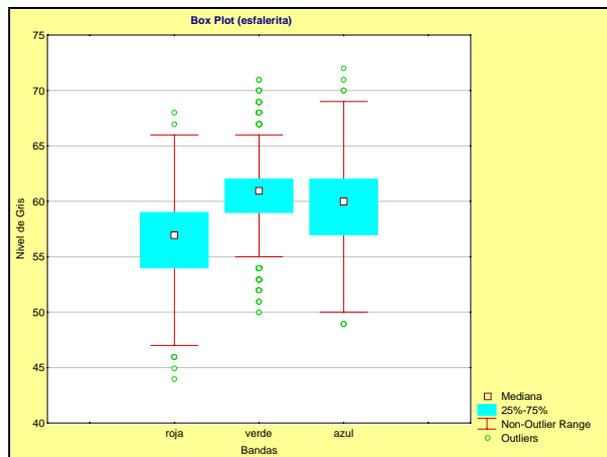
Media: 59,46

Mediana: 60

Desviación Estándar: 1,91

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (56- 63)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

El gráfico de “BoxPlot” nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

El diagrama de frecuencias relativas presenta un comportamiento normal en la distribución de la variable, para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información. El coeficiente de correlación de Pearson proporciona la seguridad de estar trabajando con distribuciones normales (R superior a 0,96.)

La desviación estándar calculada para las bandas Azul y Verde y Roja están dentro de la magnitud esperada para minerales no pleocroicos.

Segmentación de Esfalerita:

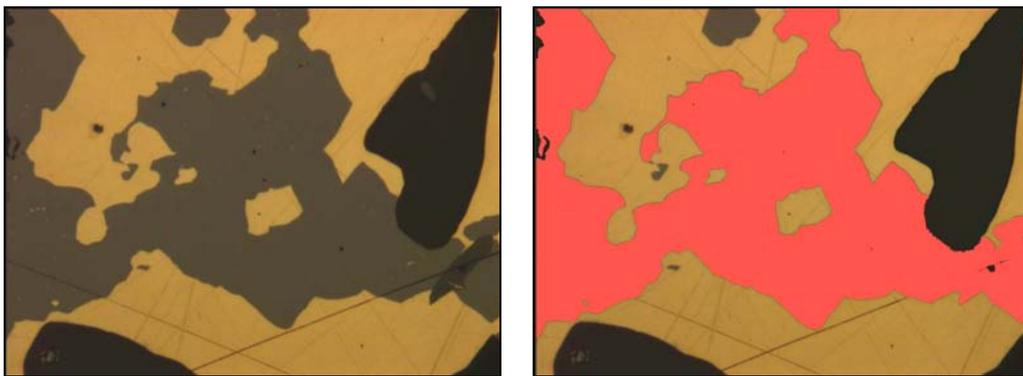


Figura 57. Esfalerita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

ESTIBINA Sb_2S_3

Propiedades ópticas

Color: Blanco a blanco grisáceo

Reflectancia: Media (38%).

Pleocroísmo: Ninguno.

Anisotropismo: Débil a medio en color azul-gris-marrón.

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Media (> galena, bournonita; << calcopirita).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
Muestras IGME	30	100

Banda Roja

Media: 118,30

Mediana: 118

Desviación Estándar: 3,97

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (110 - 126)

Banda Verde

Media: 126,45

Mediana: 126

Desviación Estándar: 3,5

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (119 - 133)

Banda Azul

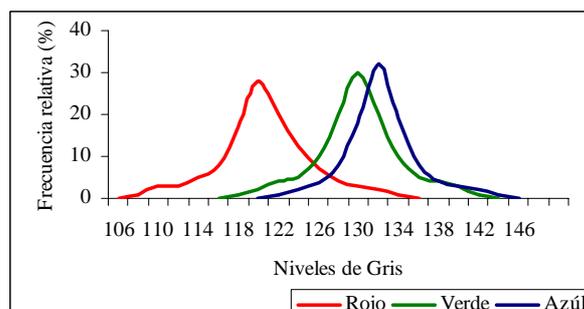
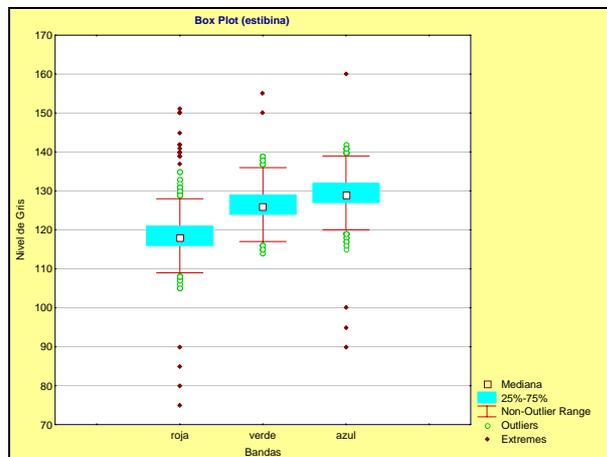
Media: 129,47

Mediana: 129

Desviación Estándar: 3,74

Tipo de distribución: Normal, R = 0,88

Rango segmentación 95 %: (122 - 137)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no anómalos, apareciendo los valores extremos a descartar en el análisis estadístico y la definición posterior de rangos de segmentación.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas se encuentra que existe un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la banda verde presenta un desviación estándar inferior a las calculadas para las bandas azul y verde. El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson. Los coeficientes de correlación encontrados para las bandas Verde y Roja son elevados (R superior a 0,96). Para la banda Azul, al estar la muestra sesgada hacia la izquierda (R es igual a 0,88), teniendo aún así un comportamiento normal.

Segmentación de Estibina:



Figura 58. Estibina segmentada utilizando rangos de segmentación con ajusta 95 %.

GALENA PbS

Propiedades ópticas

- Color:** Blanco grisáceo
- Reflectancia:** Media (43%).
- Pleocroísmo:** Ninguno
- Anisotropismo:** No, isótropo.
- Reflexiones Internas:** Sin reflexiones internas.
- Dureza:** Media-Baja (> covellina; = calcosina; < bornita).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 1147; HD - 6779; HD - 6679	120	200

Banda Roja

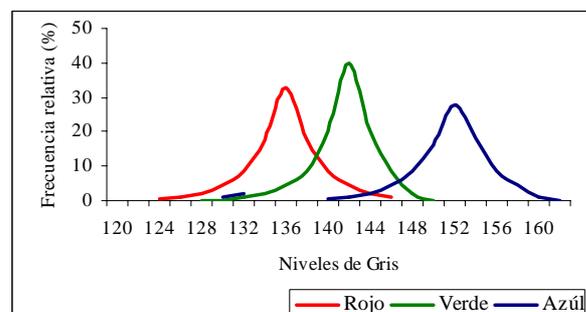
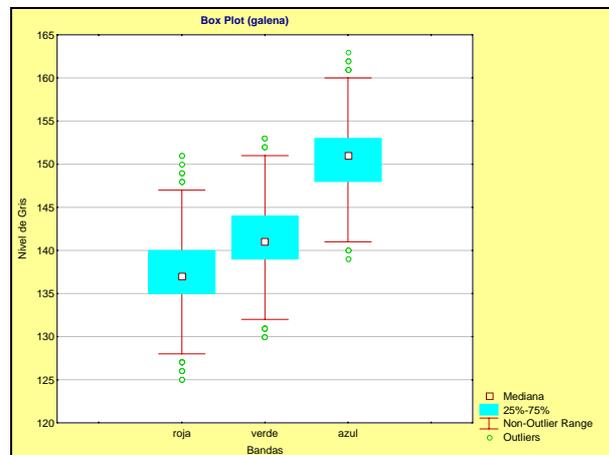
- Media:** 137,38
- Mediana:** 137
- Desviación Estándar:** 1,77
- Tipo de distribución:** Normal, R = 0,92
- Rango segmentación 95 %:** (134 - 141)

Banda Verde

- Media:** 141,29
- Mediana:** 141
- Desviación Estándar:** 1,92
- Tipo de distribución:** Normal, R = 0,95
- Rango segmentación 95 %:** (137 - 145)

Banda Azul

- Media:** 150,72
- Mediana:** 151
- Desviación Estándar:** 2,18
- Tipo de distribución:** Normal, R = 0,96
- Rango segmentación 95 %:** (146 - 155)



Interpretación de resultados:

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

La curva de frecuencias relativas, para las tres bandas, presenta un comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la banda roja presenta un desviación estándar superior a las calculadas para las bandas azul y verde. El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson. Los coeficientes de correlación encontrados para las bandas Verde, Roja y Azul son elevados (R superior a 0,96).

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Segmentación de Galena:

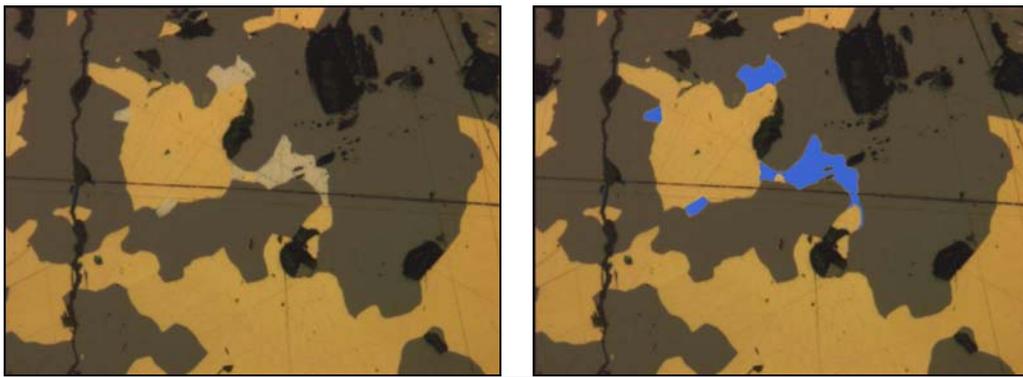


Figura 59. Galena segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

LINNEITA $S_4Co_3Ni_3$

Propiedades ópticas

Color: Gris a blanco amarillento

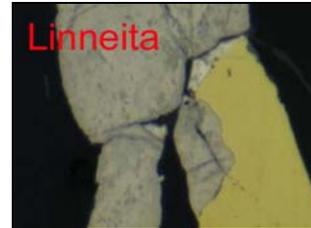
Reflectancia: Alta (44%).

Pleocroísmo: No presenta

Anisotropismo: No.

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Alta (> pirrotina).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 6771, HD - 1280, HD - 6102	50	100

Banda Roja

Media: 145,23

Mediana: 145

Desviación Estándar: 1,25

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (143 - 148)

Banda Verde

Media: 126,85

Mediana: 127

Desviación Estándar: 1,5

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (124 - 130)

Banda Azul

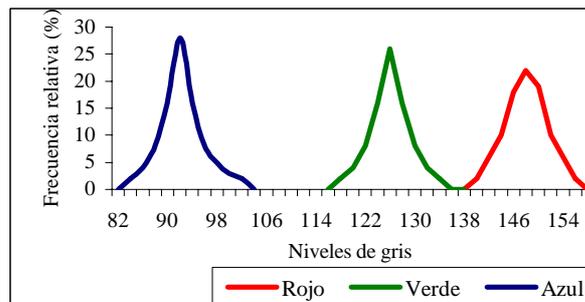
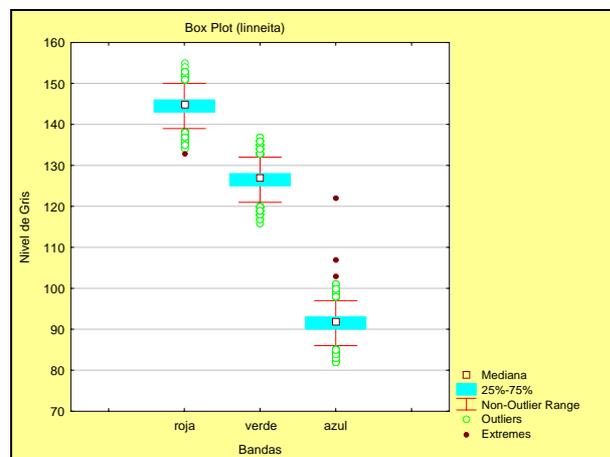
Media: 92,14

Mediana: 93

Desviación Estándar: 1,44

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (89- 95)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que existen valores extremos o anómalos que deberán ser eliminados al momento de establecer los rangos de segmentación.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación de las curvas de frecuencias relativas se encuentra que existe un comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de las tres bandas presentan una dispersión o desviación estándar baja, acorde al carácter no pleocroico de esta fases mineral.

El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el Coeficiente de correlación lineal de Pearson. Los coeficientes de correlación encontrados para las bandas verde, roja y azul son elevados (R superior a 0,95).

Segmentación de Linneita:

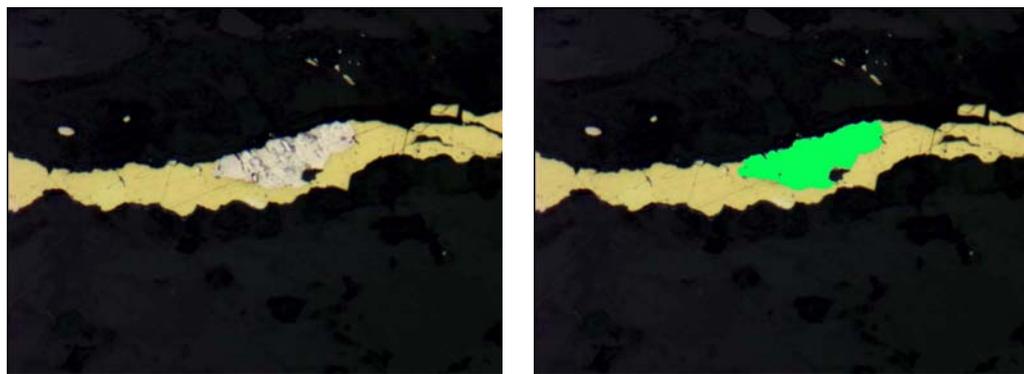


Figura 60. Linneita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

MARCASITA FeS₂

Propiedades ópticas

Color: Blanco-crema (similar a pirita aunque más azulado)

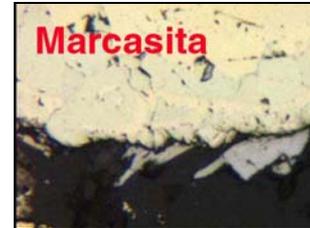
Reflectancia: Alta (52%).

Pleocroísmo: Débil a fuerte

Anisotropismo: Fuerte (colores verdes intensos)

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Alta (= pirita).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 1283, HD - 6784, HD - 807	55	100

Banda Roja

Media: 159,36

Mediana: 159

Desviación Estándar: 3,52

Tipo de distribución: Normal, R = 0,91

Rango segmentación 95 %: (152 - 166)

Banda Verde

Media: 167,68

Mediana: 168

Desviación Estándar: 3,57

Tipo de distribución: Normal, R = 0,92

Rango segmentación 95 %: (161 - 175)

Banda Azul

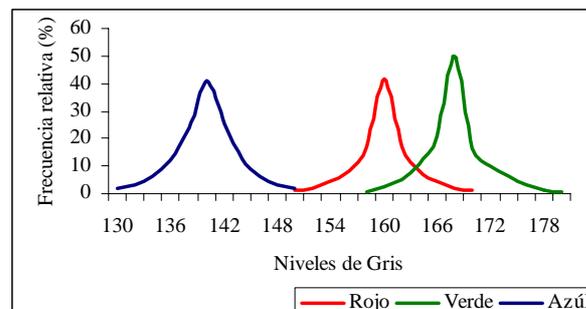
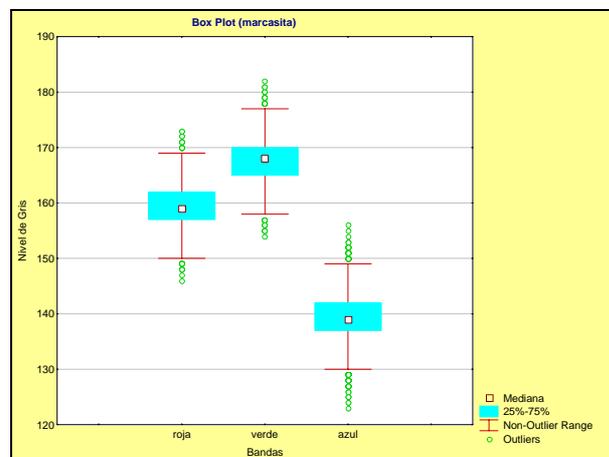
Media: 139,29

Mediana: 139

Desviación Estándar: 4,18

Tipo de distribución: Normal, R = 0,93

Rango segmentación 95 %: (131 - 148)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no outliers, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas se encuentra que existe un comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de las tres bandas presentan una dispersión o desviación estándar alta en comparación a otras fases minerales no pleocroicas. El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre una población normal aleatoria con una media y desviación estándar igual a los de la muestra y los datos de la muestra. para las bandas verde, roja y azul son elevados (R superior a 0,91).

Segmentación de Marcasita:

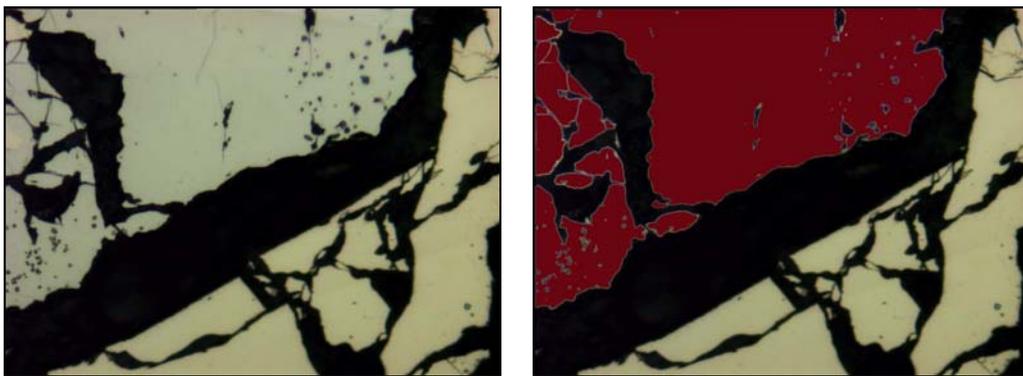


Figura 61. Marcasita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

MOLIBDENITA MoS

Propiedades ópticas

Color: Blanco

Reflectancia: Media (15 - 43 %).

Pleocroísmo: Fuerte y característico

Anisotropismo: Fuerte (azul-rosado)

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Baja (1 -1,5).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
Muestras IGME	50	100

Banda Roja

Media: 89,60

Mediana: 90

Desviación Estándar: 6,53

Tipo de distribución: Normal, R = 0,97

Rango segmentación 95 %: (77 - 103)

Banda Verde

Media: 91,26

Mediana: 91

Desviación Estándar: 6,41

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (79 - 104)

Banda Azul

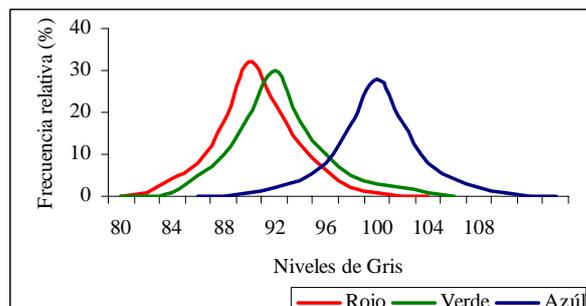
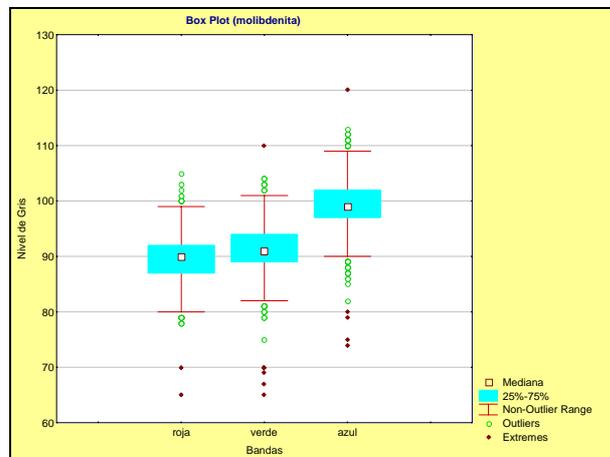
Media: 99,28

Mediana: 99

Desviación Estándar: 6,35

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (87 - 112)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que algunos datos en NG para cada banda, se salen de lo que se esperaba (casos anómalos), originando que sean eliminados al momento de calcular los estadísticos y determinar los rangos de segmentación.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, es posible apreciar un comportamiento normal de la variable. La desviación estándar de las tres bandas es superior a las desviaciones calculadas para otras fases minerales. El supuesto de Normalidad ha sido comprobado para cada una de las bandas R, G y B., comparando la relación (coeficiente de correlación lineal de Pearson. Los coeficientes de correlación encontrados son elevados (R superior a 0,96 para las tres bandas).

Segmentación de Molibdenita:

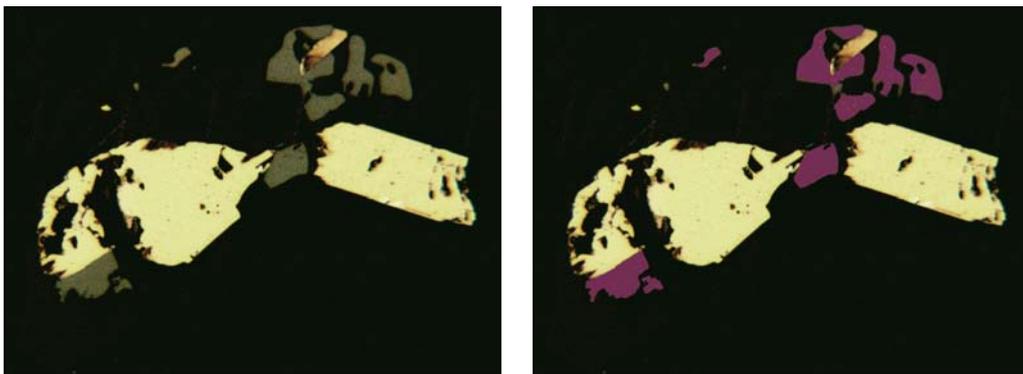


Figura 62. Molibdenita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

NIQUELINA NiAs

Propiedades ópticas

Color: Blanco

Reflectancia: Media (49 %).

Pleocroísmo: Fuerte y característico

Anisotropismo: Fuerte (azul-rosado)

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Alta.



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 1222, HD - 1222b	50	100

Banda Roja

Media: 190,29

Mediana: 190

Desviación Estándar: 3,50

Tipo de distribución: Normal, R = 0,97

Rango segmentación 95 %: (183 - 197)

Banda Verde

Media: 149,48

Mediana: 149

Desviación Estándar: 3,43

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (143 - 157)

Banda Azul

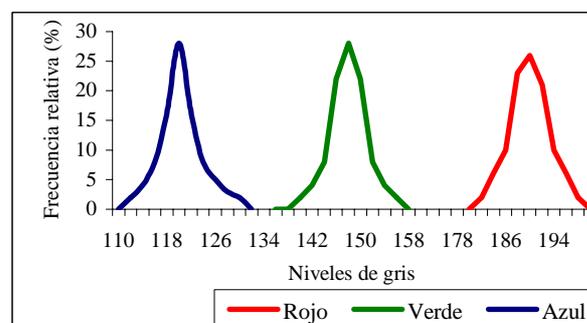
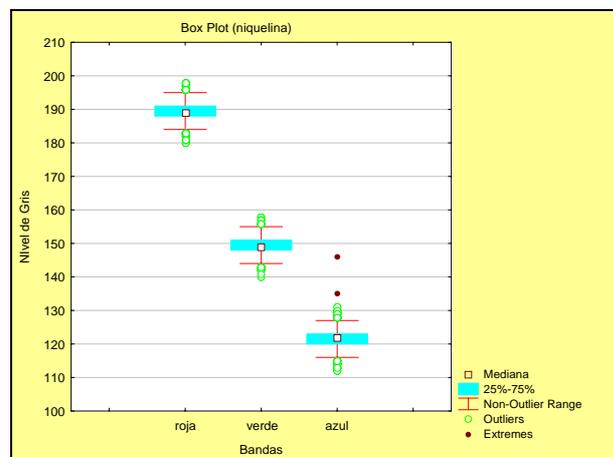
Media: 121,7

Mediana: 122

Desviación Estándar: 4,65

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (115 - 129)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que algunos datos en NG para cada banda, se salen de lo que se esperaba (casos anómalos), originando que sean eliminados al momento de calcular los estadísticos y determinar los rangos de segmentación.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, es posible apreciar un comportamiento normal de la variable. La desviación estándar de las tres bandas es superior a las desviaciones calculadas para otras fases minerales. El supuesto de Normalidad ha sido comprobado para cada una de las bandas R, G y B., comparando la relación (Coeficiente de correlación lineal de Pearson. Los coeficientes de correlación encontrados son elevados, R superior a 0,96 para las tres bandas.

Segmentación de Niquelina:

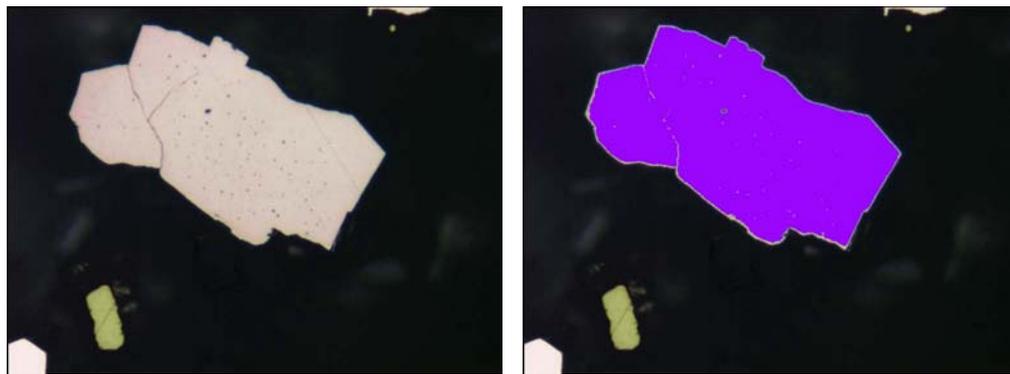


Figura 63. Niquelina segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

PENTLANDITA (Fe,Ni)₉S₈

Propiedades ópticas

Color: Crema-amarillento

Reflectancia: Alta (46,5%).

Pleocroísmo: No presenta

Anisotropismo: No

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Media (>calcopirita, < pirrotina).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 6764, HD - 6771	50	100

Banda Roja

Media: 148,23

Mediana: 149

Desviación Estándar: 1,21

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (146- 151)

Banda Verde

Media: 134,44

Mediana: 135

Desviación Estándar: 1,4

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (132 - 137)

Banda Azul

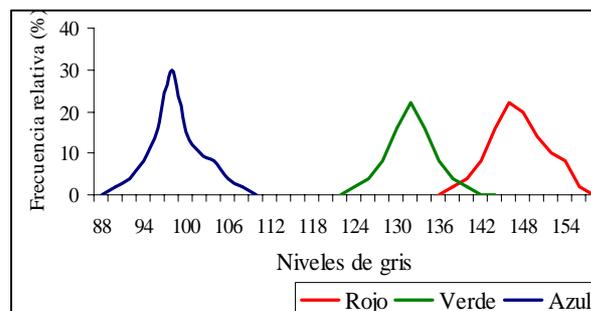
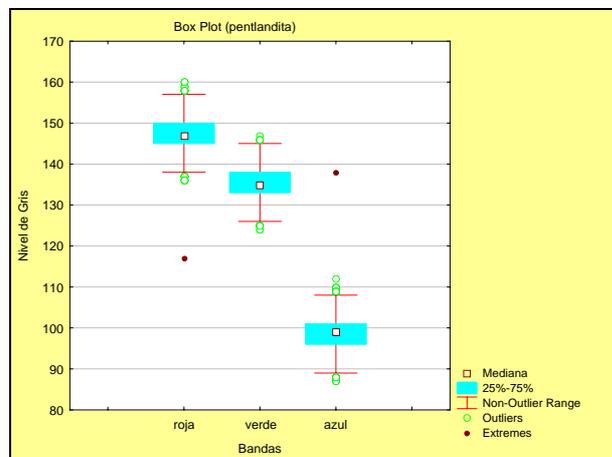
Media: 99,3

Mediana: 99

Desviación Estándar: 2,02

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (95 - 103)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que algunos datos en NG para las banda rojo y azul se salen de lo que se esperaba (casos anómalos).

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

El diagrama de frecuencias relativas de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la banda azul presenta un desviación estándar superior a las calculadas para las bandas roja y verde. El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre una población normal aleatoria con una media y desviación estándar igual a los de la muestra y los datos de la muestra. Los coeficientes de correlación encontrados para cada una de las bandas son elevados, R superior a 0,95.

Segmentación de Pentlandita:

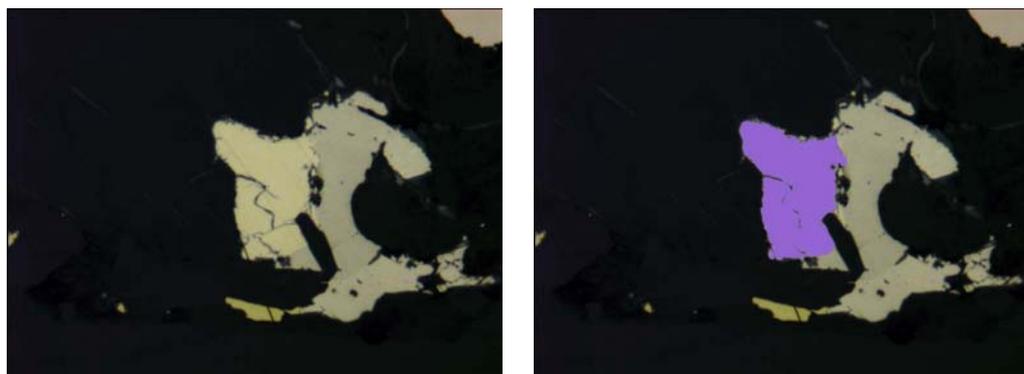


Figura 64. Pentlandita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

PIRITA FeS₂

Propiedades ópticas

Color: Blanco, blanco-amarillento

Reflectancia: Alta (54%).

Pleocroísmo: No presenta

Anisotropismo: Débilmente.

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Media (>arsenopirita, < hematites).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 1147, HD - 1631, HD - 6784	150	200

Banda Roja

Media: 189,45

Mediana: 189

Desviación Estándar: 2,3

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (185 - 194)

Banda Verde

Media: 189,54

Mediana: 190

Desviación Estándar: 2,42

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (185 - 194)

Banda Azul

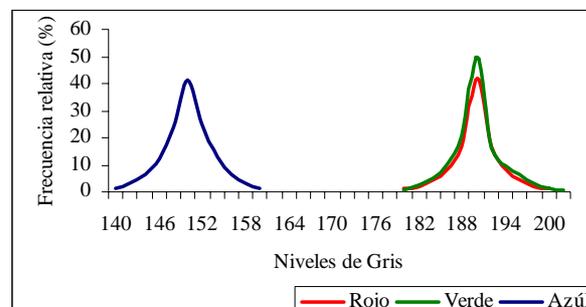
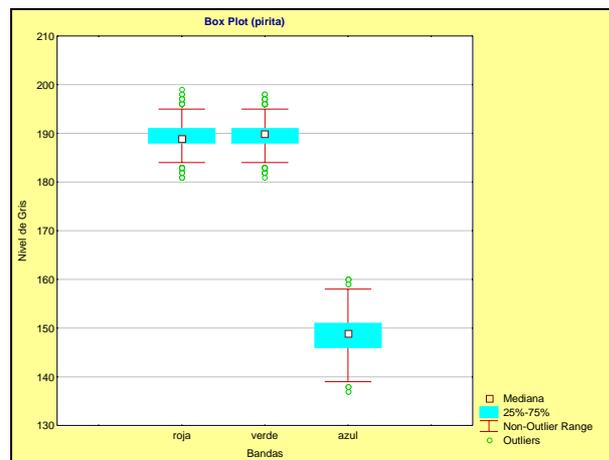
Media: 148,52

Mediana: 149

Desviación Estándar: 3,12

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (142 - 155)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

El gráfico de “BoxPlot” nos indica que ningún dato en NG para cada banda, se sale de lo que se esperaba (sin casos anómalos).

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

El diagrama de frecuencias relativas de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la banda azul presenta un desviación estándar superior a las calculadas para las bandas roja y verde. El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre una población normal aleatoria con una media y desviación estándar igual a los de la muestra y los datos de la muestra. Los coeficientes de correlación encontrados para cada una de las bandas son elevados, R superior a 0,95.

Segmentación de Pirita:

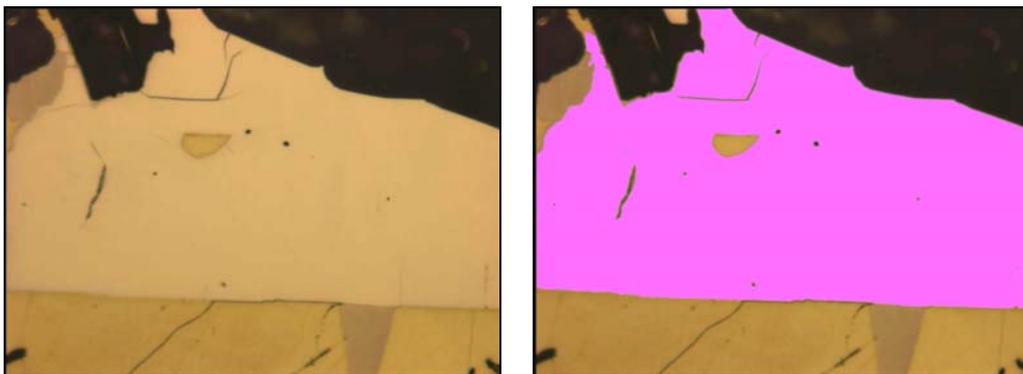


Figura 65. Pirita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %

PIRROTINA $Fe_{1-x}S_4$

Propiedades ópticas

Color: Crema con tintes marrones

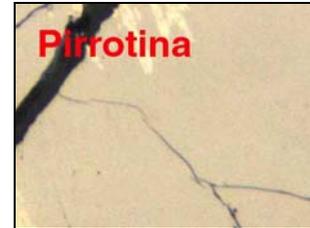
Reflectancia: Baja (22%).

Pleocroísmo: Distintivo marrón-rojizo y marrón-crema

Anisotropismo: Fuerte, de gris amarillento a gris grisáceo.

Reflexiones Internas: No presenta

Dureza: Media (3,5 - 4,5)



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 1631, HD - 1002; HD - 775	60	100

Banda Roja

Media: 143,46

Mediana: 143

Desviación Estándar: 3,91

Tipo de distribución: Normal, R = 0,92

Rango segmentación 95 %: (136 - 151)

Banda Verde

Media: 141,49

Mediana: 142

Desviación Estándar: 3,58

Tipo de distribución: Normal, R = 0,94

Rango segmentación 95 %: (134 - 149)

Banda Azul

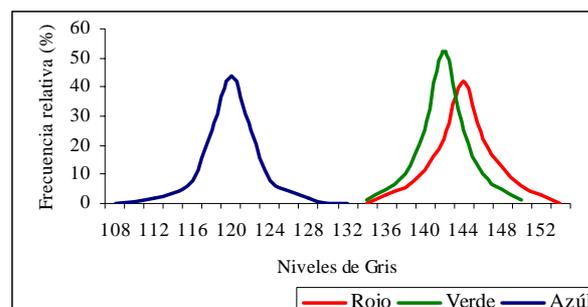
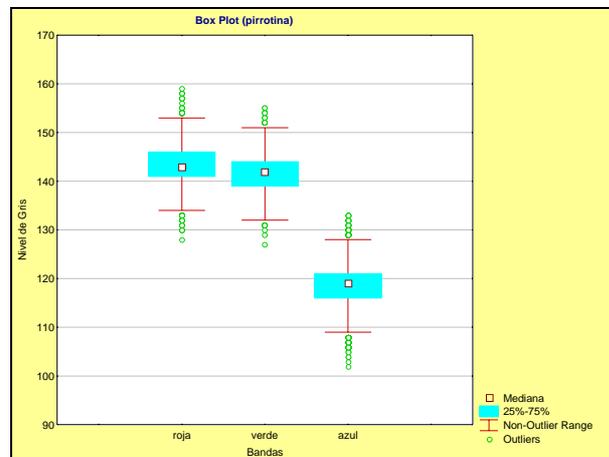
Media: 118,52

Mediana: 119

Desviación Estándar: 4,11

Tipo de distribución: Normal, R = 0,93

Rango segmentación 95 %: (110- 127)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que ningún dato en NG para cada banda, se sale de lo que se esperaba (sin casos anómalos).

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la curva de frecuencias relativas de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, se aprecia un aparente comportamiento normal de la variable. La desviación estándar de las tres bandas es superior a las desviaciones calculadas para otras fases minerales. El supuesto de Normalidad ha sido comprobado para cada una de las bandas R, G y B., comparando la relación (coeficiente de correlación lineal de Pearson) entre una población normal aleatoria con una media y desviación estándar igual a los de la muestra y los datos de la muestra. Los coeficientes de correlación encontrados son elevados, R superior a 0,92 para las tres bandas.

Segmentación de Pirrotina:

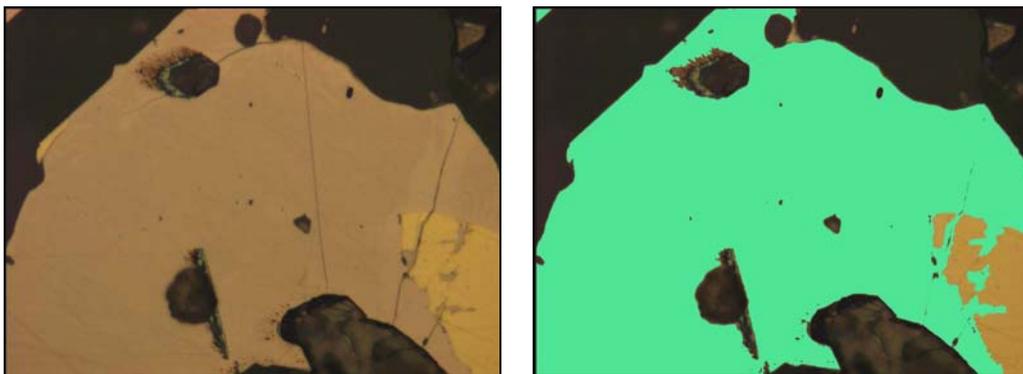


Figura 66. Pirrotina segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

TENNANITA/TETRAHEDRITA
 $Cu_{12}(As,Sb)_4S_{13}$

Propiedades ópticas

Color: Gris con tintes azul verdosos

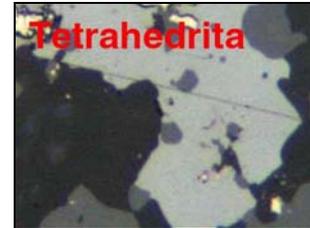
Reflectancia: Baja (29 -31 %).

Pleocroísmo: No presentan

Anisotropismo: No, isótropo.

Reflexiones Internas: Pueden o no presentarse.

Dureza: Media (tennantita > tetrahedrita).(3,5 - 4,5).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD -1217; HD - 6153; HD - 1626	40	200

Banda Roja

Media: 97,47

Mediana: 98

Desviación Estándar: 2,25

Tipo de distribución: Normal, R = 0,98

Rango segmentación 95 %: (93 - 102)

Banda Verde

Media: 107,31

Mediana: 107

Desviación Estándar: 2,06

Tipo de distribución: Normal, R = 0,97

Rango segmentación 95 %: (103 - 111)

Banda Azul

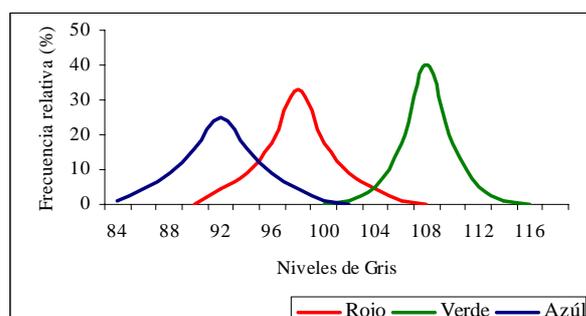
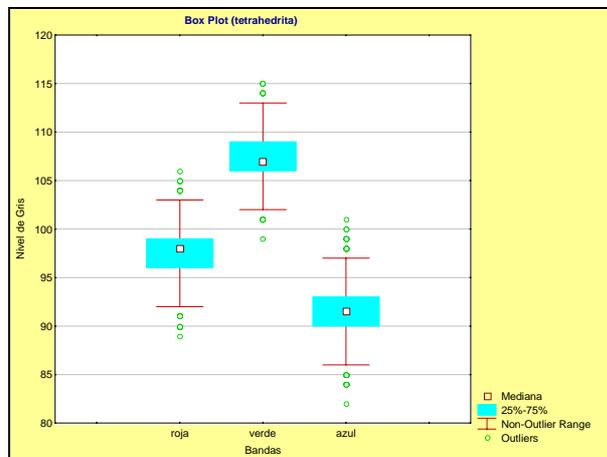
Media: 91,27

Mediana: 91

Desviación Estándar: 2,34

Tipo de distribución: Normal, R = 0,97

Rango segmentación 95 %: (87- 96)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

De la observación del gráfico de "BoxPlot" se evidencia la ausencia de valores anómalos a considerar en el análisis.

Diagrama de Frecuencias y Supuestos de Normalidad

El diagrama de frecuencias de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un comportamiento bastante normal de la variable. La distribución de los NG para la banda azul presenta una desviación estándar superior a la de las otras bandas. En general los valores de dispersión de los NG para este mineral son menores a los presentados por el resto de fases minerales. La Normalidad de la distribución ha sido comprobada con el cálculo de la correlación lineal de Pearson, R, entre los valores de las muestras y una muestra teórica con distribución normal. Los valores de R para las tres bandas es superior a 0,97.

Segmentación de Tetrahedrita.

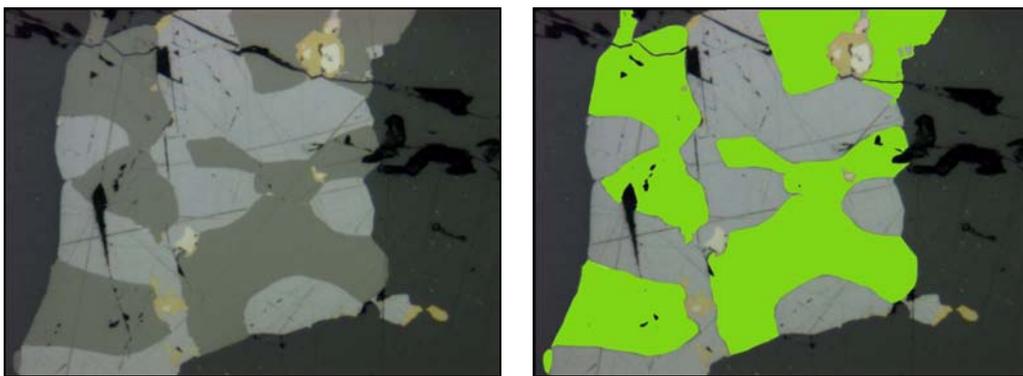


Figura 67. Tetrahedrita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %

CASITERITA SnO₂

Propiedades ópticas

Color: Gris claro a marrón grisáceo

Reflectancia: Baja (11-12,9 %).

Pleocroísmo: Muy débil.

Anisotropismo: Débil, distinguible en aceite.

Reflexiones Internas: Frecuentes (blancas-amarillas-marrones)

Dureza: Alta (6-7)



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
Muestras IGME	40	100

Banda Roja

Media: 35,6

Mediana: 36

Desviación Estándar: 1,62

Tipo de distribución: Normal, R = 0,97

Rango segmentación 95 %: (32 - 39)

Banda Verde

Media: 37,62

Mediana: 38

Desviación Estándar: 1,44

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (35 - 41)

Banda Azul

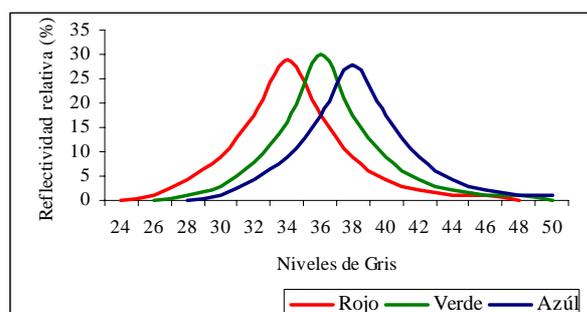
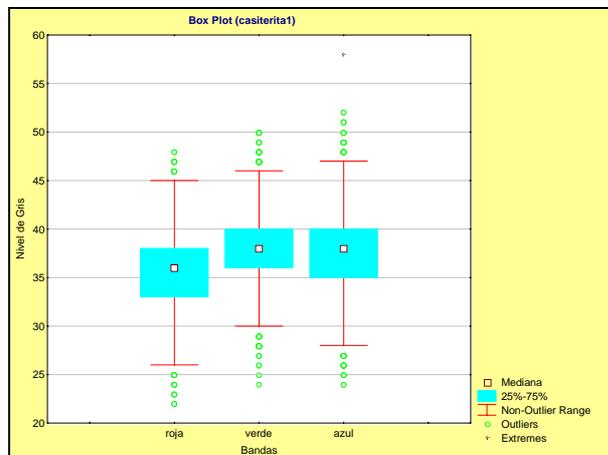
Media: 38,9

Mediana: 39

Desviación Estándar: 1,84

Tipo de distribución: Normal, R = 0,93

Rango segmentación 95 %: (35 - 42)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

De la observación del gráfico de *BoxPlot* se evidencia la ausencia de valores anómalos a considerar.

Diagrama de Frecuencias y Supuestos de Normalidad

El diagrama de frecuencias de los valores de NG, para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un comportamiento bastante normal de la variable. La desviación estándar es superior la de fases minerales no plecroicas. La Normalidad de la distribución ha sido comprobada con el cálculo de la Correlación lineal de Pearson, R, entre los valores de las muestras y una muestra teórica con distribución normal. Los valores de R para las tres bandas es superior a 0,93.

Segmentación de Casiterita:

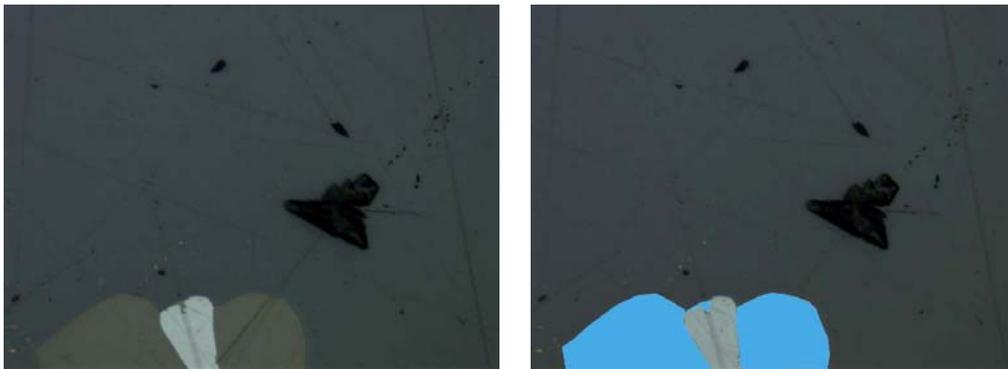


Figura 68. Casiterita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %

CROMITA $FeCr_2O_4$

Propiedades ópticas

Color: Blanco grisáceo a marrón claro.

Reflectancia: Baja (12-14 %).

Pleocroísmo: No presenta.

Anisotropismo: No, Isótropo.

Reflexiones Internas: Si en las variedades ricas en Mg y Al.

Dureza: Media (5,5).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
Muestras IGME	50	100

Banda Roja

Media: 41,37

Mediana: 41

Desviación Estándar: 1,31

Tipo de distribución: Normal, R = 0,97

Rango segmentación 95 %: (39 - 44)

Banda Verde

Media: 43,81

Mediana: 44

Desviación Estándar: 1,33

Tipo de distribución: Normal, R = 0,93

Rango segmentación 95 %: (41 - 47)

Banda Azul

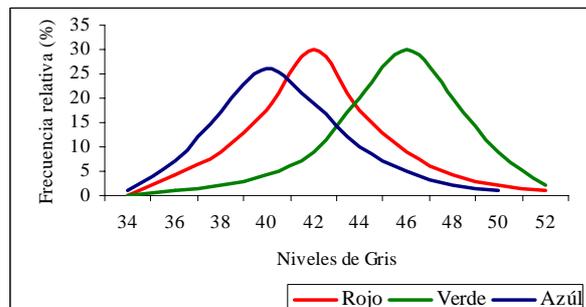
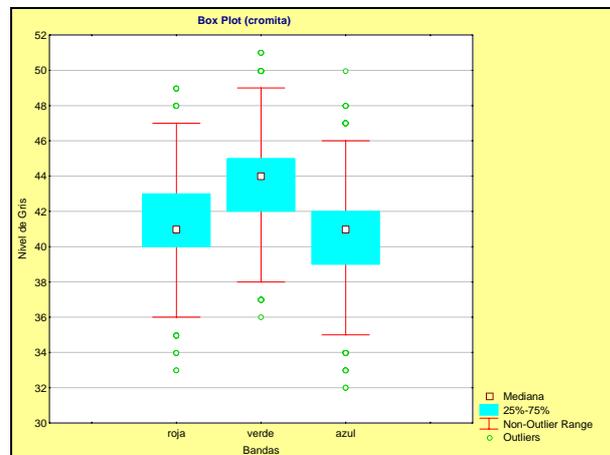
Media: 40,11

Mediana: 41

Desviación Estándar: 1,42

Tipo de distribución: Normal, R = 0,94

Rango segmentación 95 %: (37 - 43)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

De la observación del gráfico de *BoxPlot* se evidencia la ausencia de valores anómalos a considerar.

Diagrama de Frecuencias y Supuestos de Normalidad

El diagrama de frecuencias de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un comportamiento bastante normal de la variable. En general los valores de dispersión de los NG para este mineral son menores a los presentados por el resto de fases minerales.

La Normalidad de la distribución ha sido comprobada con el cálculo de la correlación lineal de Pearson, R, entre los valores de las muestras y una muestra teórica con distribución normal. Los valores de R para las tres bandas es superior a 0,93.

Segmentación de Cromita:

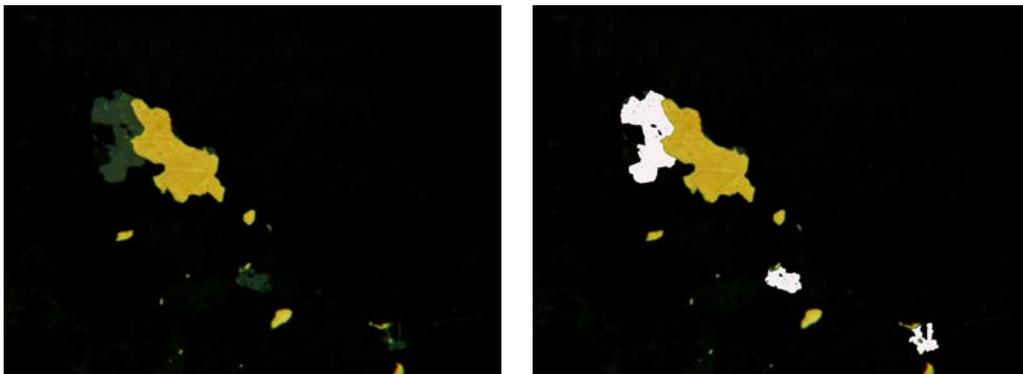


Figura 69. Cromita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %

HEMATITES Fe_2O_3

Propiedades ópticas

Color: Blanco grisáceo con tintes azules.

Reflectancia: Media-Baja (24-30%).

Pleocroísmo: Débil.

Anisotropismo: Medio (azules a amarillos).

Reflexiones Internas: Frecuentes. Rojas (>Fe) ó Marrón (<Fe).

Dureza: Media Alta (5,5 - 6,5).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
Muestra IGME	60	100

Banda Roja

Media: 80,26

Mediana: 80

Desviación Estándar: 4,04

Tipo de distribución: Normal, R = 0,94

Rango segmentación 95 %: (72 - 88)

Banda Verde

Media: 87,28

Mediana: 88

Desviación Estándar: 3,54

Tipo de distribución: Normal, R = 0,93

Rango segmentación 95 %: (80 - 94)

Banda Azul

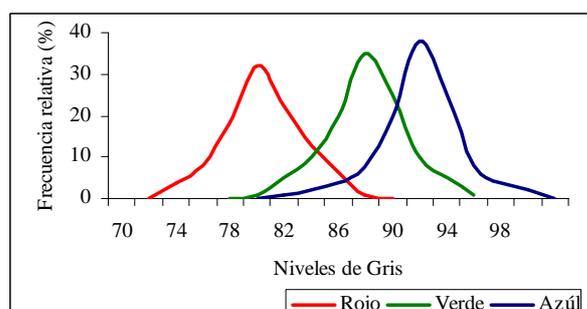
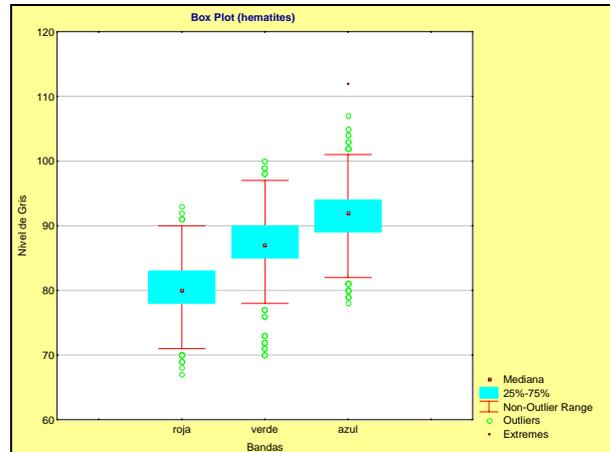
Media: 91,75

Mediana: 92

Desviación Estándar: 3,89

Tipo de distribución: Normal, R = 0,93

Rango segmentación 95 %: (84 - 100)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

De la observación del gráfico de *BoxPlots* se evidencia la ausencia de valores anómalos a considerar.

Diagrama de Frecuencias y Supuestos de Normalidad

El diagrama de frecuencias de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un comportamiento bastante normal de la variable. En general, los valores de dispersión de los NG para este mineral son mayores a los presentados por el resto de fases minerales.

La Normalidad de la distribución ha sido comprobada con el cálculo de la correlación lineal de Pearson, R , entre los valores de las muestras y una muestra teórica con distribución normal. Los valores de R para las tres bandas es superior a 0,93.

Segmentación de Hematites:

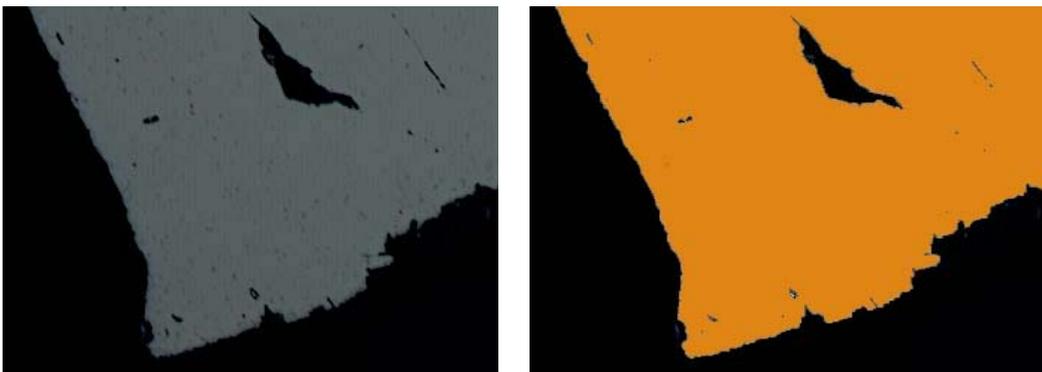


Figura 70. Hematites segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %

ILMENTA Sb_2S_3

Propiedades ópticas

Color: Gris rosado

Reflectancia: Media (18%).

Pleocroísmo: Ninguno.

Anisotropismo: Medio, en color azul-gris-marrón.

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Media (> galena, bournonita; << calcopirita).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 8696; HD1003, HD - 6858, HD - 6764	100	200

Banda Roja

Media: 58,45

Mediana: 58

Desviación Estándar: 3,47

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (52 - 65)

Banda Verde

Media: 56,54

Mediana: 57

Desviación Estándar: 3,25

Tipo de distribución: Normal, R = 0,94

Rango segmentación 95 %: (50 - 63)

Banda Azul

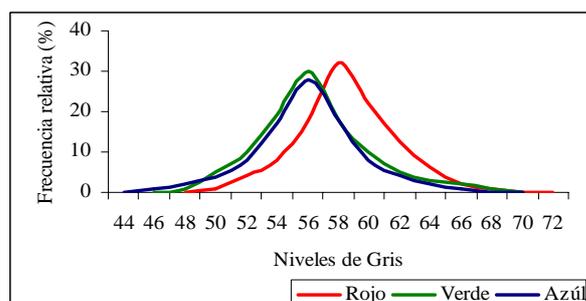
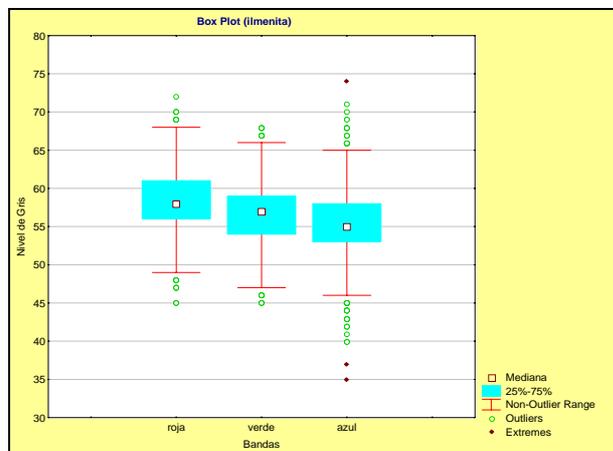
Media: 55,50

Mediana: 55

Desviación Estándar: 3,60

Tipo de distribución: Normal, R = 0,94

Rango segmentación 95 %: (48 - 63)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que aparecen datos anómalos en los NG de la banda azul. Estos datos serán eliminados para el tratamiento estadístico posterior.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas se encuentra que existe un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la bandas verde, azul y roja presentan desviaciones estándar muy inferiores a las calculadas para las otras fases minerales. El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre una población normal aleatoria con una media y desviación estándar igual a los de la muestra y los datos de la muestra. Los coeficientes de correlación encontrados para cada las bandas son elevados: R superior a 0,94.

Segmentación de Ilmenita:

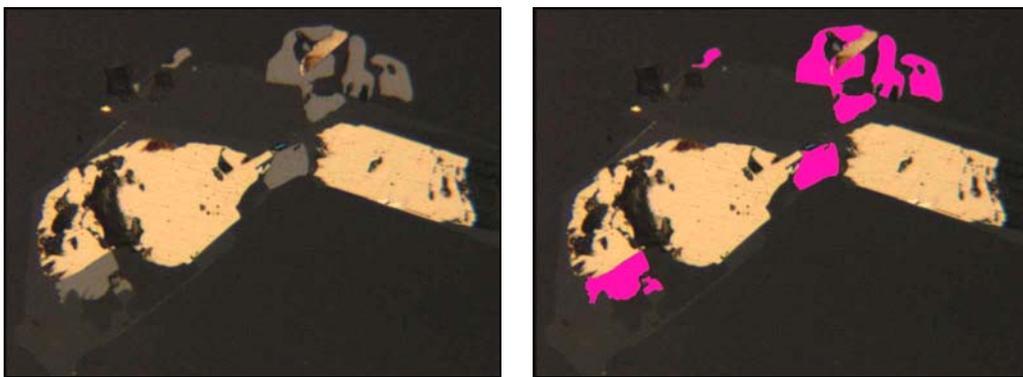


Figura 71. Ilmenita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

MAGNETITA Fe₃O₄

Propiedades ópticas

Color: Gris con tinte marrón.

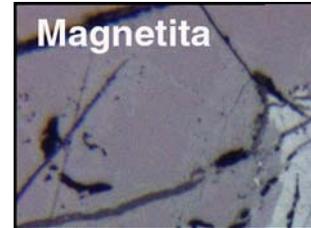
Reflectancia: Baja (20%).

Pleocroísmo: Ninguno.

Anisotropismo: No, isótropo.

Reflexiones Internas: No presenta.

Dureza: Media (>> pirrotina; <ilmenita; << hematites).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 1146; HD - 1060; HD - 6666	120	200

Banda Roja

Media: 70,62

Mediana: 71

Desviación Estándar: 1,52

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (68 - 74)

Banda Verde

Media: 64,56

Mediana: 65

Desviación Estándar: 1,33

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (62 - 67)

Banda Azul

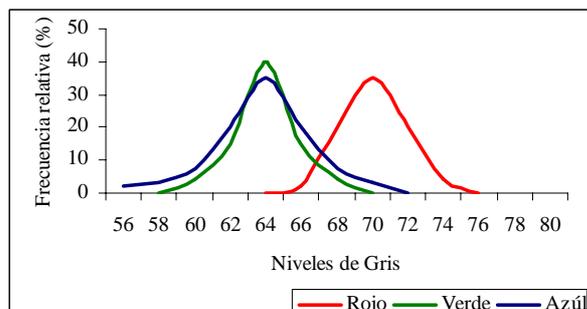
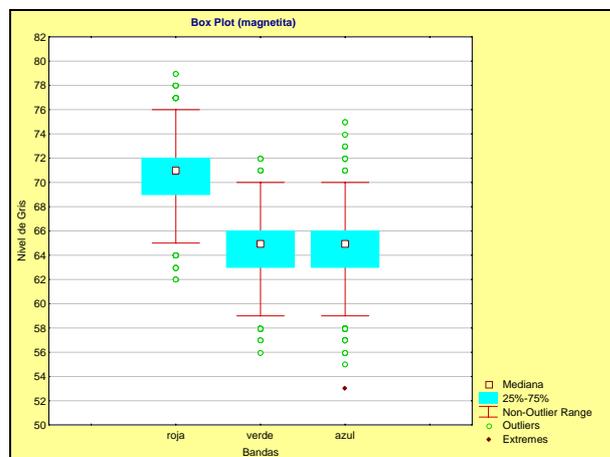
Media: 64,43

Mediana: 65

Desviación Estándar: 1,81

Tipo de distribución: Normal, R = 0,94

Rango segmentación 95 %: (61 - 68)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

El gráfico de “BoxPlot” nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas se encuentra que existe un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la bandas verde, azul y roja presentan desviaciones estándar muy inferiores a las calculadas para las otras fases minerales.

El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson. Los coeficientes de correlación encontrados para cada las bandas son elevados: R superior a 0,94.

Segmentación de Magnetita:

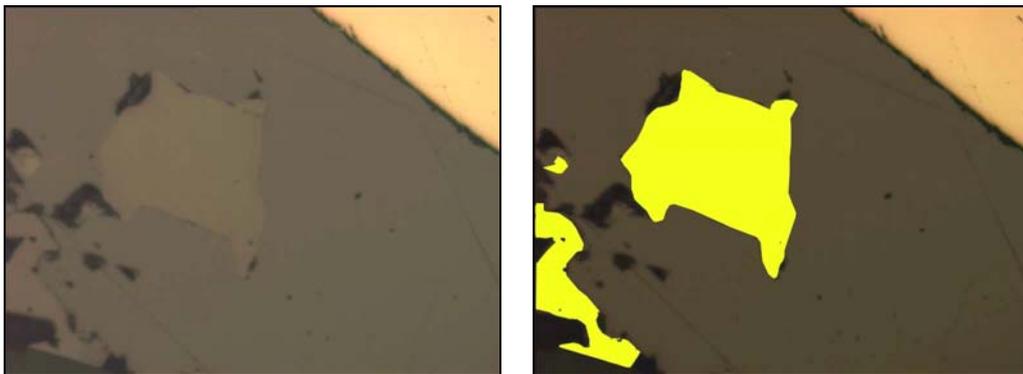


Figura 72. Magnetita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

RUTILO TiO₂

Propiedades ópticas

Color: Gris con tinte marrón.

Reflectancia: Baja (20,3%).

Pleocroísmo: Débil.

Anisotropismo: Moderado a alto

Reflexiones Internas: Abundantes (blancas a marrones)

Dureza: Media (> ilmenita; < casiterita).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 775; HD - 773; HD - 1280	50	100

Banda Roja

Media: 66,31

Mediana: 66

Desviación Estándar: 1,75

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (63 - 70)

Banda Verde

Media: 64,59

Mediana: 65

Desviación Estándar: 2,22

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (60 - 69)

Banda Azul

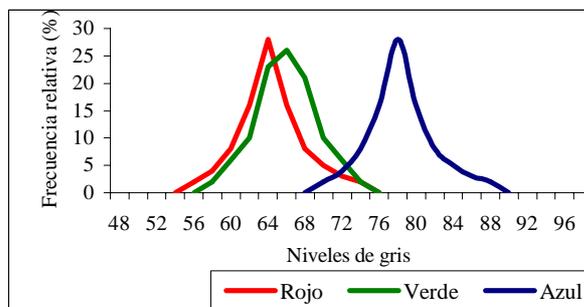
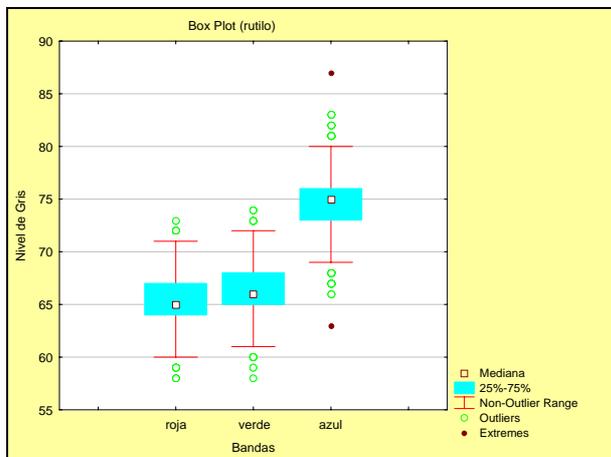
Media: 67,20

Mediana: 67

Desviación Estándar: 2,96

Tipo de distribución: Normal, R = 0,93

Rango segmentación 95 %: (61 - 73)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

El gráfico de “BoxPlot” nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas se encuentra que existe un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la bandas verde, azul y roja presentan desviaciones estándar muy inferiores a las calculadas para las otras fases minerales.

El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson. Los coeficientes de correlación encontrados para cada las bandas son elevados R superior a 0,93.

Segmentación de Rutilo:

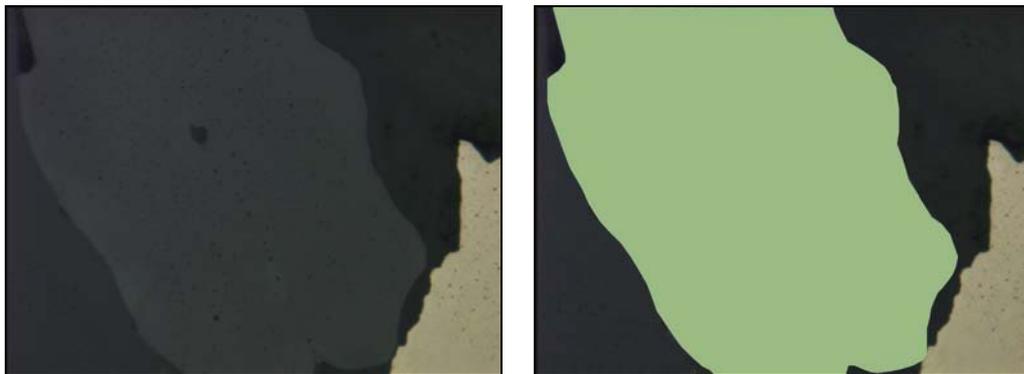


Figura 73. Rutilo segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

URANINITA UO₂

Propiedades ópticas

Color: Gris con tinte marrón.

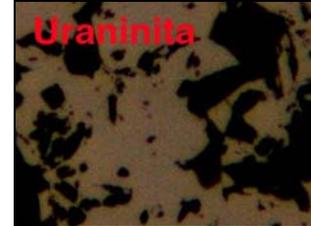
Reflectancia: Baja (14,5 - 16,8 %).

Pleocroísmo: No presenta.

Anisotropismo: No, isótropo.

Reflexiones Internas: Son frecuentes (marrón a rojizas).

Dureza: Alta (> galena).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 6023, HD - 1222b, Muestras IGME	50	100

Banda Roja

Media: 43,40

Mediana: 43

Desviación Estándar: 1,35

Tipo de distribución: Normal, R = 0,96

Rango segmentación 95 %: (41 - 47)

Banda Verde

Media: 43,60

Mediana: 42

Desviación Estándar: 1,26

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (41 - 46)

Banda Azul

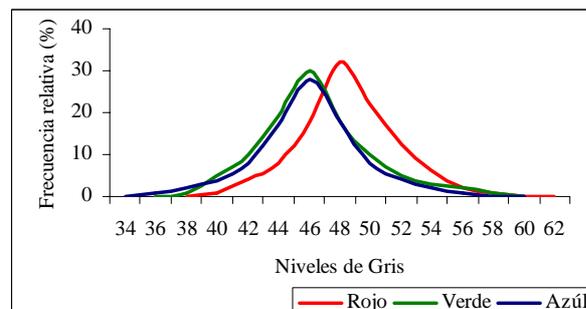
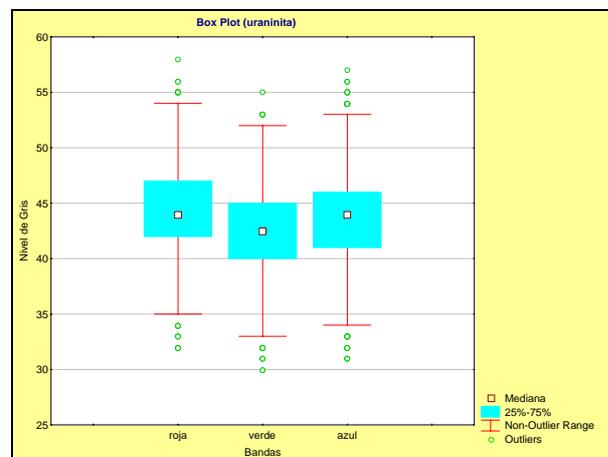
Media: 46,42

Mediana: 46

Desviación Estándar: 1,41

Tipo de distribución: Normal, R = 0,95

Rango segmentación 95 %: (44 - 49)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

El gráfico de “BoxPlot” nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas se encuentra que existe un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la bandas verde, azul y roja presentan desviaciones estándar acordes al carácter no pleocroico de esta fase mineral. El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre una población normal aleatoria con una media y desviación estándar igual a los de la muestra y los datos de la muestra. Los coeficientes de correlación encontrados para cada las bandas son elevados, R superior a 0,95.

Segmentación de Uraninita:

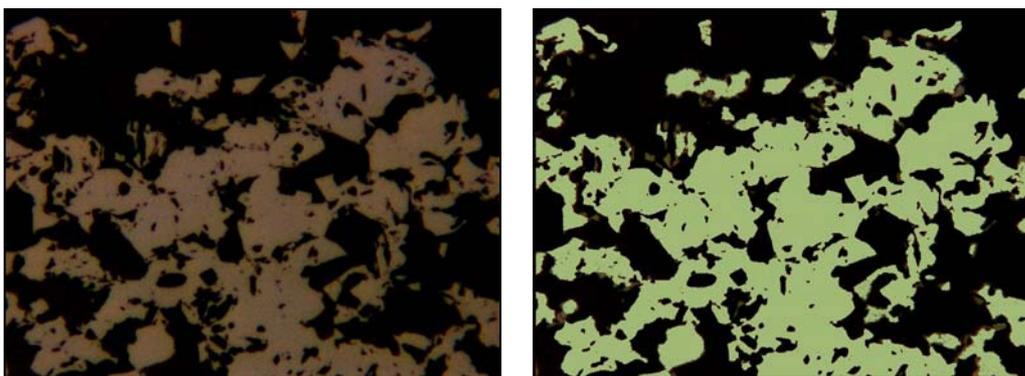


Figura 74. Uraninita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

GOETHITA
FeO(OH)_nH₂O

Propiedades ópticas

Color: Gris.

Reflectancia: Baja (16,1 -18,5 %).

Pleocroísmo: Débil.

Anisotropismo: Débil.

Reflexiones Internas: Débiles (amarillas pardas a marrones).

Dureza: Media (< hematites).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
Muestras IGME	60	100

Banda Roja

Media: 47,81

Mediana: 48

Desviación Estándar: 3,62

Tipo de distribución: Normal, R = 0,92

Rango segmentación 95 %: (41 - 55)

Banda Verde

Media: 49,69

Mediana: 50

Desviación Estándar: 3,63

Tipo de distribución: Normal, R = 0,92

Rango segmentación 95 %: (43 - 57)

Banda Azul

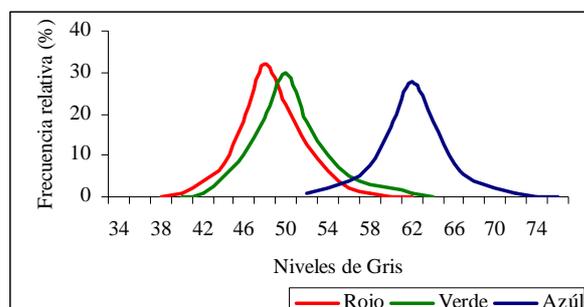
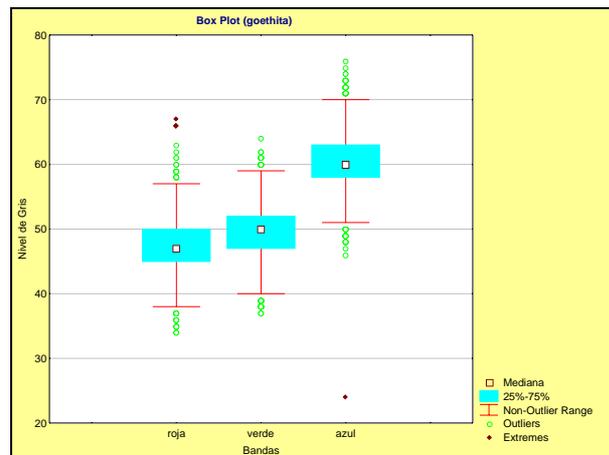
Media: 60,52

Mediana: 61

Desviación Estándar: 3,89

Tipo de distribución: Normal, R = 0,91

Rango segmentación 95 %: (53- 68)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas se encuentra que existe un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la bandas verde, azul y roja presentan desviaciones estándar mayores a las calculadas para otra fases minerales. El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre una población normal aleatoria con una media y desviación estándar igual a los de la muestra y los datos de la muestra. Los coeficientes de correlación encontrados para cada las bandas son elevados: R superior a 0,91.

Segmentación de Goethita:

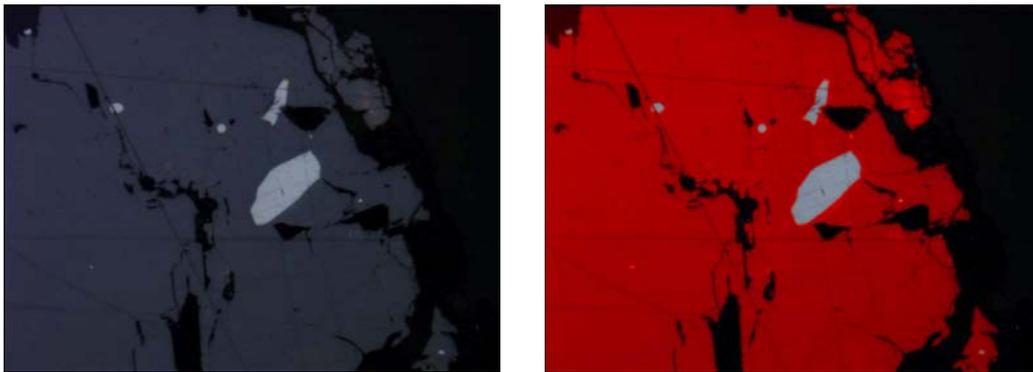


Figura 75. Goethita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

**WOLFRAMITA
(Fe,Mn)WO₄**

Propiedades ópticas

Color: Gris a blanco grisáceo.

Reflectancia: Baja (15 - 20%).

Pleocroísmo: Débil pero se distingue.

Anisotropismo: Medio (tintes amarillentos).

Reflexiones Internas: Si, rojizas (se ven mejor en aceite).

Dureza: Media (= prita).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
Muestras IGME	55	100

Banda Roja

Media: 49,62

Mediana: 50

Desviación Estándar: 2,26

Tipo de distribución: Normal, R = 0,91

Rango segmentación 95 %: (45 - 54)

Banda Verde

Media: 49,78

Mediana: 50

Desviación Estándar: 2,33

Tipo de distribución: Normal, R = 0,90

Rango segmentación 95 %: (45 - 54)

Banda Azul

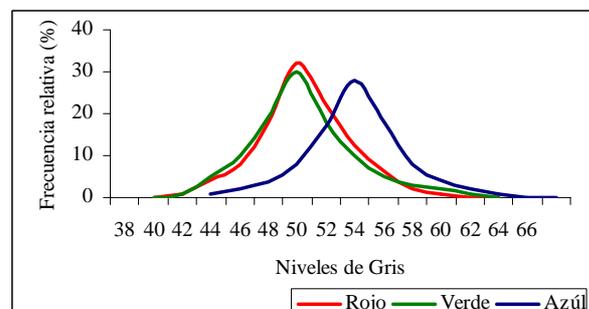
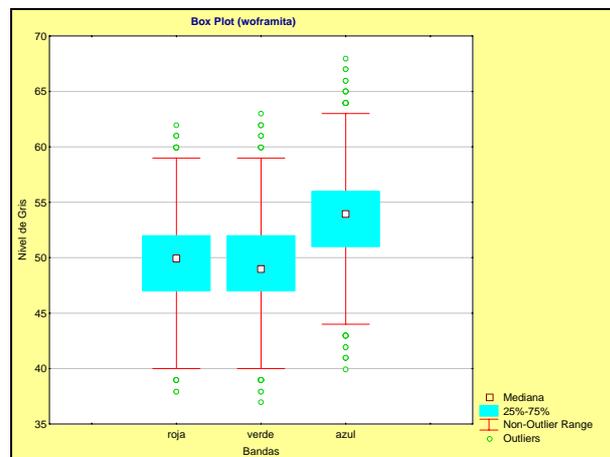
Media: 53,62

Mediana: 54

Desviación Estándar: 2,47

Tipo de distribución: Normal, R = 0,89

Rango segmentación 95 %: (49 - 59)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y “Box Plot”

El gráfico de “BoxPlot” nos indica que aunque muchos de los datos en NG para cada banda se salen del rango de no *outliers*, no hay valores anómalos extremos.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

De la observación del diagrama de frecuencias relativas se encuentra que existe un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG de la bandas verde, azul y roja presentan desviaciones estándar superiores a las calculadas para las otras fases minerales. El supuesto de Normalidad para las tres bandas ha sido verificado utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson. Los coeficientes de correlación encontrados para cada las bandas son elevados: R superior a 0,89.

Segmentación de Wolframita:

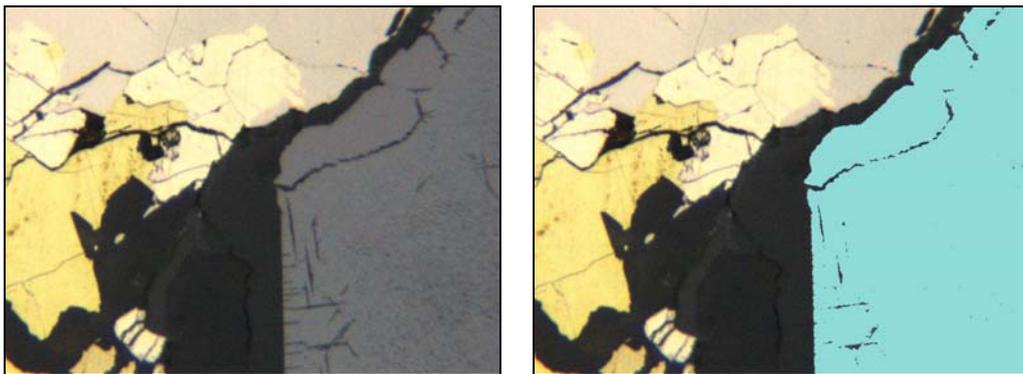


Figura 76. Wolframita segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

GANGA (cuarzo y carbonatos)

Propiedades ópticas

Color: Negro

Reflectancia: Baja (6%).

Pleocroísmo: Si

Anisotropismo: Si.

Reflexiones Internas: Sin reflexiones internas.

Dureza: Media-Baja (> covellina; < bornita).



Caracterización por ADI

Datos de Muestreo		
Muestras analizadas	# granos estudiados	# ventanas 10*10 pixels
HD - 6794; HD - 6784; HD - 136	200	200

Banda Roja

Media: 15,55

Mediana: 20

Desviación Estándar: 6,22

Tipo de distribución: Normal, R = 0,79

Rango segmentación 95 %: (9 - 26)

Banda Verde

Media: 12,58

Mediana: 13

Desviación Estándar: 5,63

Tipo de distribución: Normal, R = 0,75

Rango segmentación 95 %: (4 - 22)

Banda Azul

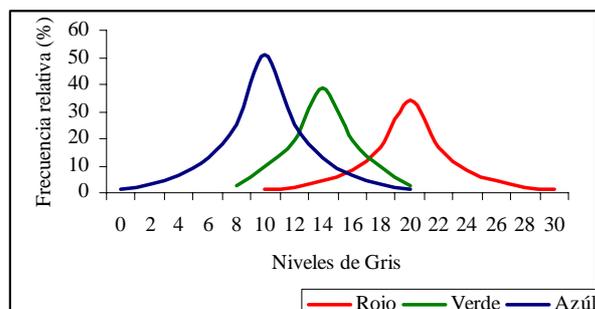
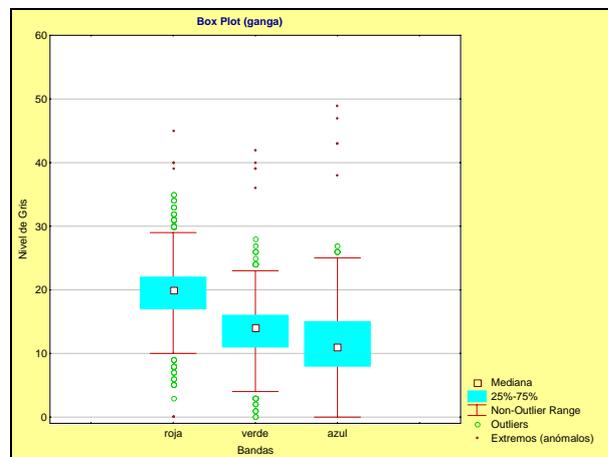
Media: 11,18

Mediana: 13

Desviación Estándar: 5,51

Tipo de distribución: Normal, R = 0,73

Rango segmentación 95 %: (0 - 22)



Interpretación de resultados:

El Resumen numérico y "Box Plot"

El gráfico de "BoxPlot" nos indica que existen datos extremos o anómalos producto del carácter muy pleocroico de esta fase mineral y de la inclusión dentro de la ganga posiblemente de otras fases más reflectivas.

Diagrama de Frecuencias y Supuesto de Normalidad.

El diagrama de frecuencias relativas de los valores de NG para cada una de las bandas en que se ha descompuesto la información, presenta un aparente comportamiento normal de la variable. La distribución de los NG en la banda roja, verde y azul presenta una desviación estándar superior a la calculada para otros minerales. El supuesto de Normalidad ha sido verificado con el coeficiente de Pearson. Los coeficientes de correlación encontrados son bajos en comparación a los encontrados para otras fases minerales. R superior a 0,75 para las tres bandas.

Segmentación de Ganga:

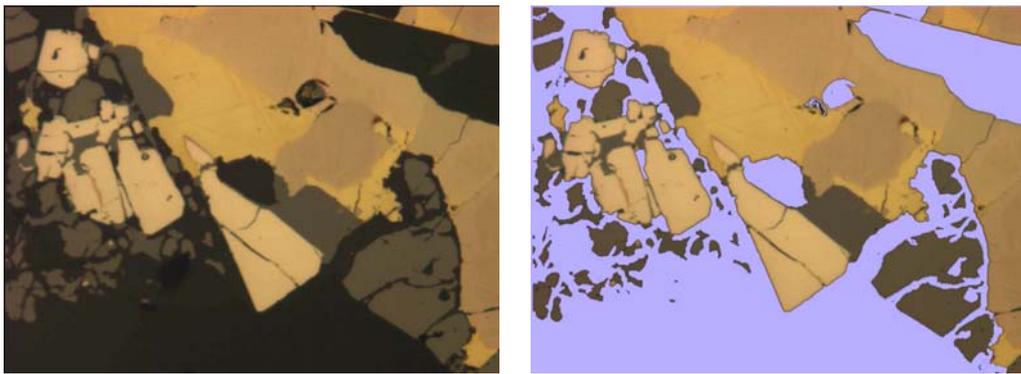


Figura 77. Ganga segmentada utilizando rangos de segmentación con ajuste 95 %.

IV.5. SEGMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS.

IV.5.1 *Introducción*

Antes de aplicar el proceso de segmentación de las fases minerales y de evaluar si los rangos de segmentación obtenidos del análisis individualizado de las fases minerales ($m \pm 2\sigma$, para cada banda) presentan resultados satisfactorios, es necesario realizar una verificación previa que permita conocer si los rangos en NG han sido obtenidos en condiciones óptimas. Esto ha podido comprobarse utilizando el mismo criterio empleado en la verificación de la linealidad de la respuesta de la cámara de video CCD, es decir, la existencia de una proporcionalidad directa entre el % de Reflexión de una fase mineral y su valor en NG

IV.5.2 *Relación Reflectancia - NG*

Actualmente es posible contar con información detallada del porcentaje de reflexión de minerales para rangos de longitud de onda concretos (Criddle & Stanley, 1993). No sucede así con la información que entrega el equipo de ADI, que no especifica los rangos de longitud de onda que utiliza para separar la información de una imagen en color en imágenes roja, verde y azul. Aún así, han sido tomados como rangos de longitud de onda los siguientes: rojo (600-680 nm), verde (500-580 nm) y azul (400 -480 nm).

La validación preliminar de los resultados obtenidos se realiza a partir de la comparación de los valores de NG encontrados mediante la aplicación de ADI para cada una de las bandas en que ha sido descompuesta la imagen en color y los valores de reflectancia homologados, correspondientes a cada fase mineral y para cada banda. Este procedimiento permitirá comprobar si alguna medida en NG se sale de la tendencia general de la relación NG y Reflectancia, ya comprobada anteriormente en el ajuste de la cámara CCD y así, garantizar que el proceso de adquisición, tratamiento, muestreo y determinación de los rangos en NG que caracterizan a cada

fase mineral sean los adecuados. La presencia de un error en esta comparación indicará el posible fallo en alguno o varios de los pasos seguidos durante el proceso experimental.

Con el fin de simplificar la comparación entre los NG y la reflectancia de los minerales, se utilizarán los valores promedios de éstos. La reflectancia promedio en aire, para cada mineral corresponderán a los publicados por Criddle & Stanley (1993) en sus estudios de cuantificación de parámetros de reflectancia para minerales opacos. El promediado ha sido realizado separando los valores de reflectancia en tres grupos, rojo (600-680 nm), verde (500-580 nm) y azul (400 - 480 nm) y tomando en cuenta que muchos minerales tienen varios valores de R (Ro, Re; R1, R2 y R3), en función del sistema cristalino al que pertenecen y de la orientación. Como ejemplo se presenta el cálculo de la reflectancia promedio de la Niquelina (Tabla 9):

NiAS	λ de la luz	Aire		Promediado
Bandas	nm	Ro (%)	Re (%)	R (%)
Azul	400	45,4	39,2	40,9
	420	44,2	38,8	
	440	43,5	36,8	
	460	43,2	36,2	
	480	44,3	37,2	
Verde	500	46,4	39,6	48
	520	48,6	42,3	
	540	50,7	45,3	
	560	52,8	48,2	
	580	54,8	51,0	
Roja	600	56,7	53,7	50,7
	620	58,4	55,9	
	640	59,9	57,8	
	660	61,3	59,4	
	680	62,5	61,0	

Tabla 9. Valores de Reflectancia de la Niquelina. Modificado de Criddle & Stanley (1993)

La representación numérica de los datos (Tabla 10) y su representación gráfica en curvas de relación NG vs. Reflectancia (Figura 78, Figura 79 y Figura 80), han permitido validar de forma preliminar el correcto desarrollo del proceso experimental de toma de datos.

En los tres casos (Bandas roja, verde y azul), la relación entre los valores encontrados (NG) de la caracterización mediante ADI de los treinta minerales estudiados y los de sus correspondientes cifras de reflectancia (% R) es directamente proporcional y se ajusta a las siguientes funciones:

BANDA ROJA:

$$\text{VALOR DE NG} = 3,101 * (\text{VALOR DE REFLECTANCIA})$$

Correlación: $R^2 = 0,97$

BANDA VERDE:

$$\text{VALOR DE NG} = 3,071 * (\text{VALOR DE REFLECTANCIA})$$

Correlación: $R^2 = 0,87$

BANDA AZUL:

$$\text{VALOR DE NG} = 3,071 * (\text{VALOR DE REFLECTANCIA})$$

Correlación: $R^2 = 0,92$

Es importante indicar que a la hora de generar estas funciones de relación entre NG y % R, algunos puntos no han sido tomados en cuenta debido a que su valor en NG estaba limitado por la resolución de medida de intensidad del equipo de ADI (máximo: 255). Así, en la banda roja han sido eliminando los puntos que representaban al Oro y la Plata. En el caso de la banda verde y azul, el punto eliminado es el correspondiente a la Plata.

MINERAL	VALORES PROMEDIO					
	ROJA		VERDE		AZUL	
	% R	NG	% R	NG	% R	NG
GRAFITO	12	28	14	34	11	25
ORO	90	256	75	240	37	116
PLATA	94	256	93	256	86	256
PLATINO	71	224	69	220	63	189
ARSENOPIRITA	53	187	53	191	48	159
BORNITA	28,8	92	21,3	69	17,9	56
CALCOPIRITA	48,7	161	46,4	157	32	107
CINABRIO	25	80	27,5	89	30	93
COVELLINA	13,5	42	14,5	47	22	68
CUBANITA	40,5	130	36,9	117	45,35	117
ESFALERITA	16	57	16,5	61	18,3	60
ESTIBINA	37	119	40	127	43	134
GALENA	42,9	137	43,1	142	49,1	150
LINNEITA	45	145	40	127	30	92
MARCASITA	51,7	159	53,5	168	45,35	139
MOLIBDENITA	29	90	28,5	92	32,5	100
NIQUELINA	59	190	47	149	39	121
PENTLANDITA	46	148	43	136	33	99
PIRITA	56	189	54,6	190	42,6	149
PIRROTINA	41,5	143	38,5	141	33	119
TETRAHEDRITA	31	98	32,4	107	31,7	91
CASITERITA	11,25	36	11,95	38	12	38
CROMITA	13,1	42	13,5	43	14,2	44
HEMATITES	26,2	80	28,3	87	30,6	91
ILMENITA	18,4	59	17,8	57	19,1	59
MAGNETITA	20	71	19,9	65	20,2	65
RUTILO	20,5	66	21	67	24,5	75
URANINITA	13,5	43	13,7	44	14,8	46
GOETHITA	15,6	48	16,2	50	21,7	61
WOLFRAMITA	15,5	50	15,8	50	17,5	54
GANGA	7,2	19	5,4	14	4,3	11

Tabla 10. Valores de reflectancia (%) y NG para las Bandas R, G. y B.

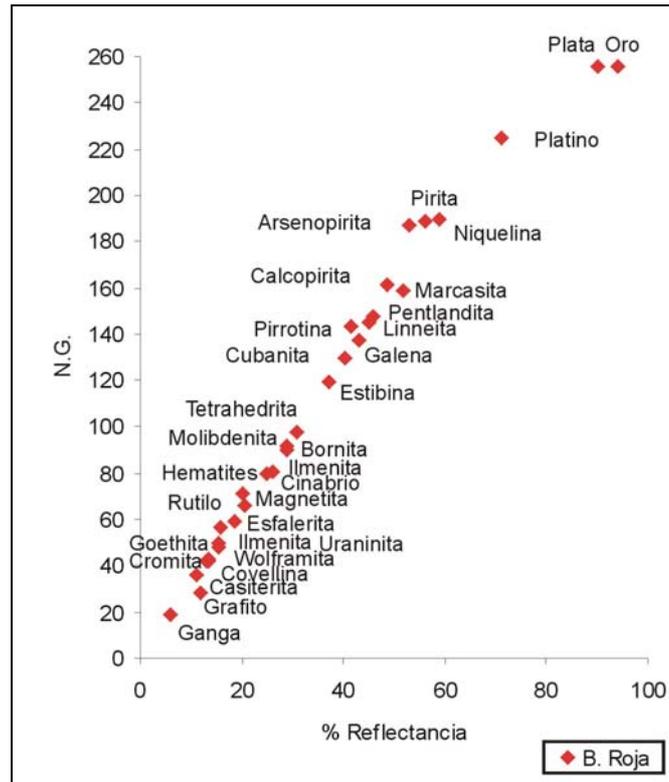


Figura 78. Gráfico de comparación de NG Vs. % Reflectancia. Banda Roja.

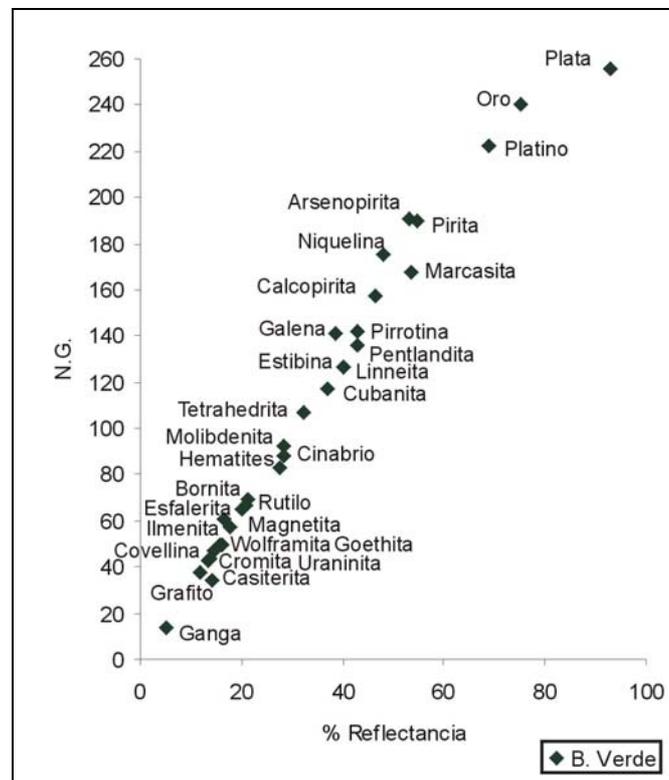


Figura 79. Gráfico de comparación de NG Vs. % Reflectancia. Banda Verde.

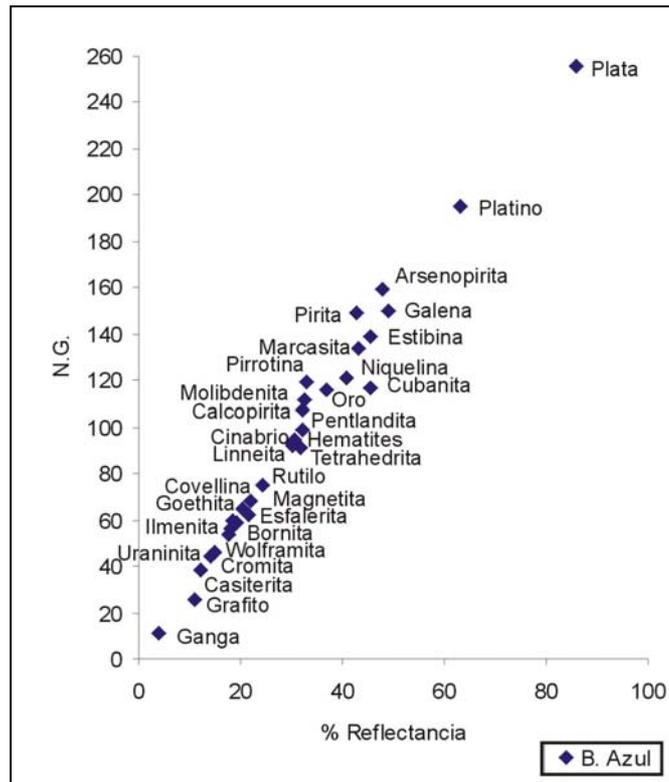


Figura 80. Gráfico de comparación de NG Vs. % Reflectancia. Banda Azul.

Los gráficos de relación NG y % R (Figura 78, Figura 79 y Figura 80), además de permitir verificar la coherencia de los datos obtenidos mediante el uso de la técnica de ADI, presentan la posibilidad de explicar algunas cuestiones sobre la razón física por la cual es posible clasificar el color que presentan los minerales; aunque éste no es el fin de este trabajo a continuación se presentan algunos ejemplos:

La diferencia en la percepción del color que presentan la pirita y arsenopirita es muy sutil. En bibliografía especializada en descripción de propiedades ópticas de los minerales, se asigna a la arsenopirita un color blanco y a la pirita un color blanco amarillento, al ser incididas con luz blanca. Como se puede ver en las curvas presentadas, esto es debido a que la arsenopirita refleja más luz en la banda azul que la pirita, ya que las componentes verde y roja son aproximadamente iguales para los dos minerales. Esto provoca que aparezcan tonalidades azuladas en la arsenopirita, que refuerzan el efecto del filtro azul (luz día) del microscopio para dar al ojo la impresión blanca (ligeramente alterada a hacia tonos rosados o amarillentos en ciertas posiciones al girar la platina, por variaciones ligadas al pleocroísmo del mineral). En

la pirita, en cambio, el menor valor de la banda azul y ligeramente superior de la roja confieren al mineral la tonalidad que el ojo humano percibe amarillo. Este efecto se refuerza en la Calcopirita (valores Rojo y Verde ~ 160, frente a 110 para Azul).

En el caso de explicar la diferencia de percepción del color entre la marcasita y pirita, la solución es más simple. La marcasita presenta un color blanco, con ligero pleocroísmo de rosado-amarillento a verde-azulado, debido a que en realidad, refleja más luz en las componentes azul (~130) y verde (~170), manteniéndose en la roja (~155) por debajo de la calcopirita (Figura 80).

Pero la separación de la información de color en bandas no solo ha permitido mejorar la aplicación del ADI, también ha aumentado la capacidad de discriminación o diferenciación de minerales a partir del uso de los valores de reflexión (% R). Un ejemplo práctico resulta al comparar los valores de reflexión medios de la galena y Calcopirita (aproximadamente 43% en ambos casos) y los valores de reflexión para intervalos pequeños de longitudes de onda de la luz. Los resultados son muy diferentes (Figura 81) y explican, de nuevo, la diferente percepción del color de ambos minerales por el ojo humano: blanco la galena (valores próximos en las tres bandas, con ligero predominio del azul) y amarillo en la calcopirita (ya comentado, con predominio del rojo frente al azul).

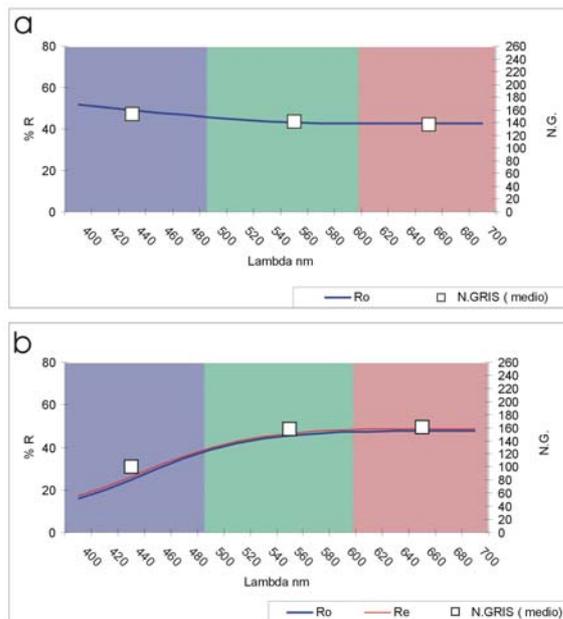


Figura 81. Gráfico de comparación de NG vs. % Reflectancia. a) galena. b) calcopirita

IV.5.3 Segmentación de fases minerales

Verificado que los resultados del muestreo individualizado sobre cada fase mineral estudiada (NG) presentan los valores previsibles (proporcionales a los % de Reflexión, para cada banda), es posible ahora plantear la segmentación de fases minerales presentes en imágenes digitales. La segmentación (también llamada discriminación o clasificación) es un proceso que permite extraer de la imagen estudiada aquellas partes que posteriormente serán cuantificadas.

En este estudio, la segmentación se obtendrá de forma automática al incluir los rangos de segmentación (para las tres bandas) en una rutina especialmente diseñada para estas operaciones. La elección de un análisis multibanda (tres bandas) se sustenta en la información que se presenta en los siguientes gráficos de dispersión (Figura 82 y Figura 83), en los que se comparan los valores medios en NG encontrados en la etapa de caracterización mediante ADI de los minerales estudiados.

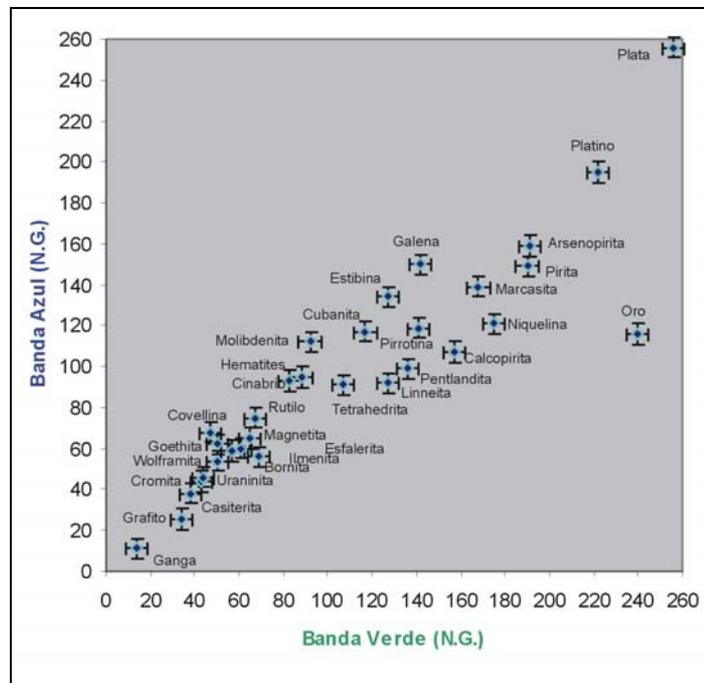


Figura 82. Gráfico de comparación de NG de Bandas Azul vs. Verde.

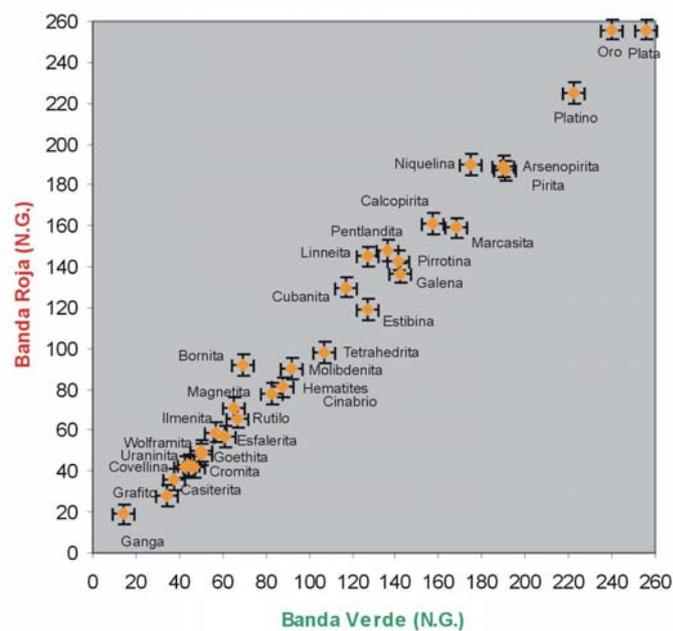


Figura 83. Gráfico de comparación de NG de Bandas Roja vs. Verde.

De los gráficos (Figura 82 y Figura 83), se deduce, de forma teórica, que el análisis multibanda podría ser aplicable con resultados satisfactorios, por cuanto las diferencias de % R entre minerales se manifiestan en sus respuesta en NG. Es evidente también la existencia de solapamientos entre los rangos de segmentación de algunos minerales, lo que dificulta su correcta segmentación.

La rutina diseñada para segmentar las imágenes digitales (ver Anexo III) aplica los rangos de segmentación según los minerales presentes en la imagen, reconocidos y elegidos previamente por el operador para que sean identificados.

El proceso siguiente es clasificar automáticamente (para cada una de las bandas: R, G y B) todos los *pixels* que pertenecen a una fase en concreto y generar una imagen binaria (valor 1 a los *pixels* que representan fase a identificar; valor 0 para los *pixels* diferentes). Estas tres imágenes binarias posteriormente se interceptarán, generando una imagen binaria final que representa a la fase de interés (Tabla 11).

Banda	Rangos de Segmentación
Roja -R-	$m_R \pm 2\sigma_R$
Verde -G-	$M_G \pm 2\sigma_G$
Azul -B-	$M_B \pm 2\sigma_B$

SEGMENTACIÓN FINAL = $((m_R \pm 2\sigma_R) \cap (m_G \pm 2\sigma_G) \cap (m_B \pm 2\sigma_B))$
Ajuste: 0,8573 %

Tabla 11. Rangos de segmentación.

La secuencia descrita se llevara a cabo para todas las fases minerales presentes en la imagen digital que hayan sido seleccionadas por el operador para que sean clasificadas. Un ejemplo de cómo funciona la segmentación descrita se presenta a continuación (Figura 84), aplicado a la clasificación de la pirrotina.

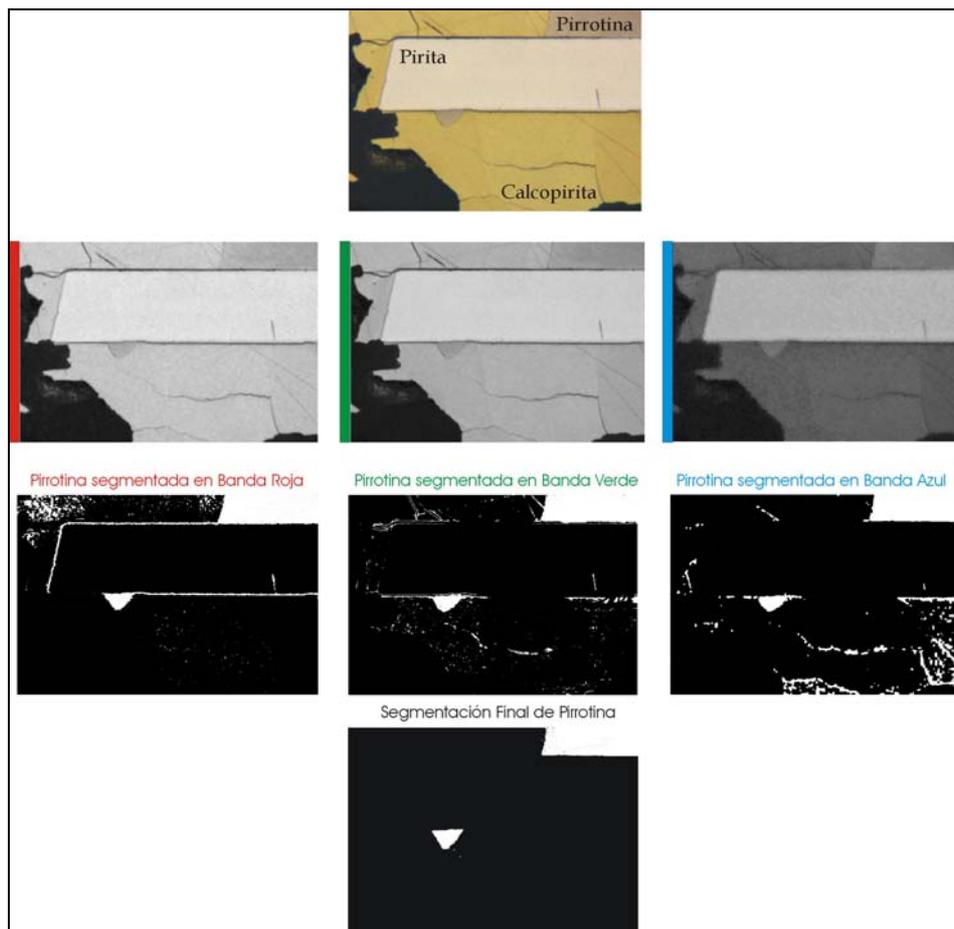


Figura 84. Segmentación de fases minerales.

IV.5.3 Validación de los rangos de segmentación.

IV.5.3.1 Introducción

La correcta segmentación de fases minerales presentes en imágenes digitales es el aspecto a evaluar como parte del proceso de validación del trabajo desarrollado. La validación a realizar consistirá en verificar si los rangos de segmentación definidos anteriormente, fruto del análisis individualizado de las fases minerales estudiadas, tienen posibilidad de ser aplicados con éxito sobre imágenes digitales de minerales, independientemente de su procedencia.

Sin lugar a dudas, la observación directa de los resultados de segmentación sobre la imagen digital por parte del microscopista, será la forma más segura de verificar si la segmentación es correcta o no. Este criterio ya fue aplicado a todos los minerales estudiados (Caracterización de las fases minerales mediante ADI, IV.4.3) mostrándose un ejemplo de segmentación para cada mineral es presentado al final de su ficha descriptiva.

Además de la observación directa del resultado de la segmentación sobre la imagen digital, es posible extraer de las curvas de distribución de NG de la imágenes estudiadas, los parámetros estadísticos (rangos de NG, valores medios, etc.) de las fases presentes en las imágenes. Estos valores serán comparados con los obtenidos del análisis individualizado y así se valorara su semejanza o no. Otro criterio para evaluar el resultado de la segmentación es el de determinar la relación entre el área total de las imágenes estudiadas y la suma de las áreas segmentadas.

A continuación se presentarán diversos ensayos (segmentación de varias fases minerales en imágenes digitales), en los que se han aplicado los criterios descritos anteriormente para validar los rangos de segmentación definidos en el proceso experimental.

Las imágenes digitales sobre las que se trabaja proceden de las probetas utilizadas como referencias y de otras muestras a nuestra disposición (Probetas pulidas Colección IGME).

La validación intentará abarcar la identificación del mayor número de fases minerales caracterizadas en este estudio.

IV.5.3.2 Primer Ensayo

La primera validación de los rangos de segmentación ha sido realizada sobre imágenes tomadas de una probeta proveniente del Yacimiento Boliden (Suecia). La descripción mineralógica en detalle de esta probeta (HD - 1146) se encuentra en el Anexo 1. Las fases minerales a segmentar en este ensayo son:

Calcopirita, Esfalerita, Ganga (cuarzo) Pirita, Pirrotina.

Para este estudio, la adquisición de las imágenes ha sido realizada siguiendo un muestreo secuencial (24 imágenes) con un objetivo de 20 X. La elección de la zona a muestrear ha sido decidida por el operador, intentando que el mayor número de fases minerales presentes en la probeta aparezcan en las imágenes (mosaicos). Obviamente esto no se debe hacer si lo que se pretende es extraer información representativa de la probeta (análisis modal y ponderal de las fases minerales)

Adquiridas y tratadas las imágenes, se ha procedido a aplicar los rangos de segmentación definidos anteriormente, a fin de identificar las fases minerales presentes en las imágenes. La rutina diseñada para la segmentación de fases minerales asignará a cada mineral segmentado una máscara identificativa (Mosaico Segmentado en Lámina 4).

A continuación se obtendrán los histogramas de respuesta en NG para las bandas roja , verde y azul, con las que se ha trabajado. Esta información ha sido utilizada para su comparación con los rangos de segmentación empleados como referencia.

Finalmente se ha realizado un gráfico en el que aparecen los valores de % de área encontrados para cada fase mineral segmentada.

Los resultados visuales (fases segmentadas) y cuantitativos (curvas de frecuencia, diagramas de pastel y tablas) de la secuencia desarrollada se presentan de forma sintética en la Lámina 4.

Interpretación de resultados del primer ensayo:

Antes de realizar la interpretación de los resultados de segmentación, es importante indicar que la segmentación se ha realizado sobre las imágenes adquiridas y tratadas según lo planteado en este trabajo. En la Lámina 4, las 24 imágenes RGB presentes, sólo han sufrido el tratamiento de promediado a fin de que no pierdan la apariencia que presentan al ser observadas con el microscopio (rayas, sombras, etc.) y así, poder valorar de mejor manera el resultado de la segmentación.

De la observación del Mosaico Segmentado (Lámina 4), se desprende que la segmentación de las cinco fases minerales presentes en las 24 imágenes, en términos generales, se ajusta bastante bien a la realidad. En detalle es posible destacar los siguientes aspectos:

- Las zonas con rayas de pulido en la calcopirita, pirita y pirrotina, han sido identificadas como tales.
- Los granos muy pequeños de calcopirita y pirrotina incluidos dentro del cuarzo no aparecen en la segmentación debido a que han sido eliminados durante el proceso de tratamiento (eliminación de sombras, rayas y ruidos). Se acepta este error para evitar otros mayores que pudiera introducir el sistema, sobre todo ruidos debido a las limitaciones de la electrónica, según se ha explicado en la puesta a punto.

Los rangos en NG de las fases presentes en las imágenes caracterizadas (histogramas en Lámina 4), al ser comparados con los rangos utilizados como referencia en este trabajo, además de presentar una variación menor, se encuentran totalmente incluidos en ellos. Esto significa que, los rangos de referencia para estas cinco fases minerales, permiten una segmentación completa de los minerales presentes en estas imágenes. Si se compara el área de las fases minerales segmentadas con el área total de las imágenes estudiadas, se obtiene que solo un 0,63% del área total ha quedado sin ser segmentada.

Lámina 4. Validación de resultados (Ensayo 1).

IV.5.3.3 Segundo Ensayo

La segunda validación de los rangos de segmentación ha sido realizada sobre imágenes tomadas de una probeta proveniente de un indicio mineral de Pb-Ag en Extremadura (España).

Las fases minerales presentes en la probeta como componentes principales son: Cuarzo, arsenopirita, wolframita, esfalerita y como componentes accesorios: Galena, pirita, calcopirita, pirrotina, marcasita, bournonita. Las fases minerales presentes en las imágenes y a segmentar son:

Arsenopirita, Calcopirita, Esfalerita, Galena, Ganga (Cuarzo y Carbonato), Pirrotina y Wolframita.

Para este estudio, la adquisición de las imágenes, al igual que en el ensayo anterior, se ha realizado siguiendo un muestreo secuencial, limitado a 24 imágenes y con un objetivo de 20 X.

La localización de la zonas a muestrear ha sido decidida por el operador intentando que el mayor número de fases minerales presentes en la probeta aparezcan en las imágenes (mosaicos). Esto no se debe hacer si lo que se pretende es extraer información representativa de la probeta (análisis modal y ponderal de las fases minerales). Pero en este caso, al igual que en el anterior ensayo, el objetivo es poner a prueba el método, en las condiciones más exigentes, es decir, ante la presencia simultánea de la mayor cantidad de fases minerales diferentes.

Adquiridas y tratadas las imágenes (1 mosaico de 24 imágenes), se ha procedido a aplicar los rangos de segmentación a fin de identificar las siete fases minerales presentes.

La rutina diseñada asignará a cada fase mineral segmentada una máscara identificativa (Mosaico Segmentado en Lámina 5). Los resultados cuantitativos

(curvas de frecuencia y diagramas de pastel) de la secuencia desarrollada se sintetizan en la Lámina 5.

Interpretación de resultados del segundo ensayo:

De la observación del Mosaico 2 Segmentado (Lámina 5), cabe señalar que la segmentación de las siete fases minerales presentes en las 24 imágenes, en términos generales, se ajusta bastante bien a la realidad. En detalle es posible destacar los siguientes aspectos:

- Las zonas con rayas de pulido en la esfalerita y galena, han sido identificadas como tales.
- Los granos más pequeños de arsenopirita incluidos dentro de la wolframita sí aparecen en la segmentación.
- Los bordes de los granos de arsenopirita no siempre se segmentan correctamente debido a que lo *pixels* disminuyen sus valor de NG al acercarse a fases menos reflectivas (ganga).

Los rangos en NG de las fases presentes en las imágenes caracterizadas (histogramas en Lámina 5) se encuentran totalmente incluidos dentro de los rangos utilizados como referencia en este trabajo.

Otro aspecto a destacar de la observación de estas curvas es el solapamiento de los NG de la wolframita y esfalerita en las bandas roja y azul. Esta circunstancia no ha dificultado el proceso de segmentación de estas dos fases minerales.

El área de las fases minerales segmentadas resulta ligeramente inferior al área total de las imágenes estudiadas (Área segmentada = 98,09% Área total).

Lámina 5. Validación de resultados (Ensayo 2).

IV.5.3.4 Tercer Ensayo

En esta ocasión, la validación de los rangos de segmentación ha sido realizada sobre imágenes tomadas de la probeta HD - 1153, procedente del yacimiento Banderz Rammelsberg (Alemania) y de la probeta HD - 1217, procedente del yacimiento Montenevé (Italia). El reconocimiento y caracterización mineralógica de las dos probetas utilizadas en este ensayo de validación se encuentran detallados en el ANEXO 1. Los minerales a segmentar son:

HD - 1153: Calcopirita, Esfalerita, Galena, Plata nativa, Tetrahedrita, Ganga (cuarzo).

HD - 1217: Bornita, Calcopirita, Esfalerita, Ganga (cuarzo).

Para este estudio, la adquisición de las imágenes de cada probeta ha sido realizada siguiendo un muestreo secuencial, limitado a 12 imágenes por probeta y con un objetivo de 20 X. La localización de la zonas a muestrear ha sido decidida por el operador intentando que el mayor número de fases minerales presentes en la probeta aparezcan en las imágenes. Los resultados visuales (fases segmentadas) y cuantitativos (histogramas, y tablas) de la secuencia desarrollada se presentan a continuación (Figura 85 y Tabla 12).

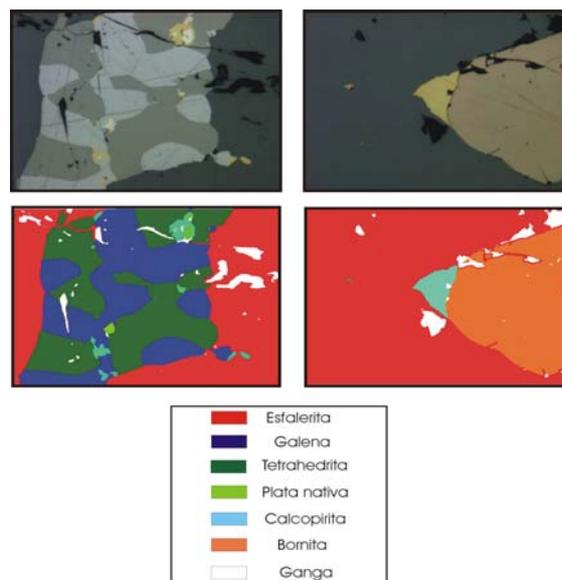


Figura 85. Segmentación de imágenes de las probetas HD - 1153 y HD - 1217.

Mineral Segmentado	Número de <i>pixels</i>	% de <i>pixels</i>
Esfalerita	1282919	12,1
Galena	1461266	13,8
Tetrahedrita	1233953	11,6
Plata Nativa	335039	3,1
Calcopirita	832429	7,8
Bornita	1302506	12,3
Ganga	3745167	35,3
<i>Sin Segmentar</i>	423554	4,1
<i>Pixels Totales en 24 imágenes</i>	10616832	100,0

Tabla 12. Comparación entre área total y áreas de fases segmentadas.

Interpretación de resultados del tercer ensayo:

El resultado de este ensayo ha permitido comprobar que los rangos en NG que caracterizan a cada mineral en las tres bandas, son semejantes a los definidos anteriormente, mediante el análisis individualizado.

Si comparamos el número de *pixels* segmentados frente a los que hay en las treinta imágenes utilizadas (10.616.832 *pixels*), se encuentra que 423.554 *pixels* no han sido segmentados (4,10% de los *pixels* totales). Este porcentaje es coherente con el ajuste de fiabilidad de 85,73% (ver tabla 11) empleado en los rangos de segmentación.

IV.5.3.5 Cuarto Ensayo

Una última validación ha sido realizada a partir de una imagen compuesta (Figura 86) con segmentos de fases minerales interesantes a la hora de valorar los rangos de segmentación. La selección de los minerales incluidos en la imagen compuesta estará formada por fases minerales con valores de reflectancia similares y de esta forma, proclives a solaparse. Al igual que en el estudio individualizado, la imagen original, que en este caso es compuesta, es tratada y posteriormente separada en las tres bandas para aplicar el análisis multibanda. Los minerales seleccionados para esta evaluación son :

Pirita, Calcopirita, Esfalerita, Ganga (Carbonato y Cuarzo), Galena, Bornita, Covellina, Ilmenita, Tetrahedrita, Pirrotina, Magnetita y Wolframita.

De cada una de las bandas (rojo, verde y azul) en que se separa la imagen en color compuesta ya tratada, han sido generados histogramas de frecuencia (Figura 86) para observar el comportamiento y solapamiento de las distribuciones en NG de cada una de la fases minerales presentes en la imagen. Los resultados visuales (fases segmentadas) y cuantitativos (curvas de frecuencia y tablas) de la secuencia desarrollada se presentan a continuación (Figura 86). El desarrollo de este ensayo ha sido presentado en el X Reunión de AIESMIN (Berrezueta, 2002).

Interpretación de resultados del segundo ensayo:

Lo más destacable en este ensayo es la posibilidad de representar en una misma curva 12 minerales y comprobar que los rangos de segmentación presentes en las curvas se ajustan a los establecidos como referencia. Además, ha sido posible verificar en fases completas la superposición de curvas entre distintas fases, tal como era previsible. De ahí que sea necesario utilizar siempre el análisis multiespectral.

Es importante indicar también que, junto a la verificación de la viabilidad de segmentar varias fases minerales presentes en una misma imagen, ha sido posible

comprobar que las curvas de distribución en NG para las fases minerales presentes en la imagen compuesta presentan una distribución normal.

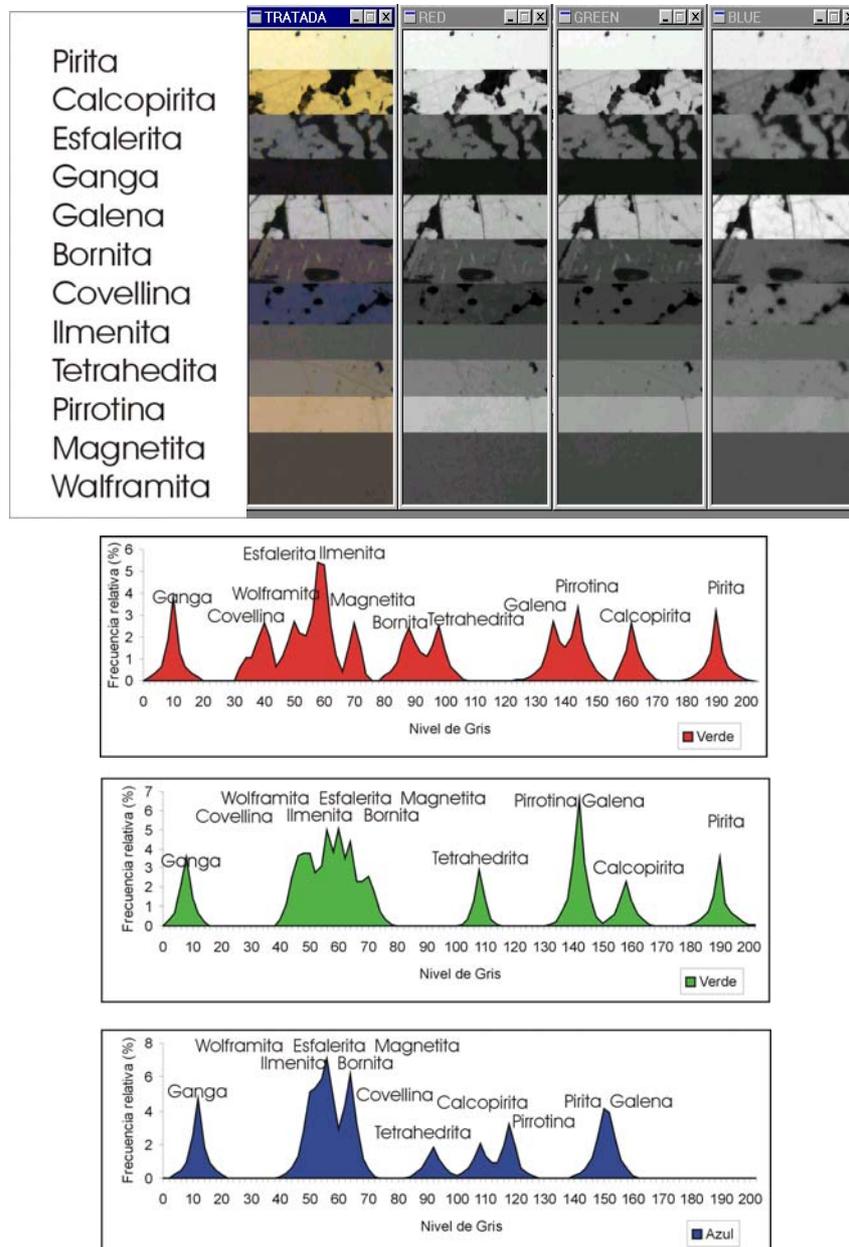


Figura 86. Histogramas de las imágenes de doce minerales.

Estas validaciones, aún cuando se puedan considerar como restringidas, han permitido comprobar que la aplicación de la segmentación de varias fases minerales presentes en una misma imagen es posible siempre que se utilice un análisis multibanda.

IV.6 EL SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN POR ADI

IV.6.1 Introducción

El resultado práctico de esta investigación se ha plasmado en el desarrollo de un sistema experto de identificación de las principales fases minerales, presentes y reconocibles en secciones pulidas. Para ello, ha sido necesario incluir todas aquellas características que condicionan y facilitan la identificación de fases minerales (tipo de yacimiento, paragénesis o asociación mineral típica, minerales importantes, niveles de segmentación para bandas R, G y B, etc.) en códigos de lenguaje *visual basic*.

En realidad, el sistema experto supone etapas previas enfocadas a adquirir y tratar las imágenes, realizadas tras haber conseguido unas condiciones que garanticen la reproductibilidad y eficacia de la técnica (pulido de probetas, puesta a punto del equipo, etc.).

IV.6.2 Funcionamiento del sistema de identificación por ADI

Una vez adquiridas y tratadas las imágenes, para el correcto funcionamiento del programa de identificación de minerales es necesario introducir una información que debe ser obtenida previamente. Esta información es:

- a) Tipología del yacimiento de donde procede la muestra.
- b) Minerales presentes en probetas pulidas.

Ingresada esta información, automáticamente el programa inicia el proceso de identificación y cuantificación de fases minerales aplicando los rangos de segmentación de referencia definidos durante el proceso de caracterización de fases minerales mediante ADI.

A continuación se presenta de modo resumido el algoritmo del programa de identificación (Figura 87).

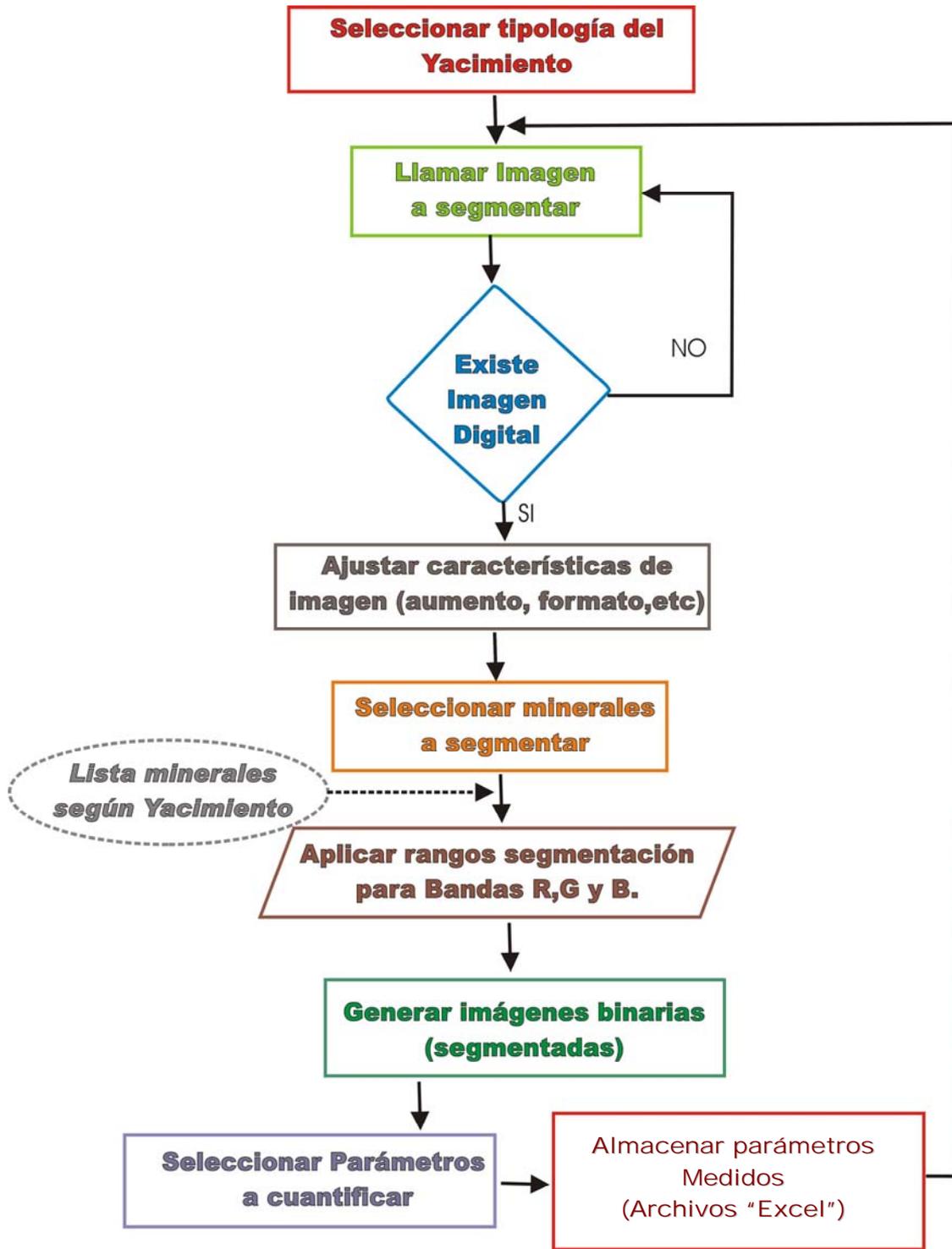


Figura 87. Algoritmo simplificado del Sistema Experto de identificación por ADI.

Las descripción en detalle del desarrollo y funcionamiento de las etapas que componen el Sistema Experto se presenta a continuación:

1. **Seleccionar, de la clasificación predefinida, la tipología del yacimiento de donde procede la muestra.**

En esta primera fase, como ventana de inicio del programa se ha diseñado un formulario en el que se solicita definir el **Ámbito** al que pertenecen los yacimientos de donde proceden las probetas que queremos caracterizar. A continuación, en función de nuestra elección, aparecerán los tipos de depósitos minerales que pertenecen a cada grupo y que ya han sido definidos y caracterizados anteriormente (ver apartado IV.1.2). La visualización de estos formularios es la siguiente:

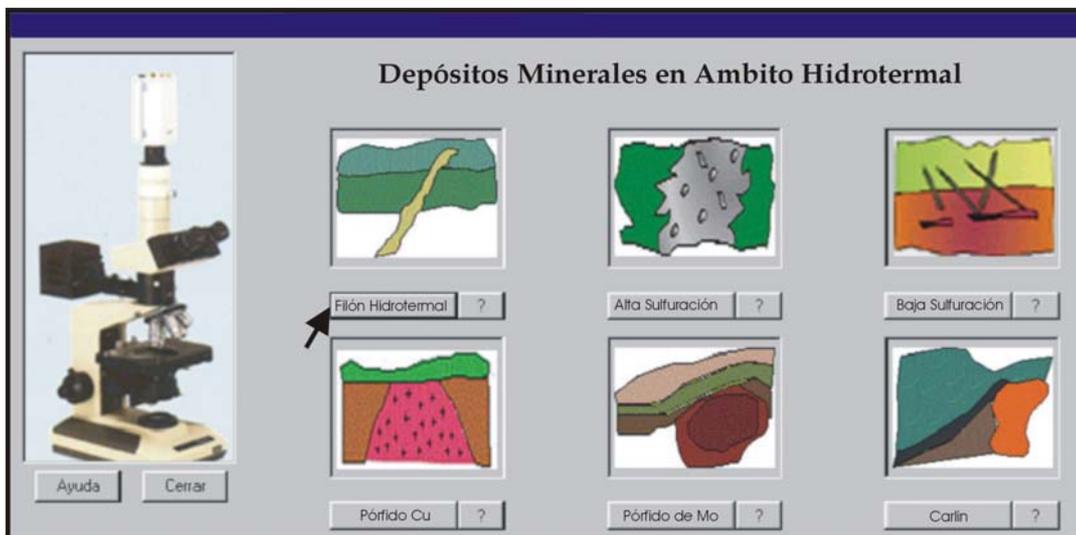
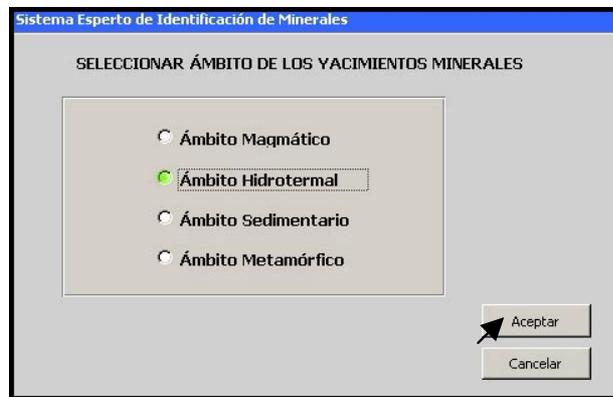


Figura 88. Ventanas para ingresar la información de la procedencia de la probetas.

Para seleccionar el **Ámbito** al que pertenece el depósito mineral, es necesario primero seleccionar una opción (Dialogo opción) y luego Aceptar. Como ejemplo se

ha marcado **Ámbito Hidrotermal**. A continuación aparece una nueva ventana con los Yacimientos pertenecientes al **Ámbito Seleccionado**, siguiendo con el ejemplo planteado anteriormente, aparecen: Filones hidrotermales, Epitermales (Alta y Baja Sulfuración), Pórfidos (Cu y Mo) y diseminados tipo Carlin.

La selección del Depósito Mineral que nos interesa se realiza marcando con el puntero la opción deseada, seguida de doble *click* o *intro*. Esta ventana, además de ofrecer una ayuda general para el caso en que se encuentra el operador, permite obtener información sobre los minerales que pueden encontrarse en cada depósito (botón con símbolo “?” en el menú). Si se desea interrumpir la ejecución del programa es necesario utilizar el botón cancelar, con lo cual se volverá a la ventana de diálogo precedente.

Para continuar la explicación del funcionamiento del programa, ha sido seleccionada de la última ventana presentada, la opción: Yacimiento hidrotermal.

2. Llamar las imágenes a caracterizar mediante ADI.

En la ventana para llamar las imágenes, la primera información que aparece es un mensaje diciendo el depósito mineral al que pertenecen las imágenes.

Si el formato del nombre con el que se han grabado las imágenes digitales (nombre + número) durante el proceso de adquisición y archivo de las imágenes digitales se ha respetado (ver apartado IV.4.1), para la llamada de estas imágenes será necesario incluir el nombre de la imagen (solo caracteres tipo texto) en la opción Nombre de la Imagen (Letras). A continuación, en las opciones desde, hasta y paso, se incluirán los números de las imágenes.

Incluidos los datos de las imagen, es necesario seleccionar el tipo de extensión con la que fue almacenada. Las posibilidades que se presentan son las tres más usadas: *jpg*, *tif* y *bmp*.

Otro aspecto que debe ser seleccionado en este dialogo es el aumento del objetivo con que fueron adquiridas las imágenes a caracterizar. Sólo una de las tres posibilidades puede ser seleccionada a la vez. La selección de este parámetro permitirá convertir las medidas en *pixels* a su escala adecuada, según la calibración geométrica desarrollada para los objetivos 5X, 10X y 20X .

Al final del formulario aparece una opción con la que se abrirá un documento de *Microsoft Excel*, el cual almacenará los datos medidos de las imágenes digitales. Esta opción aparece activada por defecto y no puede ser desactivada.

Rellenados todos los campos, la llamada de la imagen se realiza utilizando el Botón Aceptar . Para cancelar la ejecución del programa y regresar a la ventana precedente se utilizará el botón Cancelar.

A continuación (Figura 89) se presenta un ejemplo de ventana de llamada de dos imágenes con nombres *ejemplo1.jpg* y *ejemplo2.jpg*, adquiridas con aumento 5X y de un depósito de tipo Filón Hidrotermal.

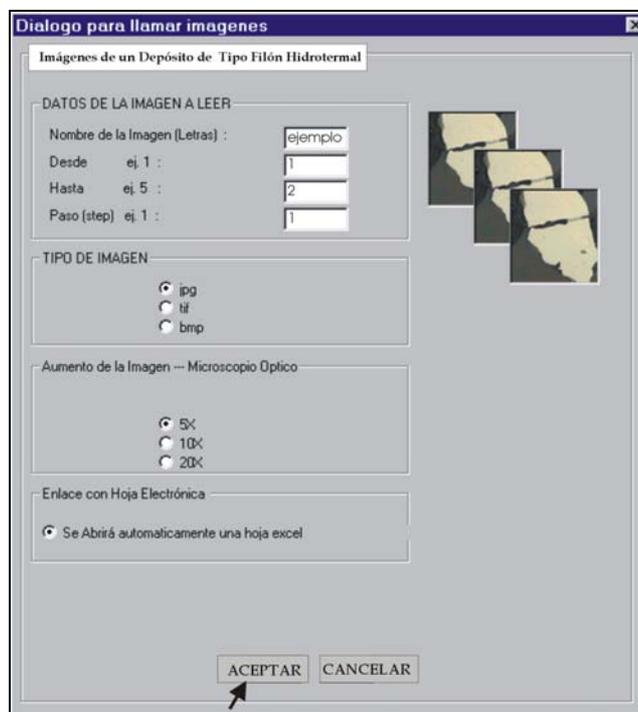


Figura 89. Ventanas para llamar las imágenes a caracterizar mediante ADI

3. Seleccionar los minerales a identificar y cuantificar.

Para la elección de los minerales a caracterizar mediante ADI, aparecerá un menú de diálogo con las lista de minerales (Figura 90), que pueden ser seleccionados. La lista de minerales dependerá del Depósito mineral estudiado (ver apartado IV.2.2).

Otro requisito a la hora de elegir los minerales es que estén presentes y hayan sido reconocidos en la probeta estudiada durante el proceso de descripción mineralógica llevada a cabo por el microscopista.

Por defecto, ningún mineral de la lista aparece elegido para el análisis. La elección de los minerales se realiza con el ratón, localizando el puntero sobre la opción deseada y un *click*. Elegidos todos los minerales de interés se utiliza el botón Aceptar para continuar la secuencia del programa. Si se desea cancelar la ejecución del programa o regresar a la ventana precedente se utilizará el botón Cancelar.

Continuando con el ejemplo planteado anteriormente, se seleccionarán dos fases con interés de ser caracterizadas con ADI: Oro y Ganga (Ver Figura 90)



Figura 90. Ventana para seleccionar minerales a caracterizar.

Cumplidas las tres etapas antes mencionadas, el programa desarrollado inicia la aplicación de los rangos de segmentación encontrados durante el proceso experimental sobre las imágenes digitales, a fin de identificar las fases de interés. En primera instancia, la imagen digital en color se descompone en sus tres componentes: Roja, Verde y Azul.. La secuencia se ejecuta mediante las siguientes instrucciones:

```
' *** Separación en bandas R,G,B *** .  
  
    rOutImg = AphImgNew("ROJO")  
    gOutImg = AphImgNew("VERDE")  
    bOutImg = AphImgNew("AZUL")  
  
AphImgColorToRGB InImg, routimg, goutimg, boutimg
```

A continuación, según las fases elegidas para su caracterización, se aplicaran los rangos de segmentación para cada banda. Como ejemplo, se presentan las instrucciones que permiten segmentar el oro y la generación de una imagen binaria que almacena la información de la fase estudiada (valor 1 fase estudiada, valor 0 resto de fases).

```
          *                               *  
          ORO  
  
if SaveOptions.ORO = 1 then  
  
'Segmentación de la fase utilizando rangos de segmentación (R,G,B)  
AphImgColorThreshold InImg, AphImgNew("ORO"), AphThreshold(255,255,235,244,112,121), 0  
AphImgWrite AphImg("ORO"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempORO.jpg",  
"AphJpegFile"  
AphImgRead AphImgNew("ORO"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempORO.jpg"  
  
'Creación de objetos (seleccionado 255)  
AphImgThresholdObj AphImgNew("ORO"), AphObjNew("ORO"), AphThreshold(254,255)
```

Es importante señalar que, a fin de controlar la segmentación resultante en cada banda, cada una de las instrucciones planteadas se verán reflejadas de forma visual en el monitor. Esto permite al operador, en caso de un error en la segmentación de una determinada fase, interrumpir la secuencia y no introducir datos falsos en el análisis.

El paso siguiente, generadas las imágenes binarias con las fases de interés, es el cálculo de los parámetros que caracterizan a las fases estudiadas. Este análisis proporciona el valor de parámetros como diámetro, área, dirección, etc., de cada grano presente en la imagen binaria. Por defecto en esta aplicación se obtienen los siguientes parámetros: área y "breadth" (diámetro de malla). Aunque es posible obtener otros parámetros, para su cálculo deben modificarse las instrucciones de la rutina desarrollada. Las instrucciones desarrolladas para cuantificar el área y *breadth* de granos de oro son las siguientes:

```
' Medición de los parámetros básicos de los granos de ORO.  
AphRegionShape AphObj("ORO"), "REGION"  
  
AphObjGetIndexList AphObj("ORO"), indexes  
  
If ArrayDims(indexes) <> 0 Then  
    lo = LBound(indexes)  
    hi = UBound(indexes)  
    Set ii = Sheet.Cells
```

Medidos los parámetros, se han desarrollado unas instrucciones para exportar los datos extraídos al archivo de *Microsoft Excel* abierto durante la llamada de imágenes (Figura 91). En este documento se crearán unas hojas donde se almacenará la información por fases. Entre la información que aparecerá está: nombre de fase analizada, número identificativo de grano medido, su área y su *breadth*. Las instrucciones para conseguir esto en el caso de granos de oro son las siguientes:

```
**** Datos en la hoja de excel ****  
  
'Datos en Hoja Excel  
  
Set cell = ii.Item(1,1)  
cell.value = "ORO"  
Set cell = ii.Item(2,1)  
cell.value = "desde"  
Set cell = ii.Item(2,2)  
cell.value = lo  
Set cell = ii.Item(3,1)  
cell.value = "hasta"  
Set cell = ii.Item(3,2)  
cell.value = hi  
  
for j=lo to hi  
    objIndex = indexes(j)  
    attrValue = AphObjGetAttributeD( AphObj("ORO"), objIndex, "AREA")  
  
    If tt=1 Then lllu=tt*j
```

```

' Escribir datos en las celdas en Excel

Set cell = ii.Item(4+lllu,1)
  cell.value = zz
Set cell = ii.Item(4+lllu,2)
  cell.value = j+1
Set cell = ii.Item(4+lllu,3)
  cell.value = attrValue
  lllu= lllu+1
next j
AphObjFree AphObj("ORO")
end if
end if

```

Terminado el análisis, la rutina pide salvar el documento donde se han almacenado los parámetros medidos.

	A	B	C	D	E
1			ORO		
2					
3	Imagen	Número de grano	Area (um2)	Breadth (um)	
4	ejemplo1	1	450	20	
5		2	470	22	
6		3	135	10	
7		4	20	5	
8	ejemplo2	1	110	15	
9		2	500	26	
10		3	30	6	
11		4	50	8	
12					
13					
14					
15					
16					

Figura 91. Documento donde se almacenan los parámetros medidos.

La descripción completa de las instrucciones que forman el programa para la identificación de las fases minerales se presentan en el Anexo 3.

IV.7. APLICACIONES DEL ADI A PROBLEMAS MINEROS

IV.7.1 Estudio por ADI de las menas Auríferas “Nueva Esperanza” Colombia

IV.7.1.1 Introducción

El presente trabajo, cuyo objeto es la caracterización mineralógica y geométrica cuantificada de las menas auríferas mediante análisis digital de imagen y microscopía óptica de reflexión, ha sido planteado como apoyo a la investigación sobre los procesos de beneficio del oro en la minería informal (Departamento de Nariño, SO de Colombia), a fin de minimizar el impacto ambiental y los elevados riesgos derivados de la actividad incontrolada en el sector (Pantoja, 1999).

El desarrollo de esta aplicación y su validación ya han sido previamente publicados (Berrezueta y Castroviejo, 2001; Castroviejo *et al.*, 2002).

El yacimiento (Mina Nueva Esparta) está ubicado en la vereda Los Guabos (municipio Los Andes), flanco oriental del Nudo de Los Pastos, a 85 Km de la capital departamental, Pasto. La morfología de la región se caracteriza por su topografía abrupta, con altitudes de 1115 a 2520 m snm, con pendientes de moderadas a muy fuertes. Se trata de un yacimiento poco documentado, hidrotermal de tipo filoniano, con vetas de cuarzo aurífero de potencias decimétricas (10-70 cm) , con una dirección NO-SE y un buzamiento entre 45° y 75° E, que encajan en las metavolcanitas y metasedimentos del Grupo Dagua del Cretácico Superior, con facies prehnita-pumpellyita y esquistos verdes, (Murcia, y Cepeda, 1991). Estas litologías son interpretadas (*ibid.*), en su origen, como una secuencia de talud continental, con volcanitas básicas y turbiditas. El conjunto ha sido afectado por la tectónica andina y sus límites E, SO y O están delimitados por fallas (Figura 92).

Las mineralizaciones podrían estar relacionadas con episodios intrusivos (tonalíticos) paleocenos, observados en la región, aunque no se han documentado en las inmediaciones de la mina. Con la información disponible, podrían caracterizarse como

epizonales -en el sentido de Gebre-Mariam *et al.*, 1995-, aunque también se les ha definido como mesotermales, con baja relación Ag:Au (Shaw, 2000).

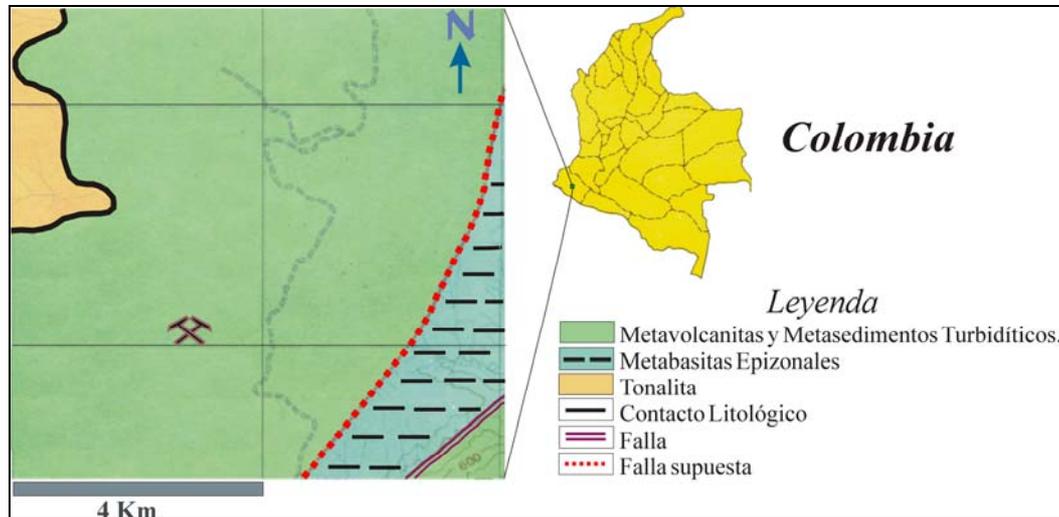


Figura 92. Ubicación geológica de la mina Nueva Esparta (mod. Murcia y Cepeda, 1991).

IV.6.3.2 Mineralogía de la Mina Nueva Esparta

Para hacer el estudio, se han seleccionado menas con oro, con la mayor parte del oro ligado a fases mineralógicas de fácil determinación (oro nativo esencialmente, con contenidos variables de plata) y granulometría suficiente para su observación directa con microscopio óptico. El material recibido para la investigación comprende únicamente relleno filoniano, procedente de las vetas Bruja y Gruesa de la mina Nueva Esparta.

El estudio microscópico previo muestra que se trata de menas de cuarzo y sulfoarseniuros, con mineralización aurífera asociada a ambas fases y texturas de relleno filoniano, parcialmente brechificado. Los componentes principales (>5% vol.) son: cuarzo, carbonato, sericita/minerales arcillosos y arsenopirita. Como accesorios (< 5% vol.) se han observado: tetraedrita/freibergita, esfalerita, galena, pirita, oro nativo/electrum, calcopirita y trazas de sulfosales / telururos.

El mineral dominante es cuarzo, que forma agregados cristalinos de grano grueso, con hábitos frecuentemente prismáticos y texturas en cresta o empalizada, típicas de

relleno hidrotermal; el carbonato (calcita) suele ocupar espacios intersticiales entre los cristales de cuarzo y, aunque es frecuente, es mucho menos abundante que éste. Los filosilicatos aparecen diseminados o cementando pequeñas fisuras. Las fases sulfuradas aparecen diseminadas o en agregados cristalinos, asociados al cuarzo.

Los contenidos aparentes de oro visible, aunque irregulares, llegan a ser muy altos (>600 ppm) en algunas de las secciones; no obstante, según se ha constatado con microscopio electrónico (análisis cualitativos), no siempre se trata de oro nativo, ya que los contenidos en plata suelen ser elevados (*electrum*).

El oro se presenta incluido en cuarzo o asociado a fases sulfuradas (arsenopirita, galena, esfalerita, freibergita o sulfosales; el oro puede estar o no totalmente incluido, es decir, el grano de oro puede encontrarse blindado por la fase sulfurada y ser inaccesible a reactivos o, por el contrario, puede asomar a la periferia de ésta y tener contacto con el cuarzo). Pueden distinguirse una generación aurífera de aspecto granular (en algún caso, como cemento de micro-brechas), la más importante cuantitativamente, y otra tardía, que rellena microfisuras en cualquiera de las fases citadas. Los tamaños de grano dominantes son finos (< 10 μm), sobre todo en Veta Bruja, pero los mayores contenidos de oro se concentran en granulometrías relativamente gruesas (>100 μm) (Figura 93).

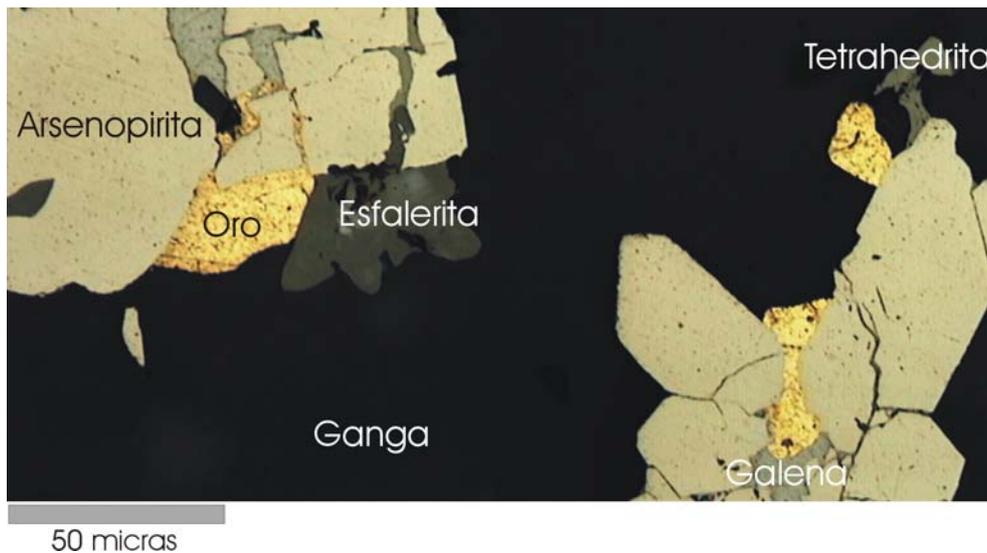


Figura 93. Imagen con mineralogía típica. Veta Bruja.

IV.7.1.2 Estudio por ADI

La metodología seguida en este trabajo (puesta a punto del equipo, digitalización / captura de imagen, tratamiento, segmentación y proceso matemático) es la descrita anteriormente. El estudio estará enfocado a estudiar tres fases minerales: Oro, Ganga y los sulfuros.

Las menas elegidas son relativamente excepcionales por su riqueza y granulometría, pero son ideales para el ensayo propuesto, que exige que el oro sea visible (Microscopio de Reflexión). Los problemas de representatividad de las medidas a escala de muestra (probeta pulida) se pueden descartar, puesto que se ha estudiado siempre la superficie entera de cada sección. No obstante, a escala de yacimiento no se han hecho todavía campañas sistemáticas de evaluación –se trata únicamente de minería de rapiña, informal-, por lo que los resultados obtenidos pueden considerarse únicamente orientativos a dicha escala.

➤ Parámetros determinados

Los parámetros medidos mediante ADI sobre las imágenes procedentes del Microscopio Optico son: número de granos de oro, área individual de los granos de oro, áreas totales de fases de ganga y sulfuros, y los parámetros: anchura ("*breadth*", mínimo valor entre dos tangentes paralelas) (Figura 94) y longitud ("*length*", máximo valor entre dos tangentes paralelas) aplicados a la totalidad de los granos de oro visibles en la sección pulida.

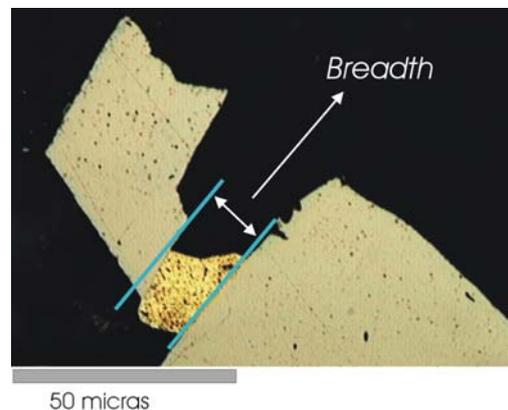


Figura 94. Representación de la anchura de un grano de oro.

A partir de estos datos se generó una función de relación entre área y anchura (Figura 95).

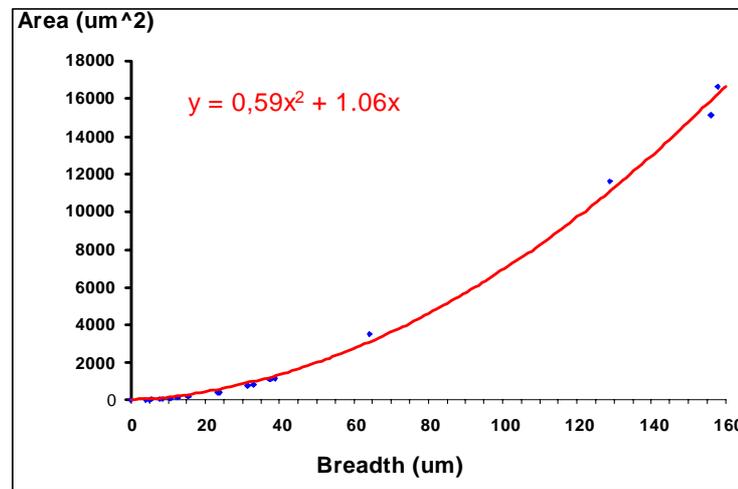


Figura 95. Curva de relación área - anchura.

- Número de granos

El número de granos detectados con esta técnica depende de:

- ◆ Los estrictamente intersectados por la superficie pulida de la probeta, únicos visibles.
- ◆ La resolución del microscopio, determinada a su vez por la configuración elegida: se ha utilizado un objetivo de 20 X, en aire, que ofrece óptimo rendimiento, pero no garantiza la detección de granos ultrafinos, por lo que el tramo granulométrico inferior (0-7µm) puede estar infra-representado.
- ◆ La identidad de los portadores de oro: sólo se detecta oro visible (esencialmente oro nativo) y no el contenido químicamente en otras fases; las aleaciones (Au-Ag, *electrum*, amalgama, etc.) se computan, en principio, como oro.

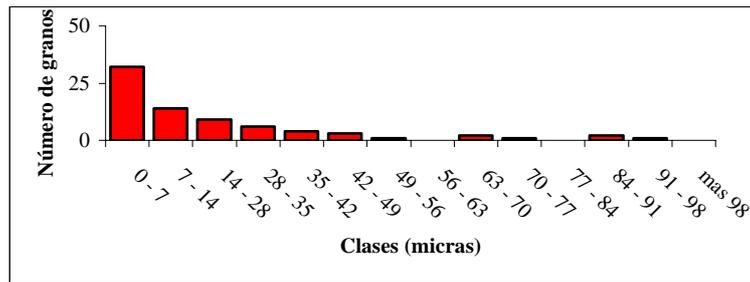


Figura 96. Frecuencia de granos de oro clasificados por rangos de tamaños. Veta Gruesa.

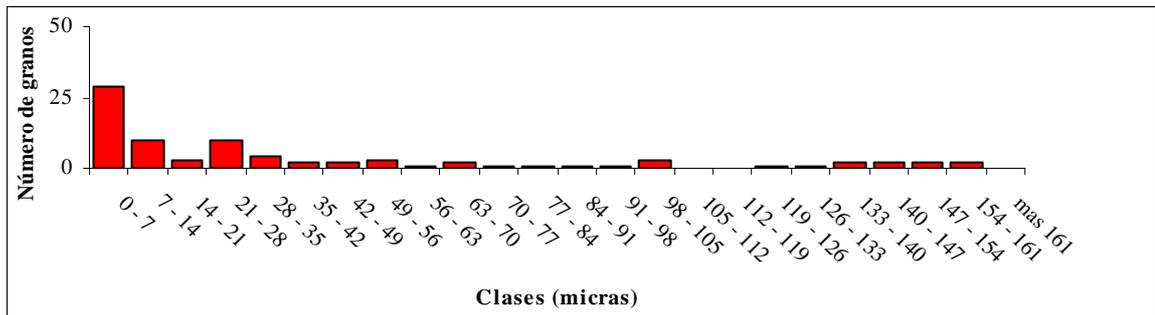


Figura 97. Frecuencia de granos de oro clasificados por rangos de tamaños. Veta Bruja.

○ Áreas y contenidos

El área de los granos individuales de oro analizados (ADI) es la observada estricta y directamente en la superficie, lo que supone una profundidad de detección nula. Sobre la hipótesis de que $\%A \approx \%V$ (Russ, 1990), se calculó la contribución teórica de cada granulométrica (anchura) al contenido en oro referido a 1 tonelada de material del filón en estudio.

Esta contribución se expresa en fracciones granulométricas que se representan en los histogramas (Figura 98 y Figura 99), referidos también al % de área representado por cada fracción granulométrica de oro (eje a la izquierda).

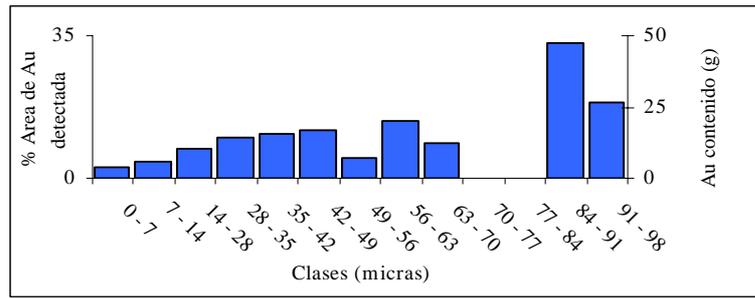


Figura 98. Contribución del contenido de oro referido a 1 t. de material. Veta Gruesa.

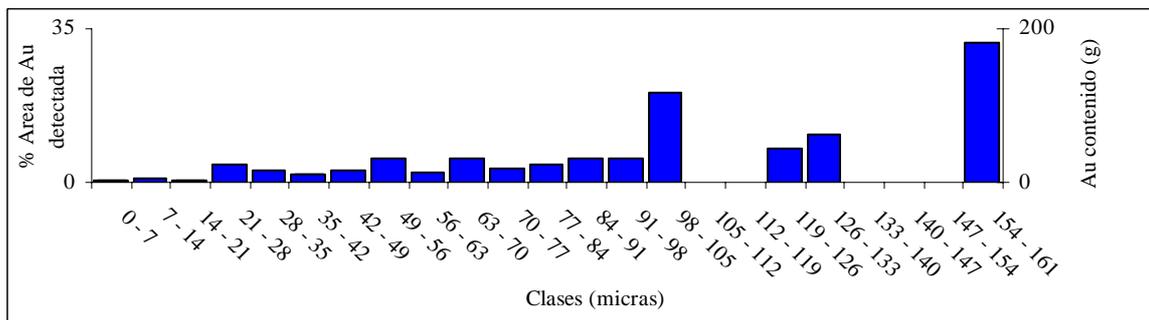


Figura 99. Contribución del contenido de oro referido a 1 t. de material. Veta Bruja.

Como valoración crítica del método (Castroviejo, *et al.*, 1999 a y b), se comparan los valores de contenidos totales de Au calculados por ADI a partir del Microscopio Óptico de reflexión (**MOP**), con los obtenidos por análisis químico (**AQ**) (Tabla 13). Las diferencias principales se deben al contenido de Ag en el oro nativo, que no es detectable ópticamente, pero sí ha sido cualitativamente confirmado por MEB (oro nativo/*electrum*).

Como el cálculo por análisis de imagen parte del supuesto de que la fase visible al microscopio como oro nativo segmentada como tal, se compone al 100 % de Au, el contenido de éste aparece sobrevalorado, incluso con respecto a la suma Au + Ag, debido a la mayor densidad del oro (19.32 g/cm³), frente a la plata (10.5 g/cm³). Pero si se corrige esta diferencia de densidades, pueden obtenerse aproximaciones razonables: así, en el caso de V. Bruja, resultaría para el contenido AQ un valor de: $318 + 180 * (19.32:10.5) = 649$ ppm, muy próximo al obtenido (en realidad, habría de descontarse de esta suma la Ag presente en otras fases minerales).

Método de Determinación	MOP	AQ		
		Au	Ag	Au + Ag
	Oro Nativo/ <i>electrum</i>			
Veta Bruja	685	318	180	498
Veta Gruesa	230	44	151	195

Tabla 13. Contenido total (ppm) de metales preciosos (Au/Ag). (MOP) y (AQ).

o Morfología

La coherencia de las medidas de parámetros morfológicos de los granos de Au ha sido evaluada por medio de la comparación de los parámetros anchura, longitud y diámetro equivalente de un número representativos de granos de oro de las dos vetas en conjunto. La buena correlación (por ejemplo: Figura 100) prueba la validez del método.

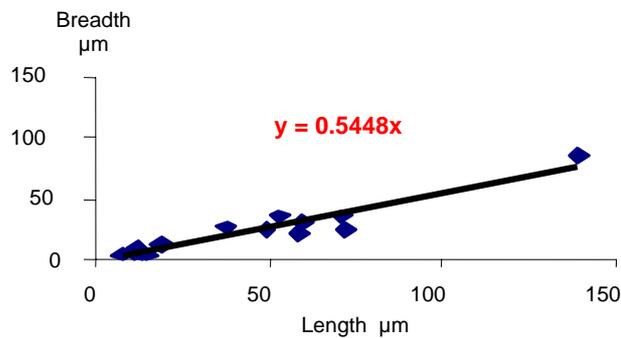


Figura 100. Correlación anchura-diámetro para granos de Au en V. Gruesa y Bruja.

IV.7.1.3 Aplicación al proceso mineralúrgico

En todo proceso mineralúrgico es fundamental poder conocer los tamaños de grano del mineral a separar, su distribución y asociaciones para poder determinar el tamaño de molienda más adecuado para dicha mena. De este modo se garantizaría un grado de liberación óptimo, ni demasiado bajo, lo que llevaría a pérdidas del mineral en los estériles, ni demasiado alto, que implicaría a un costo mayor de molienda y que probablemente también originaría ultrafinos que darían problemas de recuperación.

En la concentración gravimétrica, en la que el parámetro fundamental es la densidad, se puede apreciar muy bien la influencia del tamaño de grano y su distribución. Como se observa en la Figura 98 de la Veta Gruesa, el tamaño mayor de grano de oro o aleación aurífera es de 91 micrómetros y entre 77 y 91 μm hay aproximadamente un 29% del oro. El 55% del oro restante está en tamaños inferiores a 70 micrómetros. En la mena de la Veta La Bruja (Figura 99), el tamaño mayor de oro es de 161 μm y entre 154 y 161 se encuentra aproximadamente un 26% del oro, después hay un salto hasta 140 μm sin representación de oro. En su conjunto, aproximadamente un 71% del oro se encuentra en tamaños superiores a 77 μm y solo un 29% por debajo de esa dimensión.

Considerando la influencia que tiene en la densidad de un grano mixto de cuarzo-oro el tamaño de la inclusión de oro (densidad 19,3 g/cm³) para los tamaños de oro mayores, que son los de 161 μm de la veta la Bruja, resultan los datos de la Tabla 14.

Tamaño grano mm	Tamaño inclusión oro mm	Densidad media del grano g/cm ³
2	0,161	2,66
1	0,161	2,72
0,5	0,161	3,20
0,25	0,161	7,09

Tabla 14. Densidad media de los granos mixtos de cuarzo-oro según el tamaño del grano para partículas de oro de 0,161 mm.

Si se considerara que realmente el oro es *electrum* (como sucede en muchos granos) la densidad media bajaría algo pero no demasiado. Concretamente de los análisis realizados por microsonda electrónica se deduce que este mineral tiene aproximadamente un 20% de plata, como promedio, con lo que la densidad de éste sería de 16,5 g/cm³, y así por ejemplo para el caso de granos de 0,5 mm sería de 3,11 g/cm³ en vez de los 3,20 g/cm³ y para granos de 0,25 mm sería de 6,35 g/cm³ en vez de 7,09 g/cm³.

En la concentración gravimétrica y para el caso de las mesas de sacudidas hidráulicas, que son el artificio más utilizado para estas separaciones a los tamaños considerados, rige el criterio de Taggart (1945) o “criterio de concentración” (Wills, 1988). Este criterio se basa en la relación $(d_{\text{pesado}}-1)/(d_{\text{ligero}}-1)$, donde d_{pesado} es la densidad del grano pesado a separar y d_{ligero} la de los granos de la ganga. Esta relación debe ser superior a 1,25 para que la concentración sea posible a tamaños gruesos que son los más favorables (aprox. 2 mm), teniendo en cuenta que para un caso ideal el cuarzo sería el material ligero con 2,65 de densidad y entonces la densidad mínima del grano pesado debe ser 3,06.

Por tanto, en el caso más favorable de la Veta Bruja, los granos mayores deben ser como mucho de 0,5 mm según puede verse en la Tabla 14. Este tamaño de grano es ya un tamaño fino muy alejado de 2 mm y entonces el criterio Taggart debe valer al menos 1,75 con lo que la densidad mínima debe ser alrededor de 3,88, lo que conduce a un tamaño de grano de 0,25 mm, por lo que se debe moler a unos 0,25 mm. Es interesante ver como varía la densidad media del grano (para este tamaño de 0,25) con el tamaño de una única inclusión de oro, ya que existe una gran dispersión en los tamaños y además en la Veta Gruesa los tamaños de oro son mucho más finos. Los datos se exponen en la Tabla 15.

Tamaño de grano	Tamaño inclusión oro	Densidad media del grano
mm	mm	g/cm ³
0,25	0,161	7,09
0,25	0,140	5,58
0,25	0,112	4,15
0,25	0,091	3,45
0,25	0,070	3,02
0,25	0,049	2,78
0,25	0,028	2,67
0,25	0,014	2,65

Tabla 15. Densidad media de los granos mixtos de cuarzo-oro según el tamaño de una única inclusión de oro, para granos de 0,25 mm.

Según se aprecia en la (Tabla 15), los únicos granos con ciertas posibilidades de ser concentrados son los mayores de aproximadamente 100 μm para este tamaño de grano.

La concentración se favorece por dos hechos diferentes que concurren en estas menas: uno es que al moler a 0,25 mm una parte importante del material queda en granos menores de este tamaño tal y como se aprecia en la Figura 101. En ella se representa la curva granulométrica de esta molienda para la Veta Bruja, y se observa cómo la densidad media de los granos más pequeños aumenta para el mismo tamaño de inclusión aurífera. Así, en la molienda real llevada a cabo para los ensayos hay sólo un 4% aproximadamente de mena por encima de 0,25 mm y, en cambio, un 48% del peso está en granos menores de 0,125mm. Por otro lado, el oro a veces está englobado en materiales sulfurados densos de mayor tamaño que contribuyen a aumentar la densidad media del grano, aunque al separarse disminuirá la ley en oro de dicho concentrado

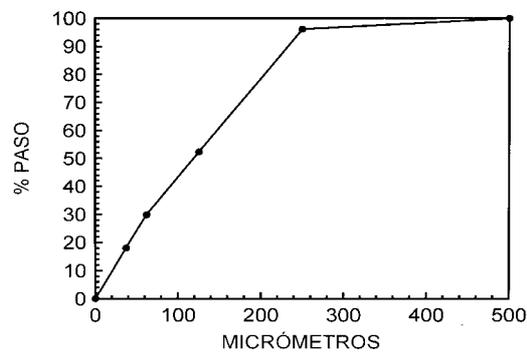


Figura 101. Curva granulométrica a molienda 0,25 mm de la Veta Bruja.

Por otra parte, en estas moliendas siempre se producen granos muy finos para los que el sistema de la mesa Wilfley es poco efectivo. Así, en esta molienda hay un 18% de granos menores de 37 μm . A la vista de este estudio se deduce que la molienda adecuada es de 0,25 mm y que la mena de la Veta Bruja, que es la que tiene mayores tamaños de grano del oro, ofrecerá mejores leyes de concentrado y menores pérdidas de oro, mientras que la Veta Gruesa dará menores leyes en oro y mayores pérdidas en los estériles.

Las pruebas se han llevado a cabo utilizando una mesa de sacudidas tipo Wilfley y siguiendo un diagrama de flujo sencillo para poner más claramente de manifiesto el comportamiento de la mena.

El diagrama de flujo se muestra en la Figura 102y consiste en una operación de desbaste para obtener un primer concentrado basto y unos estériles definitivos y un posterior relavado o retratamiento del concentrado obtenido para obtener un concentrado final que denominaremos primer concentrado y unos mixtos, que denominaremos segundo concentrado, ya que por su ley en oro se pueden considerar como concentrados para operaciones posteriores, como por ejemplo de amalgamación. Los resultados se muestran en la Tabla 16 para la veta Bruja y en la Tabla 17 para la Veta Gruesa.

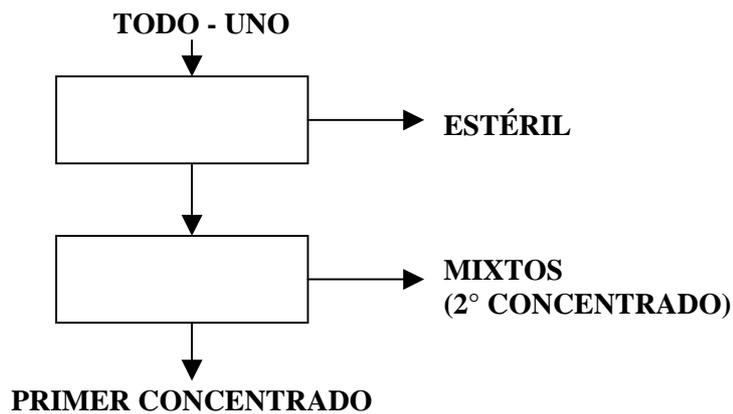


Figura 102. Diagrama de flujo seguido en la conc. gravimétrica en mesa tipo Wilfley.

Producto	% en peso	Ley en Au	Ley en Ag	% Recuper.	% Recuper.
		g/t	g/t	Au	Ag
1º conc.	0,07	88.885	25.877	23,22	9,71
2º conc.	28,23	683,2	368	71,98	55,67
Estéril	71,70	17,96	90,12	4,80	34,62
TOTAL	100	267,96	186,6	100	100

Tabla 16. Concentración en mesa Wilfley de mena de la veta Bruja, molida a 0,25 mm.

Producto	% en peso	Ley en Au g/t	Ley en Ag g/t	% Recuper.	
				Au	Ag
1º conc.	0,04	22.595	8.256	20,75	2,55
2º conc.	16,69	164	306	62,86	39,46
Estéril	83,27	8,57	90,12	16,39	57,99
TOTAL	100	43,55	129,42	100	100

Tabla 17. Concentración en mesa Wilfley de mena de la veta Gruesa, molida a 0,25mm.

En las Tabla 16 y Tabla 17 se comprueban las predicciones. En la Veta Bruja es posible obtener en el primer concentrado una ley en oro del 8,9% con una recuperación del 23,22%, que es aproximadamente la proporción de oro que en esta mena se encuentra en tamaños de alrededor de 0,161 mm, como se puede ver en la Figura 9, lo que prueba su buena liberación y concentración a esta molienda inferior a 0,25 mm, así como que su presencia en un grano de ganga le hace destacar claramente en cuanto a densidad, como se ha mostrado en la Tabla 15.

Las pérdidas en el estéril son solo del 4,8% del oro total contenido eliminándose el 71,7% en peso de la mena. Esto representa una ley en oro de 17,96 g/t, indicando que quedan granos mixtos de oro en el estéril con pequeña proporción de oro relativa dentro de dichos granos, de forma que su densidad no es suficiente para separarlos del estéril. Esta proporción del 4,8 % concuerda con la proporción de oro que está en tamaños menores de unos 30 μm y que, por lo tanto, no tienen influencia en la densidad promedio de la mayoría de los granos de ganga. El resto del oro que se encuentra en tamaños de grano intermedio influye lo suficiente en la densidad del grano portador como para no ir al estéril, pero no lo suficiente para destacarse claramente y quedan englobados en los mixtos, que hemos denominado segundo concentrado y donde va a parar el 71,98% del oro contenido y con una ley promedio de 683 g/t.

En el caso de la Veta Gruesa, debido al menor tamaño de sus partículas de oro, es de esperar que la influencia de éstas sobre la densidad media de los granos de

ganga sea menor y su resultado en la concentración también sea peor. Así sucede efectivamente y en el primer concentrado la recuperación del oro es del 20,75%, pero su ley es solo del 2,26% en comparación con el 8,9% de la Veta Bruja. Y esto a pesar de su menor contenido en sulfuros, que en el caso de la Veta Bruja se separan en el concentrado por su densidad cuando están liberados y tienden a diluir el oro. Ello es debido, fundamentalmente, a la falta de partículas de oro superiores a $91\mu\text{m}$ (Figura 98).

Donde más se nota la influencia de los menores tamaños de las partículas de oro es en el estéril definitivo a donde va a parar el 16,39% del oro con una ley de 8,57 g/t. Este porcentaje de pérdidas coincide bastante bien con la cantidad de oro presente en tamaños de partícula menores a unas $30\mu\text{m}$, como se puede deducir de la Figura 98. Como consecuencia de todo ello el segundo concentrado de esta mena también tiene una ley en oro inferior (164 g/t) y una menor recuperación (62,86% de oro).

La observación microscópica del concentrado de la Veta Bruja muestra que hay abundancia de granos de oro o mixtos de oro con sulfuros, siendo los minerales preponderantes los sulfuros y solo una pequeña proporción de granos de cuarzo. La presencia masiva de los sulfuros es lo que hace descender la ley en oro al 8,9%. En el concentrado de la Veta Gruesa se ve una menor abundancia de granos con oro, de los cuales, se ve mayor número de mixtos con sulfuros y algo más de cuarzo libre.

IV.7.2 Estudio por ADI de las menas de Cobre "El Roble". Colombia

IV.7.2.1 Introducción

La caracterización mineralógica mediante ADI de las menas cupríferas-auríferas, ha sido planteada como apoyo a los procesos de beneficio de cobre en esta mina. La investigación metalogenética de esta zona ha sido llevada a cabo por Franklin Ortiz (Universidad Nacional Sede de Medellín, Colombia), y ha servido como fuente en la descripción geológica y mineralógica del área de estudio.

El área de estudio y la mina propiamente dicha está localizada en el Departamento del Chocó, Noroccidente del país (Figura 103), a unos 4 kilómetros al norte del municipio del Carmen de Atrato. Según Ortiz (2002) el yacimiento en explotación en la mina El Roble es un depósito de sulfuros masivos de alto tenor de cobre y oro que se encuentra en la interfase rocas volcánicas y sedimentarias marinas Cretáceas de la Cordillera Occidental de Colombia. La mina El Roble produce concentrados de Cu-Au de alta ley mediante una pequeña explotación minera subterránea de 300 toneladas/día. Las reservas de mineral, combinadas entre probadas y probables, definidas en varios programas de exploración realizados por la Kennecott of Colombia, Nittetsu y Miner S.A. alcanzan 1.200.000 toneladas de mineral con contenidos promedios de 4.9% de Cu y 3.7 gramos/ton de Au.

El depósito de El Roble se encuentra dentro de rocas cretácicas del denominado Grupo Cañasgordas. La mineralización tiene lugar dentro de un cuerpo mayor, denominado cuerpo principal, y varios menores desmembrados, encajonada en *cherts* negros carbonosos en contacto con basaltos toleíticos subyacentes; todo el conjunto antes indicado está afectado por una amplia zona de cizalla que produce en las rocas volcánicas una marcada esquistosidad e intensa cloritización y en la unidad silíceas pliegues isoclinales métricos. Diques félsicos Terciarios intruyen el conjunto produciendo en los sulfuros masivos metamorfismo de contacto. Unos 4 km al sur de El Roble, se encuentra la mineralización de Santa Anita, una típica zona de enrejado,

dentro de la unidad volcánica, donde son abundantes venas rellenas de cuarzo, calcita y sulfuros.

El yacimiento de El Roble es interpretado como originado en una cuenca marina de características euxínicas, en la cual los sulfuros y las soluciones mineralizantes hidrotermales estuvieron asociadas a vulcanismo submarino. El depósito puede considerarse de origen volcánico-exhalativo mostrando características geológicas, geoquímicas y mineralógicas que se pueden asimilar a la de los depósitos ofiolíticos del "Tipo Chipre".

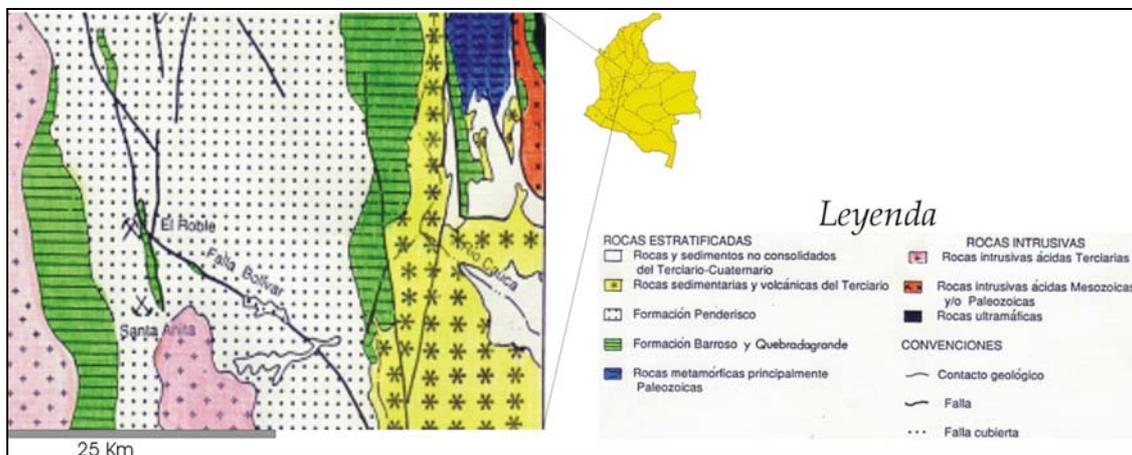


Figura 103. Ubicación geológica de la mina El Roble (mod. Ortiz, 2002)

IV.7.2.2 Mineralogía de la Mina El Roble.

El rasgo composicional más importante es que la mena es un agregado compacto de pirita y calcopirita como los sulfuros más dominantes. Se presentan menores cantidades de pirrotina, especialmente hacia los niveles inferiores del cuerpo principal, y algo de esfalerita. Esta última es visible con más facilidad bajo el microscopio. Muy rara es la ocurrencia de marcasita en el cuerpo masivo. Oro libre se encuentra en partículas muy finas asociado a los sulfuros. Importantes minerales de ganga son silicatados (cuarzo, *chert*) y en menos cantidad calcita, dolomita en contenidos muy bajos, y mucho menos abundante hematita y magnetita que eventualmente son abundantes. En una muestra se ha detectado la presencia esporádica de linneita como inclusiones en calcopirita.

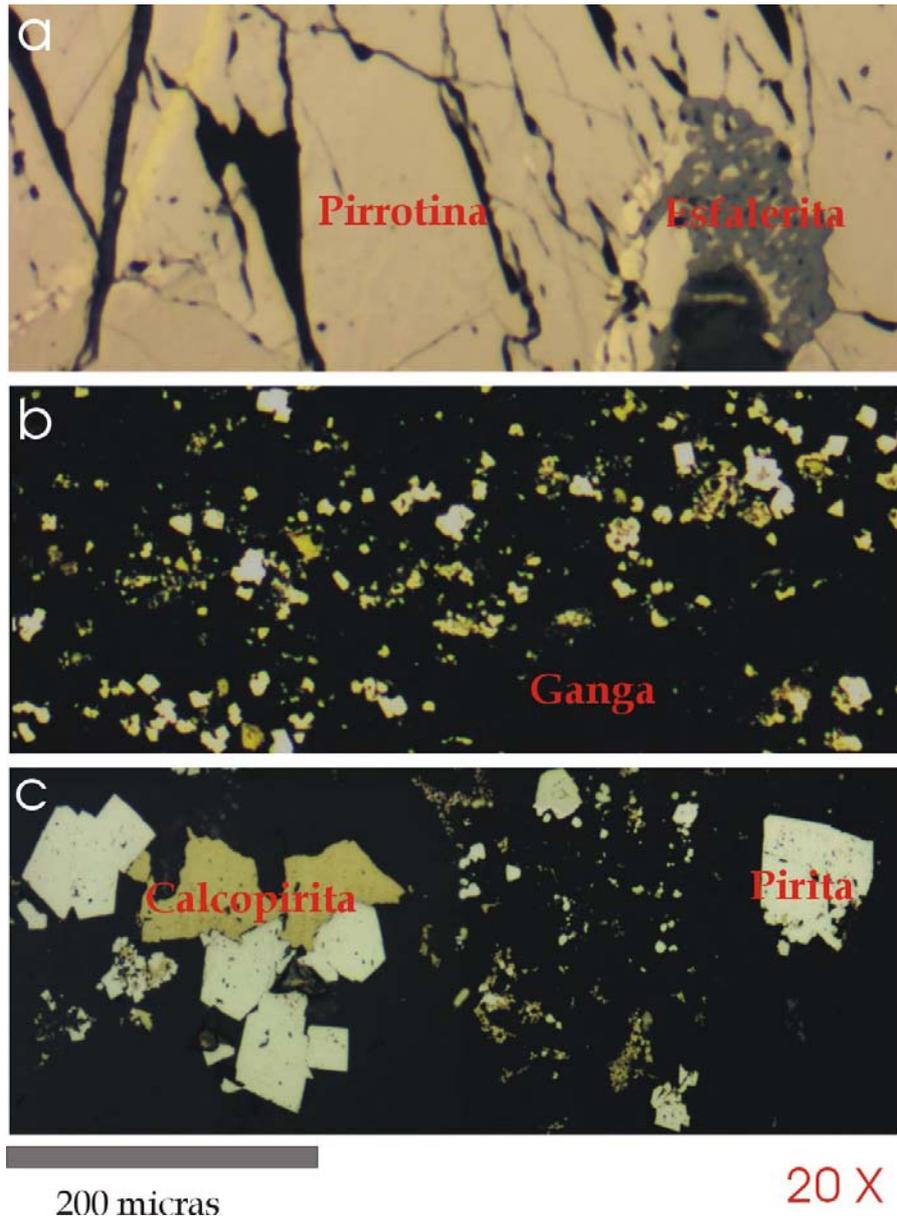


Figura 104. Imágenes con mineralogía típica. Mina El Roble. Obj. 20 X.

IV.7.2.3 Estudio por ADI

La metodología seguida en este trabajo (puesta a punto del equipo, digitalización / captura de imagen, tratamiento, segmentación y proceso matemático) es la descrita anteriormente. El estudio se ha enfocado a estudiar las fases minerales presentes en las seis probetas de este yacimiento a nuestra disposición. Los minerales son: Pirita, Calcopirita, Pirrotina, Esfalerita, Carbonatos, Magnetita y Oro.

➤ Parámetros determinados

El trabajo debe abordar la cuantificación de la abundancia (área total) de las fases minerales en las probetas con una granulometría superior a la que pueden ser identificada trabajando con imágenes adquiridas con objetivo 20 X ($>200\ \mu\text{m}$). Este es el caso de las seis probetas a nuestra disposición. Los problemas de representatividad de las medidas a escala de muestra (probeta pulida) se pueden descartar, puesto que se ha estudiado siempre la superficie entera de cada sección. Para esta cuantificación no se han generado mosaicos con las imágenes adquiridas y cada imagen ha sido caracterizada de forma individual.

En las probetas con granulometría menor a $200\ \mu\text{m}$ (MER 3), se aplicará un estudio granulométrico mediante la medición de los siguientes parámetros: número de granos, área individual de los granos, anchura "*breadth*", longitud "*length*" de la totalidad de granos de calcopirita y pirita visible en las imágenes estudiadas. Además, se determinará el grado de asociación mineral de los granos de calcopirita. Para este caso, se presentarán los porcentajes de granos de calcopirita en pirita (calcopirita incluida en pirita), calcopirita con pirita (pirita y calcopirita en contacto) y pirita en estado libre (en ganga u otros sulfuros). En este estudio, las imágenes digitales se obtendrán a través de una malla de muestreo con un objetivo 20 X.

En las probetas con una granulometría con dos tipos de poblaciones ($>200\ \mu\text{m}$ y $<200\ \mu\text{m}$), se realizará un estudio granulométrico a partir de un mosaico de 48 obtenidas con objetivo 20 X. (Lámina 1). En general, los resultados que se obtengan se considerarán únicamente orientativos a la escala en la que se ha trabajado.

○ Áreas Totales de fases minerales

El área de cada una de las fases minerales presentes (análisis modal) en las probetas estudiadas (MER 1, MER 3, MER 18 A, MER 22, MER 23 y EL Roble) se ha calculado tomando en cuenta la ganga. Los resultados se presentan en los siguientes gráficos (Figura 105, Figura 106, Figura 107, Figura 108, Figura 109 y Figura 110).

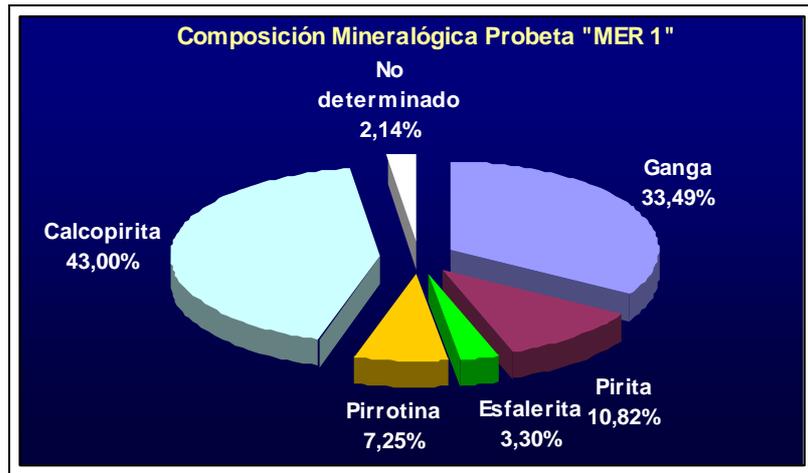


Figura 105. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta MER 1).

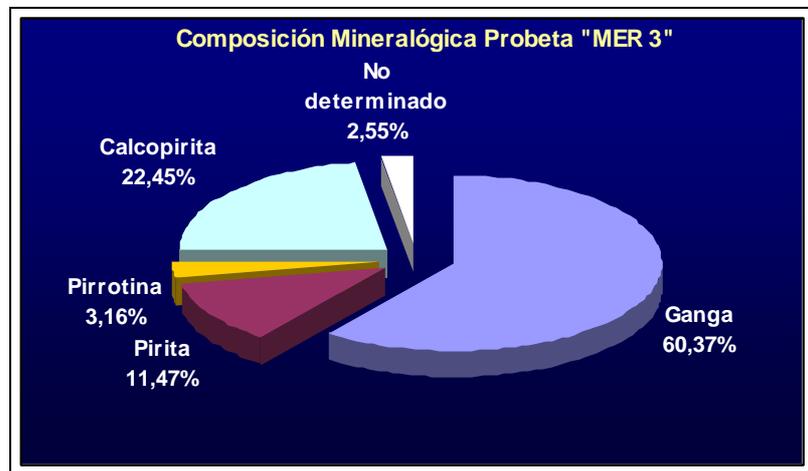


Figura 106. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta MER 3).

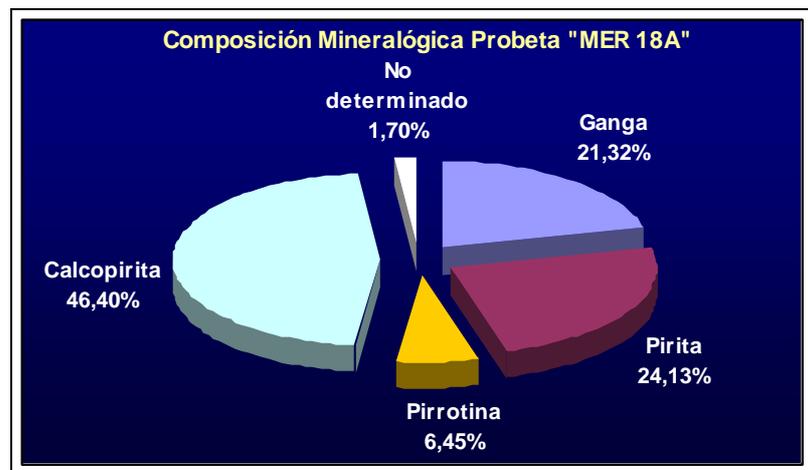


Figura 107. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta MER 18A).



Figura 108. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta MER 22).

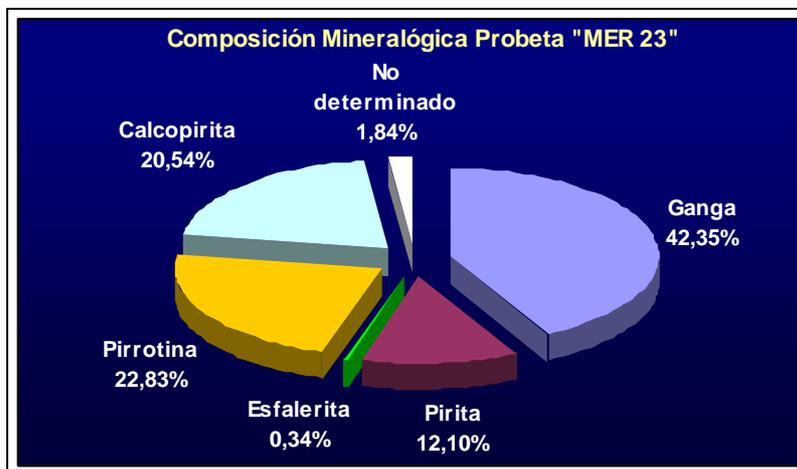


Figura 109. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta MER 23).

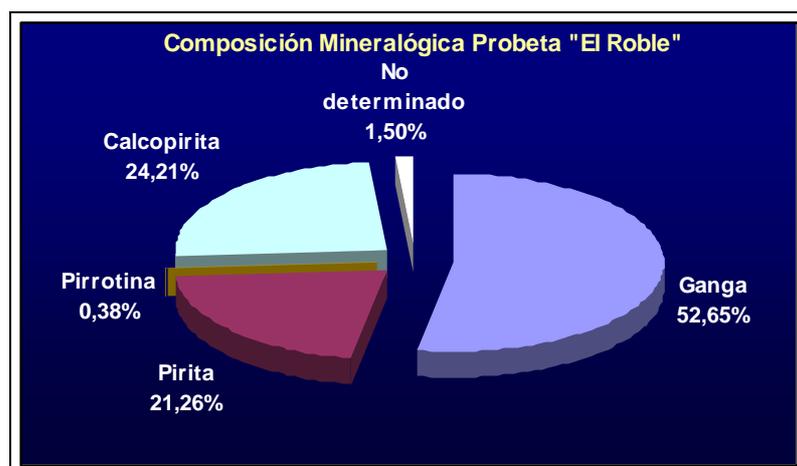


Figura 110. Composición mineralógica del todo uno por ADI (Probeta El Roble).

La pirita es uno de los sulfuros más abundante en la mena. El examen sistemático de numerosas muestras analizadas con microscopio de luz reflejada revelan la ocurrencia de granos individuales de pirita esférica y subesférica con tamaños 0.4 a 0,1 milímetros.

La Calcopirita es el otro mineral más abundante en el yacimiento (39% de promedio en las seis probetas estudiadas). El mineral encontrado mayoritariamente es una calcopirita isométrica con un tamaño de cristales entre 0,5 a 0,1 milímetros.

Debido al tamaño de grano de la pirita y calcopirita en las seis probetas estudiadas, solo ha sido aplicado el ADI para medir la abundancia de estas fases (análisis modal).

La esfalerita y la pirrotina son otros sulfuros presentes en las probetas estudiadas. En el caso de la esfalerita (solo presente en tres probetas estudiadas), ésta se presenta en cantidades no significativas (como accesorio: < 5%). El mineral aparece en granos muy finos, de tan sólo 0.05 milímetros de diámetro, como agregados alotriomórficos y en texturas concéntricas intercrecido con pirita y calcopirita. La pirrotina aparece en relaciones texturales interesantes, reemplazando e intercreciendo principalmente a la pirita. Su abundancia media es de aproximadamente 6,5% en las seis probetas estudiadas.

La aplicación del ADI en la identificación de los minerales presentes en la seis probetas estudiadas, ha dejado aproximadamente 2,8% del área de las imágenes caracterizadas sin segmentar debido a la fiabilidad propia de los rangos de segmentación utilizados (aprox. 95%).

Finalmente, es importante mencionar que en el cálculo de áreas de las fases minerales presentes en las imágenes digitales de las probetas estudiadas, la utilización de un objetivo 20 X impide que granos menores a 2 μm sean considerados en el análisis (ver resolución óptica).

- Número, Tamaño , Área y Asociación de los granos minerales.

La cuantificación del número de granos, el diámetro de malla y el área individual de los granos de pirita y calcopirita presentes en las probeta MER 3 se presentan a través de gráficos de distribución de número y área de los granos por rangos de tamaño (Figura 111 y Figura 112).

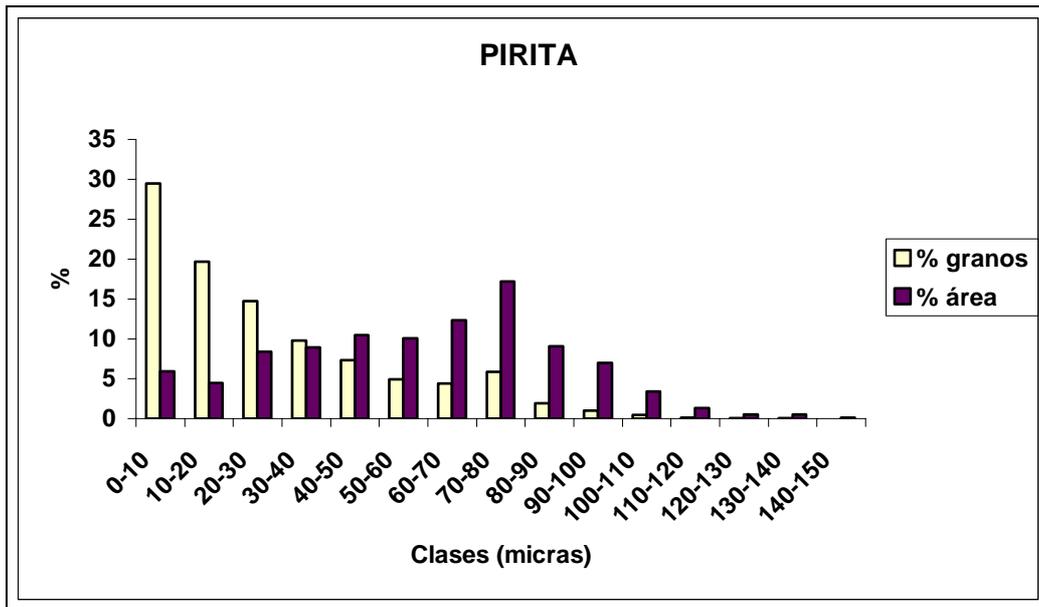


Figura 111. Número y área de granos de pirita según rangos de tamaño (Probeta MER 3).

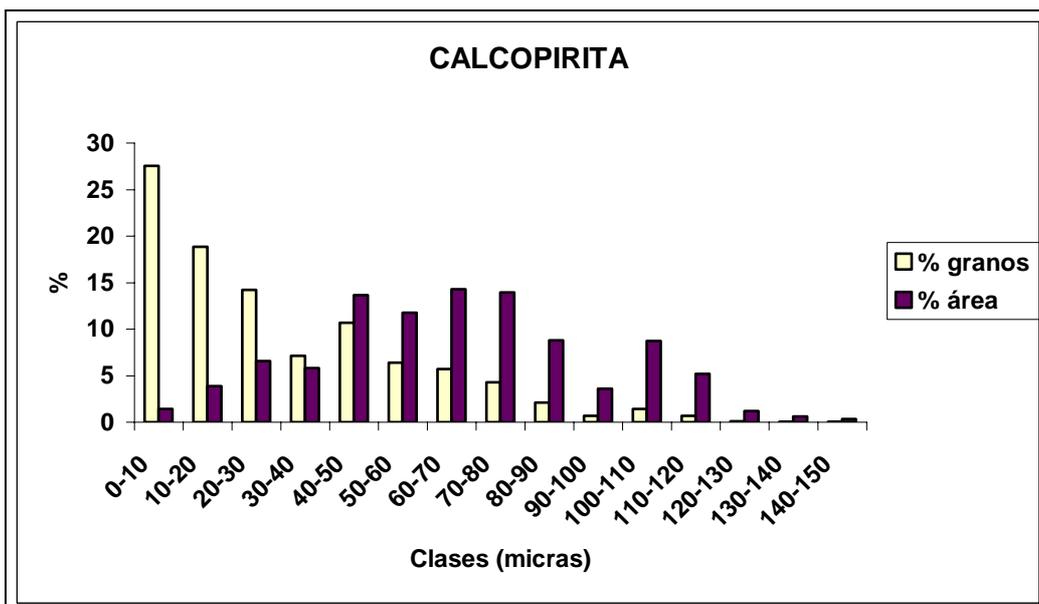


Figura 112. Número y área de granos de pirita según rangos de tamaño (Probeta MER 3).

De la observación de los gráficos anteriores se concluye que existen una gran concentración de granos de pirita y calcopirita en las clases que representan los menores tamaño de grano (diámetro de malla en micras).

En el caso de las áreas de los granos de pirita y calcopirita, según los rangos de tamaño utilizados como clases, se observa que el aporte en área de los finos ($< 40 \mu\text{m}$) en el caso de la calcopirita llega al 18% del área total de esta fase y en el caso de la pirita al 28%.

Además, para determinar el tamaño óptimo de la molienda a aplicar durante el proceso de concentración y recuperación, es importante conocer la asociación mineralógica de los granos de calcopirita (mena) y pirita (condicionante en la recuperación). Los resultados obtenidos (Figura 113) representan la relación del número de granos (% granos) de calcopirita con la pirita y resto de fases presentes.

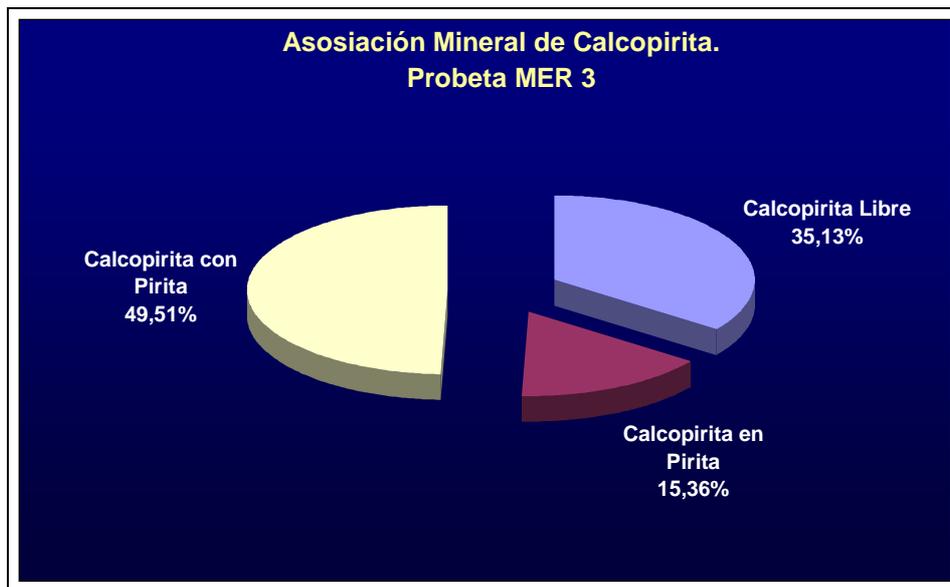


Figura 113. Asociación mineral de Pirita y Calcopirita (Probeta MER 3).

De la Figura 113 se deduce que aproximadamente el 49,51% de los granos de calcopirita se encuentran en contacto con los de pirita. Asimismo, el 15,36% está totalmente incluido en la pirita.

- Número y Área de Calcopirita incluida en Pirita

Otros tipos de análisis con posibilidad de realizarse son: cuantificación por ADI del número de granos y área individual de los granos de calcopirita incluidos en pirita, únicamente. Para estas aplicaciones se ha seleccionado la probeta “El Roble”, que presenta unos tamaños de grano entre ≈ 240 micras y ≈ 5 micras (determinados por observación al microscopio). Los resultados obtenidos tras aplicar las medidas sobre un mosaico de imágenes de 48 imágenes (Lámina 6) son los siguientes (Figura 114 y Figura 115):

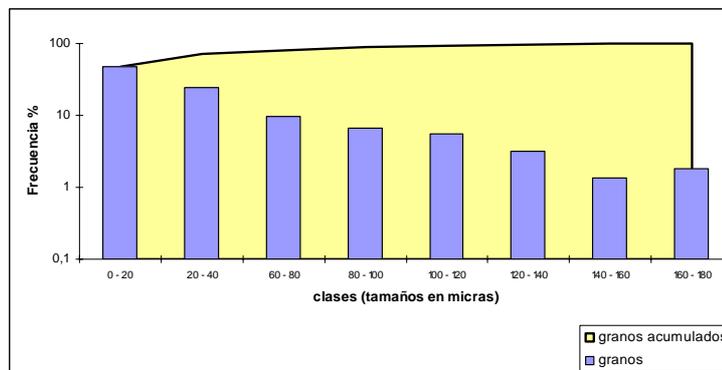


Figura 114. Número de granos de calcopirita (incluida en pirita) según rangos de tamaño

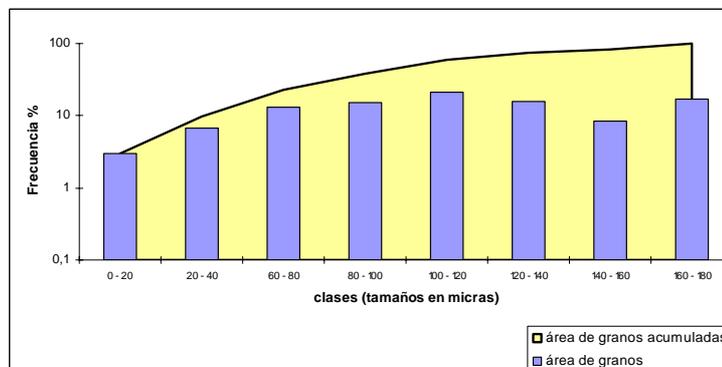


Figura 115. Área de granos de calcopirita (incluida en pirita) según rangos de tamaño.

El resultado obtenido nos presenta que el área de los granos de calcopirita incluidos en pirita, con tamaño menor a 20 micras, representa un 2.6 % del área total de este mineral, en esta situación.

Lámina 6. Mosaico con imágenes de la Probeta “El Roble”

IV.7.3 Granulometría y Morfometría del Platino

IV.7.3.1 Introducción

La presente aplicación tiene como fin caracterizar de forma individual los granos de platino presentes en dos probetas pulidas (PROBETA: Pt-2. Platino Nizhne - Taguilsk, Urales) y PROBETA: Os-1. Platino-Osmio, Nizhne - Taguilsk Perm Province, Ural Russia). En particular, se abordará el cálculo de las medidas granulométricas y morfométricas de la totalidad de partículas de Platino y Osmio presentes en las muestras de estudio. En el caso de la probeta Os-1 no se diferenciará, mediante ADI, entre el Osmio y el Platino presentes por la similitud de sus parámetros de reflectancia (NG). Aunque utilizando luz polarizada es posible distinguirlas por su Anisotropismo empleando técnicas microscópicas tradicionales.

La adquisición de las imágenes minerales se ha realizado mediante un muestreo completo de las zonas donde aparece la mineralización de interés. Para esto se ha utilizado el objetivo de 10 X del microscopio. A continuación se presenta la mineralización estudiada (Figura 116).

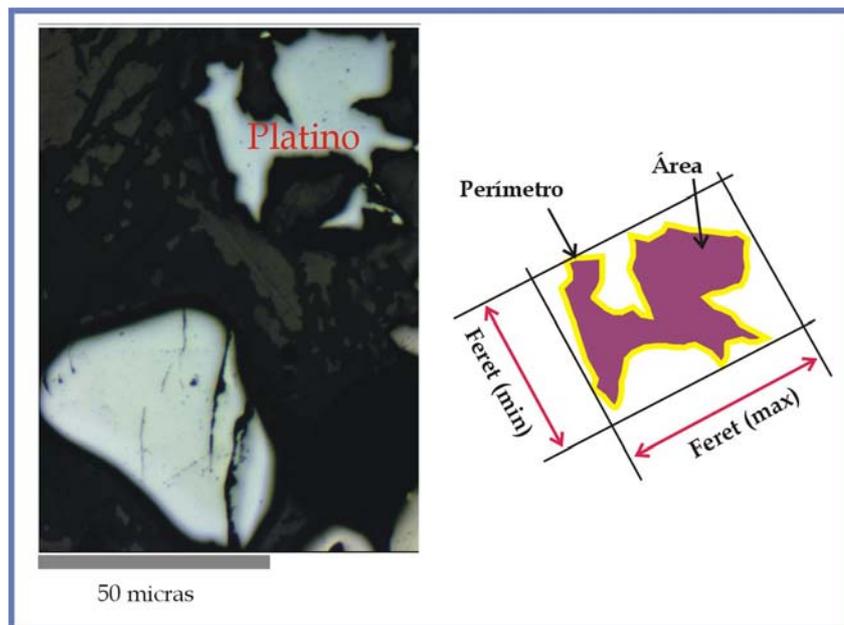


Figura 116. Mineralización y parámetros a determinar mediante ADI (Probeta Pt 2).

IV.7.3.2 Caracterización mediante ADI

Realizada la segmentación de los granos de Platino, han sido seleccionados los siguientes parámetros para su cuantificación (Figura 116):

Área , Perímetro, Feret (mínimo) y Feret (máximo)

Con estos datos se elaborarán los siguientes curvas granulométricas:

Numero de partículas por clase de tamaño (Feret (mínimo))

Área de partículas por clase de tamaño (Feret (mínimo))

Además, se calcularán los siguientes parámetros morfológicos:

$$\text{Redondez} = (\text{Perímetro})^2 / 4 * \text{Pi} * \text{Área}$$

$$\text{Aplastamiento} = \text{Feret (mínimo)} / \text{Feret (máximo)}$$

Los resultados obtenidos para cada uno de los granos de platino estudiados por ADI se presentan a continuación (Tabla 18 y Tabla 19).

Objeto	Area	Perímetro	Feret (min)	Feret (max)	Redondez	Aplast.
1	6115,02	349,00	61,17	132,25	1,59	0,46
2	46158,30	1377,76	216,20	399,39	3,27	0,54
3	51718,54	1496,11	266,72	445,30	3,44	0,60
4	344,39	76,99	14,41	31,08	1,37	0,46
5	5570,40	344,74	69,94	131,20	1,70	0,53
6	9276,60	481,78	78,54	199,12	1,99	0,39
7	62129,55	2119,90	325,17	634,23	5,76	0,51
8	536607,31	6234,69	890,79	1180,39	5,76	0,75
9	16500,43	546,56	135,24	186,73	1,44	0,72
10	5763,11	318,12	81,60	112,62	1,40	0,72
11	9748,58	608,79	75,53	230,45	3,03	0,33
12	9290,15	578,32	86,79	211,43	2,86	0,41
13	3309,50	265,86	65,50	89,13	1,70	0,73
14	6683,35	429,14	60,37	153,57	2,19	0,39
15	5897,47	350,31	83,06	116,09	1,66	0,72
16	2527,01	317,22	35,57	132,31	3,17	0,27
17	61413,68	1189,78	235,95	399,54	1,83	0,59
18	98721,44	2469,18	349,47	593,16	4,91	0,59
19	100797,16	1922,19	283,56	554,90	2,92	0,51
20	23164,59	1269,44	188,32	346,40	5,54	0,54
21	368,10	81,86	13,81	33,18	1,45	0,42
22	446,01	105,21	14,72	44,17	1,98	0,33
23	217822,64	3386,38	540,69	894,05	4,19	0,60
24	2802,89	311,85	56,89	109,82	2,76	0,52
25	3534,19	262,95	62,90	94,10	1,56	0,67
26	52703,15	1234,74	262,96	315,24	2,30	0,83
27	301767,84	2807,93	583,00	879,76	2,08	0,66
28	3063,72	242,39	49,70	85,71	1,53	0,58

Tabla 18. Parámetros de cada grano de Platino (Probeta Pt – 2).

Objeto	Area	Perímetro	Feret (min)	Feret (max)	Redondez	Aplast.
1	2969,63	283,22	52,84	70,98	2,15	0,74
2	25417,97	1112,52	125,05	212,04	3,87	0,59
3	14696,45	883,77	78,88	227,23	4,23	0,35
4	374,12	93,12	18,55	21,29	1,84	0,87
5	6120,67	553,82	99,51	79,12	3,99	1,26
6	43801,05	1455,83	167,50	280,84	3,85	0,60
7	49161,43	989,95	205,45	194,06	1,59	1,06
8	8451,58	520,01	52,33	140,25	2,55	0,37
9	67,37	29,62	8,29	6,12	1,04	1,35
10	66,24	29,62	7,37	6,30	1,05	1,17
11	1212,32	179,06	25,37	49,54	2,10	0,51
12	22,21	22,83	3,32	6,11	1,87	0,54
13	84,31	56,02	3,07	16,17	2,96	0,19
14	16915,96	1286,27	128,43	165,67	7,78	0,78
15	37649,52	1926,34	228,75	199,74	7,84	1,15
16	8772,25	723,98	68,48	142,85	4,75	0,48
17	16922,35	684,93	83,01	158,69	2,21	0,52
18	51,56	51,52	5,65	13,19	4,10	0,43
19	17613,01	763,35	96,93	173,20	2,63	0,56
20	9253,26	568,93	66,29	123,00	2,78	0,54
21	54782,26	1142,13	218,04	203,01	1,89	1,07
22	89146,38	1455,35	279,91	273,67	1,89	1,02
23	12815,69	763,87	109,90	131,41	3,62	0,84
24	59,84	32,79	6,13	7,74	1,43	0,79
25	15665,25	530,67	119,24	112,14	1,43	1,06
26	62062,55	1095,83	265,87	220,96	1,54	1,20
27	4116,83	303,19	47,28	74,97	1,78	0,63
28	11411,80	604,43	107,58	117,81	2,55	0,91
29	127681,13	2734,64	415,36	343,13	4,66	1,21
30	127342,02	1602,73	380,47	288,43	1,61	1,32
31	194,21	61,40	13,79	13,62	1,54	1,01
32	16332,94	551,72	125,95	124,14	1,48	1,01
33	758,40	233,12	12,88	67,67	5,70	0,19
34	6331,44	406,24	79,75	76,54	2,07	1,04
35	23438,22	1090,33	75,72	290,49	4,04	0,26
36	173213,52	2574,17	418,40	382,45	3,04	1,09
37	1438,14	180,22	34,36	44,03	1,80	0,78
38	30187,44	719,44	193,22	142,27	1,36	1,36
39	10163,35	468,91	102,14	105,19	1,72	0,97
40	92167,19	1605,52	355,17	276,10	2,23	1,29
41	12758,48	672,25	114,41	107,76	2,82	1,06
42	78005,57	1385,41	311,03	247,00	1,96	1,26
43	21228,50	788,94	117,79	315,95	2,33	0,37
44	20742,22	714,39	149,44	213,03	1,96	0,70
45	7121,46	420,76	56,25	177,70	1,98	0,32
46	100278,52	1382,97	303,07	515,15	1,52	0,59
47	83626,41	1468,92	261,65	467,73	2,05	0,56
48	48002,56	1072,29	222,51	389,09	1,91	0,57
49	36,13	24,63	3,68	10,11	1,34	0,36
50	48,55	31,78	4,58	13,11	1,66	0,35
51	62175,46	1006,96	254,72	324,44	1,30	0,79
52	94420,94	2897,26	357,46	431,00	7,07	0,83
53	2827,73	271,61	54,69	81,23	2,08	0,67
54	33,50	26,30	4,69	10,44	1,64	0,45
55	2875,16	441,47	32,07	176,80	5,39	0,18
56	586,02	169,92	27,23	53,79	3,92	0,51
57	47,05	24,57	6,07	8,54	1,02	0,71
58	38,39	23,70	4,34	9,70	1,16	0,45
59	46,29	30,64	3,91	13,17	1,61	0,30
60	206,63	70,16	10,41	27,74	1,90	0,38
61	18858,82	806,50	130,72	235,00	2,74	0,56
62	1791,94	282,44	41,54	78,51	3,54	0,53
63	65,49	39,29	5,31	15,76	1,88	0,34
64	149,42	52,01	11,28	17,91	1,44	0,63

Tabla 19. Parámetros de cada grano de Platino (Probeta Os – 1).

De las curvas de distribución acumulada (frecuencia relativa representada en escala logarítmica) del número de granos y áreas por rangos de tamaño (Figura 117 y Figura 118), se observa una amplia concentración de granos de Platino en rangos de tamaño menores de 100 μm .

En el caso de la Probeta Pt-2, la contribución en área de los granos correspondientes a la clase (0 - 100 μm) es 8% del área total. En la Probeta Os-1, el área de los granos correspondientes a la clase (0 - 100 μm) es de 1,75%.

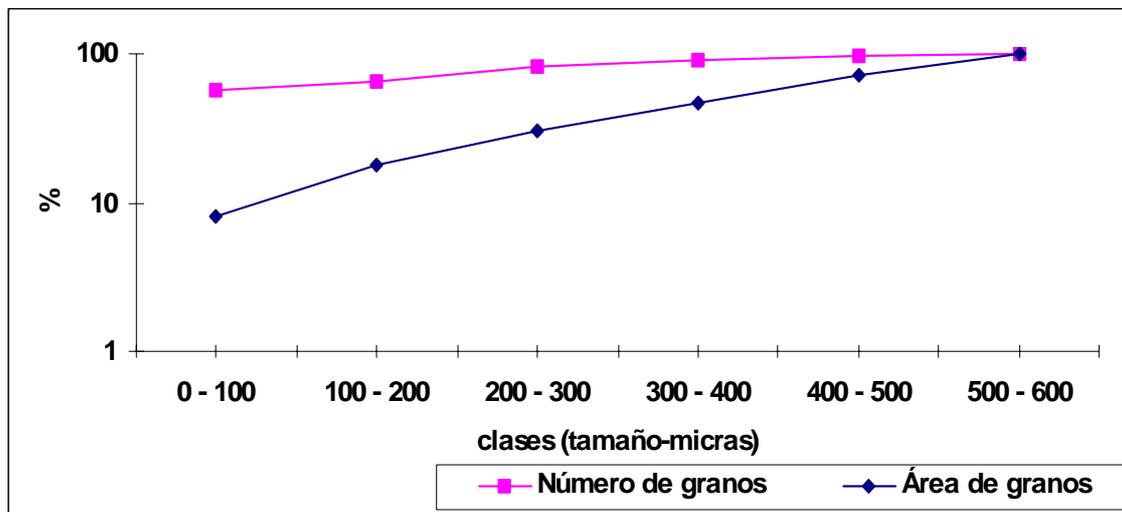


Figura 117. Distribución del número de granos y su área según rangos de tamaños. Pt-2.

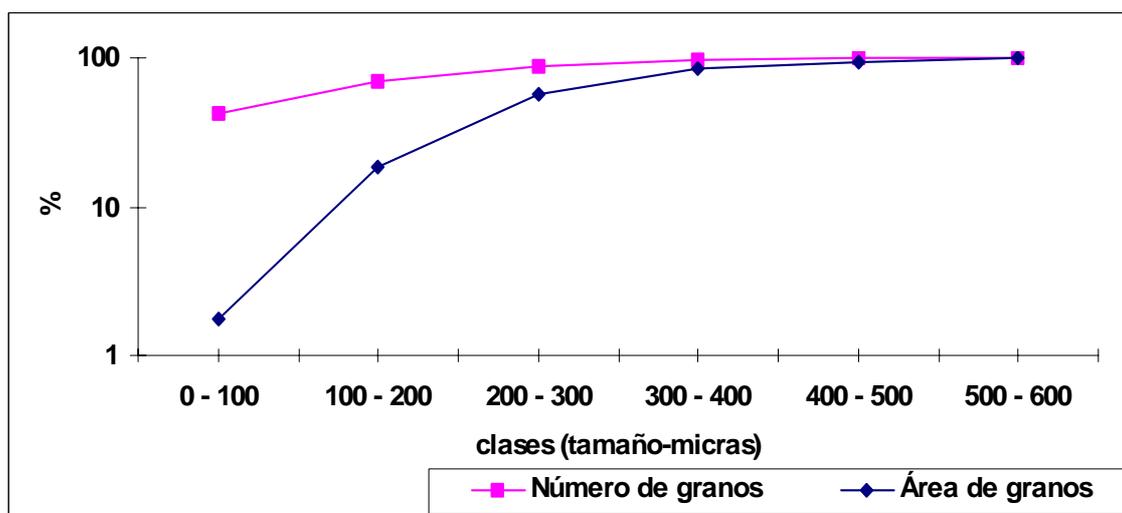


Figura 118. Distribución del número de granos y su área según rangos de tamaños. Os-1.

Con los datos presentados como tablas (Tabla 18 y Tabla 19) y curvas de distribución (Figura 117 y Figura 118), el mineralurgista está en disposición de elegir el tamaño óptimo de la molienda a partir de un estudio económico en el que se valore el coste de disminuir el tamaño de la molienda para recuperar el mineral más fino y el beneficio que le supondría esto.

En el caso de la probeta Pt - 1 estudiada, si se optara por utilizar como valor de corte 100 μm , la pérdida sería de un 8% de mineral mientras que, en el segundo caso, la pérdida alcanzaría un 1,7% del mineral.

En lo que se refiere a los parámetros morfológicos, para los granos de platino de las dos probetas estudiadas, el parámetro de redondez presentan unos valores que indican el carácter irregular de los granos de platino (valores superiores a 1, que representa el valor de máxima redondez). Esta misma característica de los granos se ve reflejada también en los valores de aplastamiento definidos para cada grano.

Aunque no es el objetivo de esta investigación, cabe señalar que es posible calcular otros parámetros de forma y angulosidad (integrados dentro de la morfología matemática) de los granos a partir de la identificación de las fases minerales mediante ADI. En todo caso, para poder alcanzar un conocimiento más amplio de la morfología de los granos, se podría recurrir a los principios de morfología matemática.

IV.7.4 Composición modal de la Marmatita (Mena Marmato)

IV.7.4.1 Introducción

La presente aplicación tiene como objetivo intentar explicar la diferencia existente entre el contenido de Fe teórico presente en una marmatita (variedad de blenda con Fe, entre 10 % y 26 %) y el contenido real determinado en muestras de este mineral procedentes del “*locus typicus*”, a fin de responder a la pregunta de si el mineral estaba correctamente definido en origen (9 % de Fe, determinado por Microsonda Electrónica). Para este estudio se han empleado dos probetas pulidas (Marmato 19 y Marmato 7) de la Mina de Marmato, Colombia. Un ejemplo de la apariencia de la marmatita estudiada y sus inclusiones (pirrotina, calcopirita, galena) se presenta a continuación (Figura 119).

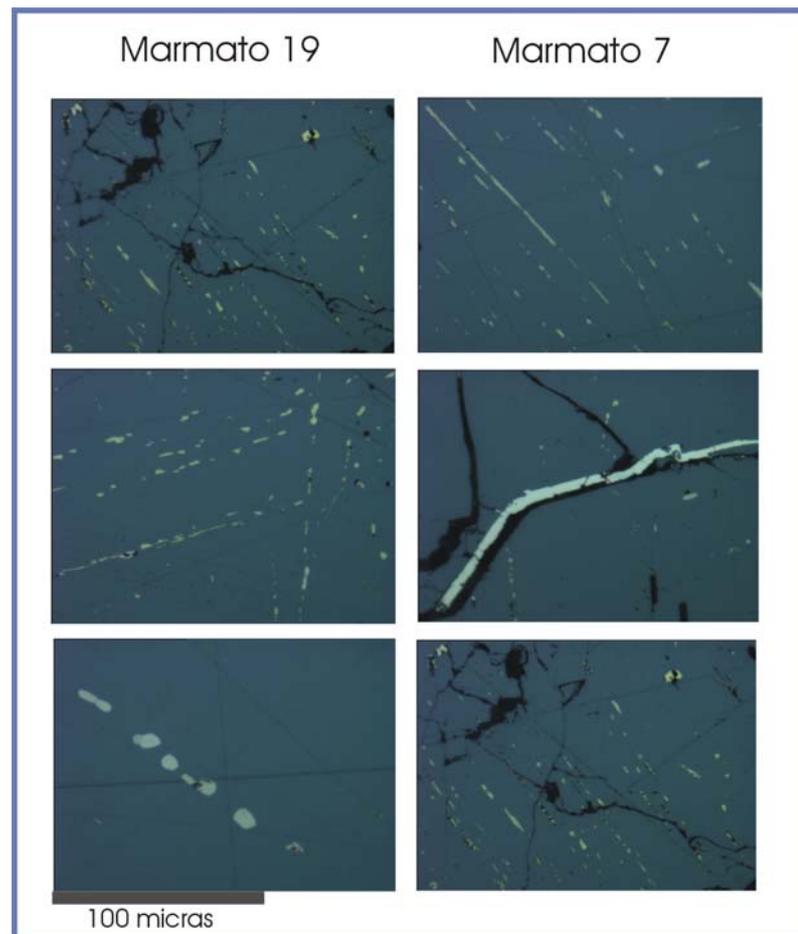


Figura 119. Imágenes minerales obtenidas de las probetas Marmato 19 y Marmato 7.

Como hipótesis para explicar estas diferencias se plantea que puedan deberse a la contribución del Fe que hacen la pirrotina y calcopirita incluidas en la marmatita, teniendo en cuenta el hecho de que los medios de análisis primitivos (Boussingault (1829), in: Hey, 1975) no permitían discriminar entre el mineral y sus inclusiones. Con el fin de comprobar la validez de esta hipótesis, se ha planteado la valoración cuantitativa del aporte de Fe de la pirrotina y calcopirita presentes como inclusiones en la marmatita. Para ello, se realiza un análisis modal de la esfalerita, abarcando las escenas donde aparece la marmatita con inclusiones de minerales con contenido de Fe u otros (no ferríferos).

IV.7.4.2 Caracterización mediante ADI

La Caracterización mediante ADI se abordará de forma individual para cada una de las dos probetas de la Mina de Marmato. La adquisición de las imágenes se realiza con un objetivo de 20 X que permite apreciar con claridad las pequeñas inclusiones de pirrotina y calcopirita presentes en la Marmatita.

Adquiridas las imágenes, el parámetro a cuantificar será el área total de las fases presentes en la escena estudiadas (marmatita, calcopirita, pirrotina y otros minerales sin Fe). En total se han evaluado 30 imágenes para cada probeta. La secuencia del análisis modal es la siguiente:

- Calcular las áreas (%) de las fases minerales en las imágenes adquiridas (utilizar ADI).
- Determinar el % de área de las fases minerales con Fe (100 % de minerales con Fe), incluida la esfalerita.
- Obtener el % de volumen de las fases minerales con Fe (utilizar $\% A = \% V$. Russ; 1990).
- Calcular el aporte en masa de los minerales (utilizar densidades medias: 4,1 para esfalerita, 4,65 para la pirrotina , 4,3 para la calcopirita).
- Determinar el % masa de las fases minerales con Fe.

- Calcular la contribución de Fe de cada fase mineral (utilizar el aporte en Fe (%) de un mol de mineral: 9 % para esfalerita, 63,57 para pirrotina y 22,57 para calcopirita).
- Determinar el % de contribución de Fe de la pirrotina y calcopirita (contribución de Fe de la marmatita = 9 %).
- Calcular la contribución total en Fe (%) de todos los minerales con Fe.

Los resultados obtenidos de forma individual para las probetas estudiadas se presentan en la Tabla 20.

Análisis de Imagen

	% Area (totales)		% Area (minerales con Fe)	
	Marmato 19	Marmato 7	Marmato 19	Marmato 7
Esfalerita	96,93	89,48	97,54	97,60
Pirrotina	1,76	1,82	1,77	1,98
Calcopirita	0,69	0,39	0,69	0,42
Otros	0,62	8,32		

% Área = % Volumen

Marmato 19

Minerales	% volumen	densidad	masa	% masa	% Fe	Contribución Fe	% Fe aportado
Esfalerita	97,54	4,10	399,89	97,36	9,00	8,76	9,00
Pirrotina	1,77	4,30	7,62	1,86	63,57	1,18	1,21
Calcopirita	0,69	4,65	3,22	0,79	22,57	0,18	0,18
	100,00		410,74	100,00			
<i>% de Fe en la esfalerita y sus inclusiones</i>							10,39

Marmato 7

Minerales	% volumen	densidad	masa	% masa	% Fe	Contribución Fe	% Fe aportado
Esfalerita	97,60	4,10	400,14	97,44	9,00	8,77	9,00
Pirrotina	1,98	4,30	8,53	2,08	63,57	1,32	1,36
Calcopirita	0,42	4,65	1,97	0,48	22,57	0,11	0,11
	100,00		410,65	100,00			
<i>% de Fe en la esfalerita y sus inclusiones</i>							10,47

Tabla 20. Contribución de Fe de las inclusiones de Pirrotina y Calcopirita en la Marmatita

Los resultados obtenidos del estudio modal de las dos probetas presentan resultados semejantes. En el caso de la pirrotina, la contribución de Fe oscila entre

1,21% y 1,36%; en cambio, la contribución de Fe de la calcopirita es menor, oscilando entre 0,11% y 0.18%.

Estos valores en conjunto, permiten obtener un valor de incremento del Fe de aproximadamente de 1.4% en adición al obtenido medido mediante la microsonda. Esto supondría un acumulado total de Fe de la marmatita y sus inclusiones de calcopirita y pirrotina equivalente aproximadamente a 10,4 %.

El valor de abundancia de Fe (10,4 %) encontrado, aunque se ajusta mejor al intervalo teórico asignado a la Marmatita, tiene un riesgo de error amplio debido a que los valores de área de fases escasas (inclusiones de pirrotina y calcopirita) poseen un error grande de precisión. Este error no es imputable al método de ADI (cuando la segmentación es correcta, como es el caso), sino, a la representatividad estadística de la muestra de mano o probeta con respecto a los bajos contenidos (criterio análogo al efecto pepita del oro).

Aún así, esta aplicación demuestra que la técnica de ADI puede ser utilizada para resolver cuestiones y problemas de investigación y no solamente aspectos técnicos

V CONCLUSIONES

En este capítulo se resumen las conclusiones alcanzadas como consecuencia del desarrollo de este trabajo. Dichas conclusiones se han ido avanzando ya en los capítulos precedentes, pero se presentan aquí agrupadas en relación con los dos grandes problemas que se han abordado:

- Consecución de una metodología que garantice la reproductibilidad de los datos obtenidos del ADI.
- La aplicación y representatividad del sistema de identificación de fases minerales desarrollado.

V.1 CONCLUSIONES METODOLÓGICAS

Para el establecimiento del sistema experto de identificación de minerales presentes en probetas pulidas, se ha perseguido diseñar un método reproducible que contemplara la corrección y limitación de las variables que influyen en los valores medidos por el ADI y que caracterizan a las fases minerales estudiadas (Rangos de NG).

La validez de la metodología planteada queda avalada, en primer lugar, por la reproducibilidad de los datos de segmentación conseguida. Es decir, la capacidad de obtener iguales valores de NG (rangos de segmentación) de una fase mineral, independientemente de cuándo y dónde fuese tomada la imagen en color (R, G y B) que la contenga. La valoración de fiabilidad en la toma de las medidas a través de la cámara de vídeo ha sido realizada usando los valores de referencia (% Reflectancia) definidos para los minerales caracterizados. Estos valores se expresan de la siguiente forma (I.V. Segmentación y Validación de los resultados):

BANDA ROJA:

$$NG = 3,101 * (\text{REFLECTANCIA}); R^2 = 0,97$$

BANDA VERDE:

$$NG = 3,071 * (\text{REFLECTANCIA}); R^2 = 0,87$$

BANDA AZUL:

$$NG = 3,071 * (\text{REFLECTANCIA}); R^2 = 0,92$$

Los valores R de ajuste (Coeficiente de Pearson), reflejan la coherencia de los datos obtenidos, lo cual indica que las condiciones metodológicas de adquisición de imágenes son las adecuadas. En general, la metodología de adquisición de imágenes aborda el estudio y limitación de todos aquellos factores (pulido de probetas, derivas, luminosidad de la fuente, etc.) que, de una u otra forma, producen variación de la respuesta en NG de una misma escena. Todos estos procedimientos han quedado descritos en la memoria de este trabajo a fin de que puedan ser usados en la caracterización de minerales mediante ADI.

La inclusión de factores como la paragénesis del yacimiento del que procede la muestra, el reconocimiento preliminar de los minerales opacos presentes en la probeta estudiada y la limitación de los minerales a los más abundantes e importantes, ha introducido en la secuencia metodológica planteada, criterios intrínsecos de la problemática abordada que optimizan la metodología planteada.

Una ventaja adicional de la metodología (ADI) ensayada es que la digitalización de los datos permite una gran versatilidad para ofrecer resultados cuantitativos a cualquiera de las demandas posibles de información por parte del mineralurgista o del técnico de ingeniería ambiental (área, perímetro, tamaños de grano, superficies específicas, etc.). Máxime una vez que se ha demostrado la posibilidad de deducción mediante funciones matemáticas verificadas experimentalmente. No obstante, sigue siendo necesario el examen previo (cualitativo) por parte de un experto microscopista para sentar los criterios de aplicación del método.

V.2 CONCLUSIONES DE RESULTADOS

La utilización de los rangos de segmentación definidos, para cada fase mineral estudiada (Grafito, Oro, Plata, Platino, Arsenopirita, Bornita, Calcopirita, Cinabrio, Covellina, Cubanita, Esfalerita, Estibina, Galena, Linneíta, Marcasita, Niquelina, Molibdenita, Pentlandita, Pirita, Pirrotina, Tetrahedrita, Casiterita, Cromita, Hematites, Ilmenita, Magnetita, Rutilo, Uraninita, Goethita, Wolframita) y en cada una de las bandas en las que se ha descompuesto la información de la imagen en color (roja, verde y azul), ha permitido identificar correctamente los minerales presentes en una sección pulida. Esto ha sido posible siempre que se ha utilizado el análisis multibanda planteado, es decir, que la segmentación o identificación final de las fases resulte de la intersección de las segmentaciones parciales, obtenidas utilizando las bandas roja, verde y azul por separado.

Un aspecto importante del presente estudio ha sido el diseño de un sistema automatizado cuyo funcionamiento se basa en una secuencia visual de instrucciones (*Visual Basic*) que el operador debe responder en cada caso, según la problemática concreta. El diseño de la secuencia de trabajo, también llamada rutina o macro, consigue que introduciendo ciertos parámetros (tipo de yacimiento de donde proceden las muestras a estudiar, minerales que se quiere identificar, parámetros a cuantificar, entre otros) se supere el tedioso trabajo que representaba la cuantificación de parámetros estereológicos mediante el proceso de conteo de puntos.

El procedimiento de validación de los rangos de segmentación obtenidos se ha realizado mediante pruebas de segmentación realizadas en probetas pulidas distintas a aquella en la que se han tomado los datos del modelo. El resultado obtenido indica que es adecuado y pone de manifiesto que el Sistema establecido es correcto, ya que acierta aproximadamente el 95 % de los casos.

Los resultados encontrados en las aplicaciones planteadas deben ser analizadas y valoradas en el contexto mineralógico en el que se ha trabajado. En general, los resultados obtenidos (análisis modal y ponderal de fases minerales), representan las composiciones y características mineralógicas reales de las menas a escala local (es

decir, en las probetas estudiadas). Los casos en los cuales los valores medidos difieren de la realidad, se explican por causas físicas como pulido defectuoso o la selección inadecuada de un objetivo de trabajo en relación con el tamaño de grano de los minerales.

Aplicación del ADI en la Mina NUEVA ESPARTA

- El control externo mediante comparación con datos químicos permite comprobar que los valores obtenidos resultan razonables (por ejemplo: para la veta Bruja 685 ppm frente a 649 ppm / Au equivalente por análisis químico).
- Desde el punto de vista mineralúrgico los resultados obtenidos coinciden con los esperados a partir del ADI, obteniéndose en mesa Wilfley una recuperación del 95 % del oro contenido en muestra de Veta Bruja y del 84 % en Veta Gruesa, con molienda a 0.25 mm, con pérdida únicamente del 4 % y 16 %, respectivamente. De esta forma, se pone de manifiesto la posibilidad de obtener concentrados viables por gravimetría, disminuyendo el peligroso impacto ambiental de la amalgamación o cianuración al tener que tratar una cantidad muchísimo menor que la inicial.

Aplicación del ADI en la Mina El Roble

- La cuantificación de las fases minerales presentes en las probetas estudiadas se ajusta a los valores presentados en la descripción mineralógica llevada a cabo sobre estas probetas.
- La variabilidad de la granulometría de las fases minerales en las probetas estudiadas ha obligado a utilizar en algunos casos el muestreo de barrido secuencial permitiendo así, al tiempo que se miden los tamaños de granos menores a 200 micras con objetivo de 20X, medir los granos con tamaños de hasta 1 mm con este mismo objetivo. Representando un aporte muy importante en la cuantificación y caracterización de fases minerales.
- Además de la distribución de los granos y áreas de los granos de pirita y calcopirita presentes en las fases minerales, se ha presentado la asociación mineral

de la calcopirita que permitirá elegir, con mejor criterio, el tamaño de molienda óptimo.

V.3 APORTACIONES

De forma general y resumida las aportaciones de este trabajo son las siguientes:

- Definición de una metodología general de aplicación de la técnica de ADI en la caracterización de menas metálicas.
- Presentación de unos rangos de segmentación de referencia (NG) para los treinta minerales opacos más importantes y abundantes.
- Introducción de criterios geológicos en el funcionamiento del sistema de identificación de minerales (selección de grupos de yacimientos según su tipología y asociaciones minerales típicas).
- Validación de la metodología aplicada y de los resultados obtenidos.
- Aplicación del proceso de referenciación en las imágenes digitales microscópicas.

V.4 NUEVAS LÍNEAS DE TRABAJO

Aunque el trabajo expuesto presenta unos resultados coherentes y satisfactorios respecto a los planteamientos iniciales establecidos en la investigación, éste podría ampliarse en el futuro con nuevos trabajos. Entre ellos se proponen los siguientes:

- Ampliar el número de variables (descomponer en más bandas la imagen digital) en el en Sistema de Identificación de minerales y, así, establecer nuevos modelos de segmentación, que permitan realizar mejores ajustes y aumentar el número de fases minerales que puedan ser identificadas.

- Automatizar el desplazamiento, el enfoque y ubicación (coordenadas) de la escena a adquirir mediante platina automatizada en el microscopio. Esto supondrá una disminución del tiempo empleado en la adquisición de imágenes.
- Aunque el Sistema establecido se puede considerar validado, sería oportuno realizar nuevas validaciones con equipos de ADI distintos a los utilizados (cámara CCD, microscopio, etc). Deberá realizarse siguiendo la metodología planteada en este trabajo para el control riguroso de todo el proceso (preparación de muestras, puesta a punto del equipo, etc).
- Realizar el esfuerzo para conseguir que el programa de Identificación de Minerales pueda ser utilizado en cualquier PC a través del desarrollo de un ejecutable universal de la aplicación.
- Intentar cuantificar el parámetro calidad de pulido y que no sea valorado de forma subjetiva por el microscopista.
- Introducir la necesaria automatización del equipo, el aprendizaje del Sistema de identificación, para culminar el diseño de un sistema experto de gran rendimiento, transferible a la industria.

VI BIBLIOGRAFÍA

- Azaroff, L.V., and Burger, M.J. (1958). *The Powder Method in X-Ray Crystallography*. McGraw-Hill, New York.
- Bel-Lan, A. (1978). Métodos de cuantificación de parámetros petrográficos mediante proceso digital de imágenes microscópicas. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias de la Universidad de Oviedo, España. 136.
- Bel-Lan, A. (1984). Análisis de parámetros petrográficos mediante proceso digital de imágenes. Tesis Doctoral, Facultad de Geología de la Universidad de Oviedo, España. 120.
- Bernhardt, H.J. (1987). A Simple, Fully-Automated System for Ore Mineral Identification. *Mineralogy and Petrology*. Vol 36: 241-245.
- Berrezueta, E. (2000). Aplicación del Análisis Digital de Imagen a la investigación tecnológica de menas auríferas. Nariño. Colombia. Tesis de Master. E.T.S.I. de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. 100.
- Berrezueta, E. y Castroviejo, R. (2001). Viabilidad de las técnicas de análisis de imagen en la investigación de metales preciosos. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*. 24-A. 77-78.
- Berrezueta, E. y Castroviejo, R. (2002) (a). Sistema experto para identificación automática de fases minerales. Estudios preliminares. X Reunión de AIESMIN. Universidad Politécnica de Madrid. 12.
- Berrezueta, E. y Castroviejo, R. (2002) (b). Investigación de las aplicaciones del análisis digital de imagen a la solución de problemas mineralúrgicos y ambientales relacionados con la minería metálica. XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia. Zaragoza - España. 74-77
- Berrezueta, E., Castroviejo, R, Pantoja, F. y Álvarez, R. (2002). Estudio mineralógico y cuantificación por análisis digital de imagen de las menas auríferas de Nariño (Colombia). Aplicación a la mejora del proceso mineralúrgico. *Boletín Geológico y Minero*. (IGME). Vol. 113 (4). 369-379.
- Cabri, L.J. & Chryssoulis, S.L. (1990). *Advanced Microscopic Studies of Ore Minerals*. In J.L. Jambor and D.J. Vaughan (eds.). Mineral Association. Ottawa, Canada.

- Castroviejo, R. (1977). Introducción a la Microscopía de Minerales Opacos y sus aplicaciones a la Investigación Geológica Minera. I Curso Roso de Luna: Investigación y economía de los Recursos geológico-mineros. Tema I, Área II: estudio de Depósitos Minerales y Técnicas Especiales. Publ. Ministerio de Industria y Energía, Madrid. 3-42.
- Castroviejo, R. (1999). Concentraciones minerales de interés económico. Red ALEMYMA E.T.S.I.M. de Madrid. 120.
- Castroviejo, R., Chacon, E., Múzquiz, C., Tarquini, S. (1999) (a). A preliminary image analysis characterization of massive sulphide ore from the SW Iberian Pyrite Belt (Spain). Geovision. International Symposium on Imaging Applications in Geology. Lieja, Bélgica. 37-40.
- Castroviejo, R., López A. Múzquiz, C., Pirard E. (1999) (b). Modal Image Análisis of metallic sulphides in core samles. A critical test of the methodology. Geovision. International Symposium on Imaging Applications in Geology. Lieja, Bélgica. 41-44.
- Castroviejo, R. (1998). Concentraciones minerales de interés económico. Red ALEMYMA E.T.S.I.M. de Madrid.
- Castroviejo, R., Berrezueta, E. y R. Lastra. (2002). Microscopic digital image analyses of gold ores. A critical test of the methodology, comparing Reflected Light and Electron Microscopy. 2002 Mineral & Metallurgical Processing Journal. VOL. 19 NO. 2. Denver, Colorado. 102-109.
- Castroviejo, R y Berrezueta, E. (2003). Mineralogía aplicada para la pequeña minería. XI Reunión de AIESMIN. San Juan - Argentina. 12.
- Chang, Y.C. & Reid, J. (1996). RGB Calibration for color image analysis in machine vision. IEEE Trans. Image Proc. Vol - 5. N - 10.
- Chayes, F. (1956). Petrografic Modal Analysis. John Wiley & Sons Inc. New York.
- Cortez, J. (2002). Manejo y uso del microscopio óptico compuesto. Practicas de Laboratorio. Microscopía. Departamento de Biología y Geología. Instituto Superior de Enseñanza. Madrid - España.
- Coz, E. (2002). Proyecto de cuantificación automatizada del contenido de sulfuros en carbones por Análisis Digital de Imagen, como ayuda para la previsión y corrección del Impacto Ambiental. Proyecto Fin de Carrera. Departamento de Ingeniería Geológica. E.T.S.I.M. de Madrid. 150.

- Coz, E., Castroviejo, R., Elorza, F.J. & Ezama, R. (2002) Aplicación del Análisis Digital de Imagen. Para la previsión y corrección del impacto ambiental de la combustión del carbón. X Reunión de AIESMIN. Universidad Politécnica de Madrid. 15.
- Coz, E. & Castroviejo, R. (2002). Cuantificación automatizada del contenido de sulfuros en carbones por análisis digital de imagen, como ayuda para la previsión y corrección del impacto ambiental. XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia. Área II: Gestión y Aprovechamiento de Recursos Geológicos. Zaragoza - España. 79-81.
- Coz, E., Castroviejo, R., Bonilla, D., García Frutos, F. (2003). Quantitative determination of modal content and morphological properties of coal sulphides by digital image análisis as a tool to check their flotation behaviour. FUEL. Science Direct. ELSEVIER. London - U.K. 45-55.
- Craig, J. & Vaughan, D. (1994). Ore Microscopy & Ore Petrography. Editorial Wiley. Second Edition. New York-United States of America. 434.
- Criddle, A.J. & Stanley, C. (1993). Quantitative data file for ore minerals. Third Edition. Chapman & Hall British Museum, Londres. 635.
- Criddle, A.J. (1998). Ore Microscopy and Photometry (1890-1998). COM/IMA. MAC Short Course Series, Vol 27, Ottawa - Canada.
- Delfiner P., Etienne, J. and Fonk, J.M., (1972). Application de l'analyseur de textures à l'étude morphologique de reseaux poreaux en lame mince. Rev. Ins. Français Pet, Vol 27. 538-558.
- Dellese, P., Etienne, J., Fonk, J.M (1848). Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches. Ann. Mines, (IV), Vol. 13. 379.
- Edwards, A.B. (1965) Textures of the Ore Minerals and their Significance. The Austr. Inst. of Mining and Metall., Melbourne. 242.
- Einaudi, M.T., Meinert, L.D. & Newberry, R.J. (1981). Skarn Deposits. Economic Geology, 75th Anniversary Volume. 317-391.
- Evans, A. (1993). Ore geology and industrial minerals: An introduction. Blackwell Science. 389.
- Fabbri, A.J. (1984). Image Processing of Geological Data, Computer Methods in Geosciences. Van nostrand Reinhold Company. U.K.
- Freud, H. (1966). Applied ore microscopy. Macmillan. First English Edition. Frankfurt- Germany.

- Friel, J., Grande, J.C., Hetzner, D., Hurzydlowski (2000). Practical Guide to Image Analysis. The materials Information Society. 290.
- Gallardo, N. (2002). Microscopia aplicada a minerales y menas. Apuntes Área-Metalurgia. Departamento de Ingeniería. Universidad Arturo Prat. Iquique - Chile. <http://www.unap.cl/index.pl?iid=3587>
- García del Amo, D. (2000). Investigación y control mineralógico de la relación árido-álcali para hormigón. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, 2 Volúmenes. 270.
- García N, (2003). El Microscopio del efecto túnel. Cultura y Ciencia. Terra Networks, S.A. España. 15-25.
- Glagolev, A.A. (1931) Mineralog. Matter. 10.
- Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. & Groves, D.I.. (1995). A classification scheme for epigenetic Archaean lode-gold deposits. Mineral Deposit 30. 408-410.
- Goldstein, J.I., Newbury, D.E, Echlin, P., Joy, D.C., Roming, A.D., Layman, C.E., Fiori, C. & Lifshin, E. (1992). Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. Plenum Press, New York.
- González, R.C. & Woods, R.E. (1993). Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company, USA. 716.
- Grum, F & Bartleson, C.J. Optical Radiation Measurement: 2. Colour Measurement: Academic Press 1980.
- Hey, M.H., (1975). An Index of mineral species and varieties. Arranged chemically. Ed. British museum (NH, Londres) Vol 1.. 727.
- Holst, G. C. (1998). CCD Arrays, Cameras and Displays. SPIE Optical Engineering Press. Washington. 449.
- Ineson, P.R. (1989) Introduction to Practical Ore Microscopy. Longman, Essex. 181.
- Kropatsch, W.G. y Bischof, H. (2001). Digital Image Analysis. Selected Techniques and Applications. Transactions of the Institution of mining and metallurgy. Vol. 108, C 75-84.
- Küppers, H. (2003). Teoría del Color de Kueppers. Color y procesos de visión. Institut für Integrierte Publikations und Informationssysteme (IPSI). Darmstadt Germany. <http://www.iac.es/biblio/libros/spa/r000010/r009017.htm>
- Large, R.R. (1992). Australian Volcanic-Hosted Massive Sulphide Deposits: Features, Styles, and Genetic Models. Economic Geology, Vol.87. 471-510.

- Lastra, R., Wilson, J. & Cabri, L.J. (1999). Automated gold search and applications in process mineralogy. Transactions of the Institution of mining and metallurgy. Vol. 108, C. 75-84.
- Lebrun, V., Nivart, J.F., Bonino, E. y Pirard E. (1999). Development of specific acquisition techniques for field imaging. Applications to outcrops and marbles. Geovision 99, Int. Symp. on Imaging Appl. in Geology, Univ. Liège, Belgium. 165-168.
- Lillo, J., Collado, J., Del Valle, R y Sánchez Pilar. (1995). Color, contraste y diseño ergonómico (I): Temperatura correlacionada del color. Psicología de la Percepción. Departamento de Psicología Diferencial y del Trabajo. Facultad de Psicología. Universidad Complutense de Madrid.
- Lillo, J., Collado, J., Del Valle, R y Sánchez P. (1996). Color, contraste y diseño ergonómico (II): La percepción del Color. Psicología de la Percepción. Departamento de Psicología Diferencial y del Trabajo. Facultad de Psicología. Universidad Complutense de Madrid.
- Lindgren, W. (1928). Mineral Deposits. McGraw-Hill Book Company Inc. New York, 1049.
- Luque del Villar, F. y Sierra, J.(2000). Prácticas de Mineralogía (I): Microscopía de Luz Reflejada. Universidad Complutense de Madrid.
- Lloyd, G. (1985). Review of instrumentation. Techniques, and Applications of SEM in Mineralogy. Inc J.C. White (ed.). Applications of Electron Microscopy in the Earth Sciences. Mineral Association. Ottawa, Canada.
- Martínez-Nistal, A (1985). Diseño y operatividad de un sistema interactivo para el proceso digital de micrografías petrográficas. Tesis de licenciatura. Departamento de Petrografía. Facultad de Geología. Universidad de Oviedo. 95.
- Martínez-Nistal, A (1993). Discriminación, cuantificación y cartografiado de compobentes petrográficos mediante proceso digital de multi-imágenes microscópicas. Tesis Doctoral. Departamento de Petrografía. Facultad de Geología. Universidad de Oviedo. 232.
- Marr, D. & Poggio, T. (1979). A computational theory of human stereo vision. Proceeding of the Royal Society of London. B 20. 151-180.
- Marr, D. (1982). Vision. W. H. Freeman and Company.
- McLeod, C.R. & Chamberlain, J.A.(1968). Reflectivity and Vickers microhardness of ore Minerals. Hart and Tables. Geological Survey of Canada.

- Melgarejo, J., Canet, C. Y Zamora, O (2002). Propiedades de los minerales en luz reflejada. Prácticas de Posgrado de Geotectónica y Yacimientos Minerales. Universidad Autónoma de México. <http://geologia.igeolcu.unam.mx/academia>.
- Meinert, L.D. (1992). Igneous Petrogenesis and Skarn Deposits. En: Mineral Deposit Modelling: Geological Association of Canada, Special Paper 40. 569-583.
- Molina, R. (1998). Introducción al Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales. Curso de Introducción a la Robótica.. Departamento de Ciencias de la Computación e I.A. Universidad de Granada. http://www-etsi2.ugr.es/depar/ccia/mia/Procesamiento_Imagenes.pdf
- Montoto, M., Bel-Lan, A., y Montoto, L. (1981). Quantification of rock microfractography by digital image análisis. Proc., Second Scandinavian Conf. On Image Análisis. University of technology. Helsinki. 189-194.
- Montoto, M., Rodriguez-Rey, A., Suarez del Río, L., Calleja, L., Ruiz de Argondona, V.G. (1987). Methodology for microscopic studies on alteration of buildings stores. The Sixth Meeting of the European Clays Groups. Seville- Spain. 45-48.
- Murcia, L. y Cepeda, H. 1991. Mapa Geológico de Colombia: Memoria, Plancha 410 - La Unión (Departamento de Nariño), Escala. 1:100.000. INGEOMINAS, Bogotá.
- Múzquiz, C. (1997). Aplicación del Análisis de Imagen a la caracterización cualitativa y cuantitativa de menas sulfuradas de la faja pirítica ibérica: Masa Valverde. Proyecto Fin de Carrera. Departamento de Ingeniería Geológica. E.T.S.I.M. de Madrid. 150.
- Niblack, W. (1985). An Introduction to Digital Image Processing. Strandberg. First Edition. Publishing Company. Denmark.
- Niggli, P, (1929). Ore Deposits of Magmatic Origin, tr. H. C. Boydell, London. Thomas Murby.
- Ortiz, F. (2002). Características Geológicas y Mineralógicas del yacimiento de sulfuros masivos El Roble (Chocó- Colombia). IX Congreso Colombiano de Geología. 150-160.
- Pantoja, F. (1999). Optimización del proceso de amalgamación en la pequeña minería del oro: mejora de la recuperación y disminución de las perdidas de mercurio. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Autónoma de Madrid. 160.

- Petruk, W. (1990). Determining Mineralogical Characteristics by Image Analysis. In J.L. Jambor and D.J. Vaughan (eds.). Mineral Association. Short Course Hdbk, 17. Ottawa, Canada.
- Petruk, W. (2000). Applied Mineralogy in the Mining Industry. First Edition. ELSEIVER. Ottawa, Canada. 268.
- Picot, P. & Johan, Z. (1977). Atlas des minéraux métalliques, Bureau des Reserches Geologiques et Minères, Paris, Francia.
- Pirard, E. & Tarquini, S. (1996). Improved phase segmentation using RGB imagin. Caractérisation des Materiès Naturelles. Université de Liège.
- Pirard, E. (1999) (a). Optimal image acquisition of video images in reflected light microscopy in Microscopy and Analysis, Liege, Belgium.
- Pirard, E. (1999) (b). Colour image analysis in mineralogy en COM-IMA Short Course, Porto, Portugal.
- Pirard, E. (2003) (a). Granulometría y morfometría de materiales granulares por métodos Ópticos. Seminario Internacional de Minería, Metalúrgia y Medioambiente. Escuela Politécnica Nacional y Universidad Católica de Lovaina. 47-56.
- Pirard, E. (2003) (b). Análisis Mineralógico Cuantitativo. Seminario Internacional de Minería, Metalúrgia y Medioambiente. Escuela Politécnica Nacional y Universidad Católica de Lovaina. 85-97.
- Ramdohr, P.(1980). The Ore Minerals and Their Intergrowths, Second ed. Pergamon Press, Oxford.
- Real Jurado, P. (2002). Procesamiento de Imágenes Digitales (Topología Digital). Apuntes de Topología Digital: Representación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universidad de Sevilla. <http://www.pdipas.us.es>
- Reed, S.J.B. (1975). Electron Microprobe Analysis. Cambridge Universite Press. Cambridge, England.
- Rink and Schopper, (1978). On the application of image analysis to formation evolution. The Log Analyst. January-February, 1978. 12-22.
- Rochow, T. & Tucker, P. (1994). Introduction to Microscopy by Means of Light, Electrons, X Rays, or acoustics. . Plenum Press, New York and London. 413.
- Rosenfeld, A. (1979). Some experiments on variable theesholding. Patern Recognition, Vol. 11. 191.

- Rosenfeld, A. & Kak, A.C. (1981). Digital Picture processing. Vol.1 & Vol.2. Academic Pres. London.
- Rosiwall (1898). On Geometric Rock Analysis. A Simple urface Measurement to Determine the Quantitative Content of the mineral Constituents of a Stony Aggregate. Verhandl K.K. Geol. Reich. Wien., Vol. 5. 143.
- Russ, J.C. (1990). Computer-Assisted Microscopy. The measurement and analysis of images. Plenun Press, New York. 450.
- Russ, J.C. (1991). Multiband Thresholding of Images, Journal of Computer Assisted Microscopy. Vol. 3, N 2. 77-95.
- Russel, M.J. (1978). Downward-excavating hydrothermal cells in Irish-type ore deposits: importance of an underlying Caledonian prism. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Sciences 87; B168-B171.
- Schneiderhöhn, H. (1922). Anleitung zur mikroskopischen Bestimmung unUntersuchung von Erzen und Aufbereitungsprodukten besonders im auffallenden Licht. Selbstverlag der gesellschft Deutscher Metalhütten unf Bergleute e. V., Berlin-Germany. 274.
- Schneiderhöhn, H. (1952). Erzmikroskopisches Praktikum. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. 274.
- Serra, (1982). Image Analysis and Mathematical Morphology. Vol. 1.Academic Press, London.
- Serra, (1988). Image Analysis and Mathematical Morphology. Vol. 2.Academic Press, London.
- Schouten (1962). Deternative tables for ore microscopy. Amsterdan, Elseiver. 242.
- Shaw, R. (2000). Gold in Colombia. Comm. 4th. Internat. Gold Symposium, Lima, Perú.
- Sorby, H. C. (1856). On Stay Cleavage, as Exhibited in the Devonian Limestones of Devonshire. Phil. Mag (4), Vol. 11. 20.
- Spry & Gedlinske (1987). Tables for the Determination of Common Opaque Minerals. Economic Geology. The Economic Geology Publishing Company. 52.
- Taggart, A.F. (1945). Handbook of Mineral Dressing, Willey, New York.
- Theodore, T.J., Orris, G.J., Hannarstrom, J.M., & Bilss, J.D. (1991). Gold-bearing skarns.U.S. Geol. Surv. N 1930 Bull. 61.
- Thompson (1930). Quantitative Microscopic Analysis. J. geology. Vol 27. 276.

- Uytenbogaardt, D.J. & Burke, E.A.J. (1971). *Tables for the Microscopic Identification of Ore Minerals*. Elsevier, Amsterdam.
- Vaughan, D. & Wogelius, R. (2000) *Environmental Mineralogy*. European Mineralogical Union, *Notes in Mineralogy*, V. 2. Eötvös U. Press, Budapest, 434.
- Vázquez, F. (1995). *Geología Económica de los recursos minerales*. Edita: Fundación Gómez-Pardo y E.T.S.I.M. de Madrid. 481.
- Wills, B.A. (1988). *Mineral Processing Technology*, Pergamon Press, Oxford.
- Zussman, J. (1977). X-Ray Diffraction. In J. Zussman (ed). *Physical Methods in Determinative Mineralogy*. Academic, New York.

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid
Departamento de Ingeniería Geológica

DOCUMENTO N° 2 ANEXOS

**CARACTERIZACIÓN DE MENAS MEDIANTE
ANÁLISIS DIGITAL DE IMAGEN:**

**Investigación y diseño de un sistema experto aplicable a
problemas mineros**

Edgar Raúl Berrezueta Alvarado

2004

Anexo 1
Depósitos Minerales

AMBITO MAGMÁTICO

- **En Rocas Ultramáficas y Complejos Ofiolíticos**

Los yacimientos minerales formados durante la cristalización fraccionada de magmas ultramáficos - máficos fueron reconocidos y nombrados antes de que Lindgren desarrollara su sistema de clasificación de los yacimientos minerales. El término depósitos de segregación magmática se aplica a todos los yacimientos que son producto de cristalización magmática.

Estos depósitos usualmente se forman en la cámara magmática, asentados en profundidad sobre un cuerpo intrusivo. Fundidos diferenciados o inmiscibles y cristales (*mushes*) pueden ser concentrados en el interior de la cámara magmática, formando enriquecimientos (Guilbert J., 1997).

Mineralogía (Craig & Vaughan, 1994)

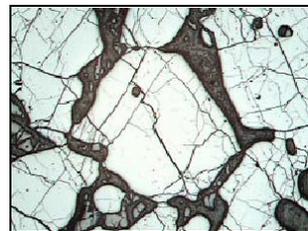
Minerales Principales: Cromita

Minerales Accesorios: Sulfuros de Níquel, Cobre y Hierro (Pentlandita, Pirrotina, Calcopirita, Bornita).

Elementos Trazas: EGP y Rutilo, Oro (asociado a sulfuros).

Ejemplos:

- Cromita: Bushveld, Sudáfrica.
- Cromita Podiforme: Moa-Cuba
- Óxidos de Ti-Fe: Bushveld, Sudáfrica.
- EGP: Merensky Reef, RSA
- Sulfuros Masivos: Chipre.



Cromita fracturada. Cromititas ofiolíticas.

Moa - Cuba. (Foto: Canet, M)

- **En Rocas Máficas**

“All nickel sulphide deposits are associated with basic and ultrabasic igneous rock. There is both a spatial and geochemical relationship in that deposits associated with gabbroic igneous rocks normally have a high Cu/Ni ratio (Sudbury, Canadá), and those associated with ultrabasic rocks a low Cu/Ni ratio (Thompson Belt, Manitoba)” Evans, A., 1993.

Mineralogía (Craig & Vaughan, 1994)

Minerales Principales: Pirrotina, Pentlandita, Pirita, Magnetita, Calcopirita.

Minerales Accesorios: Cubanita, EGP, Niquelina, Millerita.

Ejemplos:

- Sulfuros Ni - Cu (Sudbury-Canadá, Norilsk, Rusia; S. Ronda-España).

- **Depósitos Pegmatítico-Neumatolíticos**

En condiciones hipercríticas se forman las fases pegmatítica y neumatolítica, caracterizadas, como los gases, por su gran movilidad (sobre todo la segunda). Durante la fase pegmatítica, cristalizan todavía minerales anhidros análogos a los del granito (cuarzo, feldespatos alcalinos) junto con minerales que incorporan componentes volátiles (micas, turmalinas, topacio, etc.) y, dado el caso, con menas muy variadas (de Sn, Ta, Nb, tierras raras, Au, gemas, etc.).

Las pegmatitas se encuentran en las aureolas de contacto de cuerpos intrusivos, concretamente, en las zonas más exteriores o más cercanas a la superficie. Por su mineralogía y por su significado económico se dividen en pegmatitas simples y complejas. Éstas pueden tener mineralogías muy variadas que exigirían rutinas específicas. Las fases neumatolíticas se caracterizan por la sustitución metasomática

de minerales ya depositados por otros estables en las nuevas condiciones, decididamente ácidas y con elevada presión de fluidos.

Mineralogía (Craig & Vaughan, 1994)

Minerales Principales: Pirita, Pirrotina, Wolframita, Casiterita.

Minerales Accesorios: Arsenopirita, Calcopirita, Molibdenita, Galena, Estannita, Rutilo, Scheelita.

Ejemplos:

- Pegmatíticos: Kalima/Maniema, República del Congo.
- Neumatolíticos: Cornwall, Reino Unido.

AMBITO HIDROTERMAL

- **Yacimientos Hidrotermales (Pb-Zn-Ag)**

Los yacimientos hidrotermales son muy variados. Se definen como aquellos que han sido formados a partir de disoluciones acuosas diluidas a temperaturas moderadas (400 °C - 100 °C). Numerosos metales valiosos (Cu, Pb, Zn, Ag, Au, Sn, Mn, Fe, etc.), en principio, pueden estar disueltos en estas condiciones y luego concentrarse por varios procesos. Se han seleccionado en este grupo los del tipo filoniano plomo, zinc, plata y cobre. Estas menas ocurren como filones hidrotermales, rellenando fracturas o cementando brechas, y reemplazando cuerpos. Normalmente están asociadas a intrusiones intermedias-ácidas.

Mineralogía (Craig & Vaughan, 1994)

Minerales Principales: Piritita, Esfalerita, Galena, Calcopiritita, Tetrahedrita.

Minerales Accesorios: Bornita, Calcocita, Enargita, Argentita, Oro nativo, Hematites, Pirrotina, Pirargirita, Sulfosales Pb-Bi-Sb.

Minerales Asociados: Cuarzo, Calcita, Dolomita, Barita, Fluorita, Rodocrosita, Siderita, Sericita.

Ejemplos:

- Coeur d`Alene, Idaho-USA; Linares-España.

- **Pórfidos**

El término pórfido se aplica a yacimientos relacionados con rocas intrusivas de composición intermedia a ácida, caracterizados por una intensa alteración de las rocas de caja, mineralizaciones diseminadas o en stockworks, bajas leyes y grandes reservas (Evans, 1993). Pueden contener sustancias variables como Cu, Mo, Au, Ag, Sn, Bi, etc., pero los más productivos actualmente desde el punto de vista minero son los de Cu (Au) y Mo.

Estos depósitos también se pueden definir (Lowell & Guibert, 1970) de la siguiente forma: “A copper and/or molybdenum sulfide deposit consisting of disseminated and stockwork veinlet sulfide mineralization emplaced in various host rocks that have been altered by hydrothermal solutions into roughly concentric zone patterns. The deposit is generally large, on scale of thousands of feet...and...is associated with complex, passively emplaced, stock of intermediate composition including porphyry units.” Los Pórfidos de Cobre y Molibdeno contribuyen aproximadamente con el 50 % y 70 % a las reservas mundiales de Cobre y Molibdeno, respectivamente. Actualmente se tiende a diferenciar también un tipo Cu-Au. Existen además, los pórfidos estanníferos, con casiterita y estannita, como minerales específicos.

Mineralogía -Pórfidos Cu-Au, Cu-Mo- (Craig & Vaughan, 1994).

Minerales Principales: Pirita, Calcopirita, Molibdenita, Bornita.

Minerales Accesorios: Magnetita, Hematites, Ilmenita, Rutilo, Enargita, Cubanita, Casiterita, Oro y Plata nativos, Sulfosales (Au, Ag, Se, Te, etc).

Minerales Secundarios: Covellina Hematites, Covellina, Calcosina, Cobre nativo, Digenita.

Ejemplos:

- Pórfidos de Cobre: Chuquicamata, Chile. Bisbee, Arizona-USA
- Pórfidos de Molibdeno: Climax, Colorado-USA; Toquepala, Perú.

• **Epitermales**

Los depósitos epitermales son el producto de actividad hidrotermal a profundidad someras (< 1 Km) y a bajas temperatura (50°C - 300°C), habitualmente relacionada con formaciones volcánicas (Guilbert & Park., 1997). La mayoría forman rellenos de filón, fisuras irregulares ramificadas, diseminaciones, stockworks o chimeneas en brecha, predominando el relleno hidrotermal en los tipos de baja sulfuración (BS) y la diseminación asociada a silicificación del encajante en los de alta

sulfuración (AS). Actualmente tiende a dissociarse de este grupo el tipo Carlin, antes integrado en él.

Mineralogía (Craig & Vaughan, 1994).

Minerales Principales: Pirita (AS-BS), calcopirita(AS-BS), Covellina(AS), Enargita(AS), Galena (BS), Esfalerita (BS), Sulfosales (Au, Ag, Se, Te, etc) (BS).

Minerales Accesorios: Óxidos de Fe y Mn, Magnetita, Hematites, Rutilo, Cubanita, Casiterita, Oro y Plata nativos. *Electrum*, Sulfosales de Ag, Seleniuros y Telururos de Au.

Minerales Secundarios: Covellina, Calcosina, Cobre nativo, Digenita.

Ejemplos:

- A.S.: Yanacocha, Perú; Rodalquilar, España.
- B.S.: Creede, Colorado-USA; Cabo de Gata-España.

- **Carlin**

Son yacimientos formados en ambientes relativamente profundos, en condiciones similares a los sistemas geotérmicos actuales. La mineralización se presenta favorecida por la fracturación y fallamiento de la roca de caja (principalmente carbonatada). Estos yacimientos se caracterizan por una alta relación (>20:1) Au / Ag.

Mineralogía (Craig & Vaughan, 1994).

Minerales Principales: Pirita, Calcopirita, Hematites. Goethita

Minerales Accesorios: Arsenopirita, Pirrotina, Jarosita, Oro nativo, *Electrum*.

Ejemplo:

- El yacimiento tipo es el de Carlin, Nevada-USA.

AMBITO SEDIMENTARIO

- **Vulcano Sedimentario (VMS)**

Los yacimientos exhalativos submarinos, de origen vulcano-sedimentario, son un caso especial (de transición), ya que los aportes térmicos y metálicos suelen ser endógenos (es decir, procedentes de rocas endógenas, aunque probablemente lixiviados por disoluciones hidrotermales con un importante componente de origen exógeno / marino, en la mayor parte de los casos), pero la concentración y precipitación están regidas por las condiciones de la cuenca sedimentaria y los minerales metálicos son singenéticos con respecto a las rocas de dicha cuenca.

Lydon (1988) distingue, por su composición y ámbito geológico, los tipos Zn-Pb-Cu y Cu-Zn, cuya diferencia esencial estriba en las proporciones relativas entre los distintos componentes, compartiendo la mayor parte de los minerales característicos: por ejemplo la galena, típica de las concentraciones Zn-Pb-Cu, aparece también en los yacimientos Cu-Zn, aunque solo como accesorio o incluso traza.

El tipo Cu-Zn corresponde a los sulfuros masivos asociados a formaciones máficas y ofiolíticas (I.5) y la proporción de pirrotina suele aumentar en cualquier tipo sometido a metamorfismo.

Mineralogía (Craig & Vaughan, 1994)

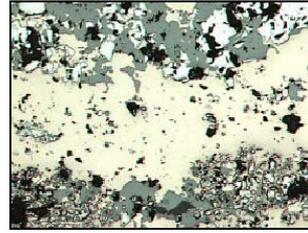
Minerales Principales: Pirita, Calcopirita, Esfalerita, Pirrotina, Galena*

Minerales Accesorios: Bornita, Tetrahedrita, oro/electrum, Arsenopirita, Marcasita, Cubanita, Bismutina, Bismuto nativo, Sulfosales (Au, Ag, Se, Te, etc), Casiterita

*solo en el tipo Zn-Pb-Cu.

Ejemplos:

- Tipo Pb-Zn-Cu: Río Tinto, Kuroko, Japón; Mt. Lyell, Australia.
- Tipo Cu ó Cu-Zn: Troodos, Chipre; Sulitjelma, Noruega; Arinteiro y Moeche, España.



Sulfuros masivos bandeados.

(Foto: Canet, M)

- **Yacimientos de Hierro Bandeado (BIF, Banded Iron Formations)**

Estos yacimientos ocurren en unidades estratigráficas con cientos de metros de espesor y cientos hasta miles de kilómetros cuadrados de extensión. Estos depósitos están caracterizados por ser comunes en las series sedimentarias de edad Precámbrica y por su fino bandeo mineralógico, definido por la alternancia de niveles milimétricos de hematites o magnetita con niveles de jaspe, filosilicatos o carbonatos ricos en Fe. Los BIF pueden ser subdivididos en dos grandes subgrupos:

- Tipo Algoma, típico de secciones de cinturones de rocas verdes, asociadas a sucesiones de greywackes y rocas volcánicas. Asociación volcánica. Predominan las facies oxidada, carbonatada y sulfurada.
- . Tipo Lago Superior, finamente bandeados, principalmente de las facies oxidada, carbonatada y silicatada, generalmente libre de material clástico. Formados netamente por precipitación química, formados en aguas someras de plataforma continental.

Mineralogía (Craig & Vaughan, 1994)**Minerales Principales:**Ganga, Hematites, Magnetita**Minerales Accesorios:** Siderita, pirita**Ejemplos:**

- Lago Superior, Minesota-Wisconsin-Michigan-Ontaro-Quebec; Hamersey Basis, Australia.

- **Yacimientos Cu-Pb-Zn en Rocas Sedimentarias**

La mayoría de estos depósitos ocurren en ambientes marinos no-volcánicos, con algunas variantes (shebkha, deltas, etc) o bien son epigenéticos frecuentemente en formaciones carbonatadas. Están ampliamente distribuidos en espacio y tiempo (Proterozoico-Terciario), y pueden variar su tonelaje de varios cientos de millones t a tamaños sub económicos. El Kupferschiefer consiste en delgadas alternancias de capas de carbonato, arcilla y materia orgánica, con enriquecimiento económico en Cu y Co y, a veces, EGP (Polonia). La formación del Copperbelt puede ser rica en Co (Republica Democrática del Congo).

Russel (1978) y Large (1992) han sugerido la existencia de un grupo de yacimientos que se forman en una cuenca sedimentaria como resultado de pronunciada actividad hidrotermal acompañada de rifting continental, lo denominan tipo SEDEX (Evans, 1993). Las rocas huéspedes de éstos son generalmente pizarras y carbonatos. Este tipo se distingue del tipo Mississippi Valley; asociado a rocas carbonatadas y de origen discutido, epigenético para muchos autores. La composición mineralógica de estos tipos tiene muchas similitudes aunque varíen las proporciones relativas de las distintas fases y, para el objeto de esta investigación, pueden considerarse conjuntamente.

Para descripción mineralógica de estos depósito se utilizarán los siguientes códigos: (1) para los Tipos SEDEX y Mississippi Valley y (2) para los Tipos Kupferschiefer y Copperbelt.

Mineralogía (Craig & Vaughan, 1994)

Minerales Principales: Galena (1), Esfalerita (1), Sulfosales (1), Calcopirita (2),
Bornita (2), Calcosina (2), Carrollita (2).

Minerales Accesorios: Barita (1), Cuarzo (1), Filosilicatos (1-2) Carbonatos (1),
Fluorita (1), Galena (2), Esfalerita (2), Pirita (1-2)

Ejemplos:

- SEDEX: Rammlsberg y Meggen, Alemania; Broken Hill y Sullivan, Australia (metamorfizados).
- Mississippi Valey: Tri-State y Viburnum-Trend, Missouri -USA.
- Kupferschiefer: Lubin, Polonia; Mansfeld, Alemania.
- Copperbelt: Mufulira-Zambia, Shaba-R.D. Congo.

• Yacimientos Detríticos

Son concentraciones de minerales densos, mecánicamente resistentes (no friables) y químicamente estables, formadas en la parte superficial de la corteza terrestre. Los principales procesos de concentración de estos yacimientos son: erosión, transporte (mecánico) y deposición, partiendo de formaciones pre-enriquecidas habitualmente.

Los minerales resistentes a la erosión por su dureza y estabilidad frente a la alteración química no se alteran y pueden ser movilizados por acción de la gravedad, viento o aguas superficiales, hasta que la energía del agente de transporte disminuye. La formación de este tipo de yacimientos puede ser considerada como efecto de los procesos de sedimentación y de diferenciación de los materiales según su volumen, densidad, resistencia mecánica y estabilidad química, produciéndose una concentración de los componentes pesados y resistentes en determinados niveles de los sedimentos (Vazquez, 1995). Los yacimientos detríticos formados en tiempos geológicos diferentes e incluidos en secuencias sedimentarias, posteriormente plegadas, metamorfizadas, etc., se consideran placeres fosiles o paleoplaceres.

Los yacimientos detríticos, habiendo sido formados como resultado de la acumulación mecánica de granos procedentes de depósitos preexistentes, pueden contener un amplio rango de minerales, de los cuales la mayor parte carece de interés económico y solo una pequeña proporción (cuantitativamente accesorios, en términos de composición modal) son explotables.

Mineralogía (Craig & Vaughan, 1994).

Minerales importantes: Ilmenita, Rutilo, Casiterita, Granate, Esfena, Oro nativo, *Electrum*, EGP, Uraninita, Piedras preciosas.

Minerales acompañantes: Hematites, Magnetita, Columbo-Tantalita.

Ejemplos:

- Placeres: Kivu, R.D. Congo (Columbo-Tantalita).
- Paleoplaceres: Witwatersrand, R.S. Africana (Oro nativo, Uraninita).

Otros minerales posibles (Freund, 1966) son: diamantes (Botswana , Namibia), scheelita, circón, monacita, granates y piroxenos. Los sulfuros raramente se concentran en estos yacimientos, debido a las condiciones ambientales actualmente predominantes (oxidantes), pero existen excepciones tanto en placeres precámbricos (Witwatersrand) como en algunos pequeños ejemplos recientes (Evans, 1993). Una clasificación simplificada de los depósitos detríticos se presenta a continuación . Las piedras preciosas no son objeto de este trabajo, ya que no se estudian por microscopía de reflexión. No obstante, esta técnica podría adaptarse a la detección de diamantes sometiendo la muestra a radiación de Rayos X para hacerlos visibles, gracias a sus propiedades luminiscentes, lo que se emplea en procesos de concentración mecanizada en minas de diamantes actuales (Ejemplo: Tanzania).

AMBIENTE	SUBAMBIENTE	PROD. PRINCIPALES	PROCESOS AMBIENTALES
	Eluvial.	Au, Pt, Sn, Au, Pt, Sn, WO ₃ , Ta, Nb, Ni, gemas.	Percolación de aguas, reacciones químicas y biológicas, calor, viento, lluvia.
Continental	Coluvial.	Au, Pt, Sn, WO ₃ , Ta, Nb, gemas.	Reptación superficial, viento, lavado por lluvias, congelamiento, elutriación.
	Fluvial / Aluvial	Au, Pt, Sn. <u>Menor:</u> WO ₃ , Ta, Nb, diamantes.	Rios y flujos de agua.
Transicional	Línea de playa.	Au, Ti, Zr, Fe, ReO, Pt, Sn.	Olas, corrientes, vientos, mareas.
Marino	Placeres sumergidos.	Au, Pt, Sn, diamantes. <u>Menor:</u> Ti, Zr, Fe, ReO.	Movimientos eustáticos, isostáticos y tectónicos. Alzamientos del N.M:

Clasificación de los depósitos detríticos. (Modificada de Edwards, R, & Atkinson, K. 1986).

- **Skarn**

Es una formación calcosilicatada que se produce en la zona de contacto entre intrusiones de granitoides (diversos períodos y ámbitos geológicos) y rocas sedimentarias carbonatadas. Estos depósitos se forman a elevadas temperaturas, con adición y sustracción de material (metasomatismo).

De entre las muchas clasificaciones de Skarns, destacamos la de Einaudi, Meinert y Newberry (1981.), en la que, utilizando el metal económicamente dominante, se proponen: los Skarns de Fe, W, Cu, Zn-Pb, Mo y Sn. Muchos depósitos originalmente clasificados dentro de los tipos antes mencionados son renombrados como skarn de Au si el contenido de este mineral sobrepasa 1 g /t (Meinert, 1992; Theodore, et al., 1991). La mineralogía de los skarn es amplia, por lo que las generalizaciones deben hacerse con mucho cuidado. La mineralogía que se presenta a continuación, limitada a las especies más comunes y de interés económico, se refiere a *Skarns* que son fuentes importantes de hierro, molibdeno, tungsteno, cobre y zinc.

Mineralogía (Craig, & Vaughan, 1994)

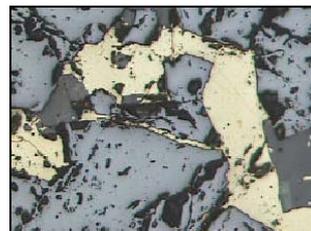
Minerales Principales: Magnetita, Molibdenita, Esfalerita, Galena, Calcopirita, Pirrotina, Pirita, Arsenopirita, Wolframita, Scheelita.

Minerales Accesorios: Pirrotina, Casiterita, Hematites, Oro y Plata nativos, Bismuto nativo, Sulfosales (Au, Ag, Se, Te, etc).

Minerales Asociados: Cuarzo, Granates, Anfíboles, Piroxenos, Calcosilicatos, Olivinos, Talco, Anhidrita.

Ejemplos:

- Carlés (Au-Cu), Asturias-España;
- Eagle montain (Fe), (California-USA);
- Tintaya (Cu-Au), Perú,
- Christmas (Cu), New Mexico-USA,



Magnetita y calcopirita.

Carlés. España.

- **En “Greenstone belts” y Terrenos Metamórficos**

Los yacimientos que englobamos en este grupo se caracterizan por su relación con el metamorfismo (metamorfogénicos). No vuelven a tratarse aquellos que ya habiéndose formado con anterioridad han sufrido cambios metamórficos (yacimientos metamorfizados, que pueden comprender cualquiera de las clases anteriormente tratadas). La diferencia entre ambos tipos no siempre es clara, ya que las menas metálicas son muy sensibles al metamorfismo.

Los cinturones de rocas verdes (“greenstone belts”) son formaciones privilegiadas en la historia terrestre por su riqueza en concentraciones auríferas. Aunque la génesis de éstas es discutida, es clara su relación con el metamorfismo y deformación del encajante, por lo que parece apropiado tratarlos en este apartado. Su génesis suele estar relacionado con la aparición de zonas de cizalla -oro orogénico-, pero también con otros factores como la presencia de diques, pórfidos, intrusiones ácidas, el volcanismo ácido o la abundancia de series detríticas (grauwacas, pizarras, etc). Dado que los Sulfuros masivos y las Itabiritas (taconitas) son equivalentes metamórficos de los ya tratados (8), no se analizan individualmente en este apartado, sino que se indican únicamente algunas variaciones específicas.

Mineralogía (Craig & Vaughan. 1994)

Minerales Principales: Pirita, Marcasita, Arsenopirita, Pirrotina

Minerales Accesorios: Galena, Esfalerita, Calcopirita, Estibina, Tetrahedrita, Oro y Plata nativos.

Minerales Asociados: Cuarzo, carbonatos.

-Sulfuros masivos: (+ Pirrotina)

-Itabiritas o BIF: (+ Hematites, Magnetita, Pirita, Calcopirita, Pirrotina)

Ejemplos:

- Oro orogénico o ligado a zonas de cizalla: Abitibi Belt, Ontario-Canadá.

Anexo 2
Descripción de probetas

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 01-07-2003 Número de probeta: HD 6896
 Yacimiento de Origen: Sudbury Tipo: Serie Magmática

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Pirrotina, pentlandita, magnetita

Componentes Accesorios: Ilmenita, calcopirita, espinela, esfalerita, galena

Textura: Masiva-granoblástica (po), llamas (pent)

Observaciones: Necesita repulido muy fino y suave. Masa pirrotina granoblástica con inclusiones frecuentes. Pentlandita bandeada o en fisuras. Magnetita con exoluciones de uv, a veces rodeada de espinela (espinela-cromita?) y esfalerita. Ilmenita interfase mg-po

Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena masiva po.pentl-ccp

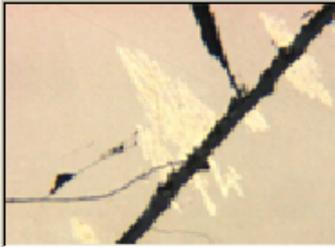
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 1 de 5 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 01_07-2003 Número de probeta: HD 6858
 Yacimiento de Origen: Agracha, Sahara Español Tipo: Serie Magmática

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Magnetita, ilmenita

Componentes Accesorios: Hematita, limonita, espinela, ulvita

Textura: Granuda, con finas exsols lam. en mag

Observaciones: Mal pulido, necesario repulir. La magnetita domina pero está parcialmente martitizada y limonitizada, con muchas inclusiones diminutas de espinela y ulvita o ulvoespinela?. Ilmenita con típicas y bellas maclas. Muestra poco adecuada para ADI

Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mineralización mag-il (en gabro)

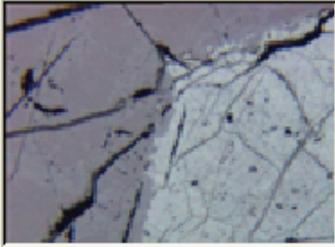
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 2 de 5 (Filtrado)

Ficha minerales1 [Minimizar] [Maximizar] [Cerrar]

Generalidades

Fecha: 01-07-2003 Número de probeta: HD 6771

Yacimiento de Origen: Horbach, Schwarzbald Tipo: Serie Magmática

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga, pentlandita, marcasita, pirrotina, bravoita, calcopirita.

Componentes Accesorios: Linneita (violarita), pirita

Textura: Masiva a Diseminada, Seudomorfa

Observaciones: Muestra difícil de reconocer debido a los finos intercrecimientos. Pentlandita alterada a bravoita y linneita. Pirrotina acompaña a la pentlandita y otras veces en desmesclas. "llamas".

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Mena Sulfurada de Ni-Cu en rocas máfica:

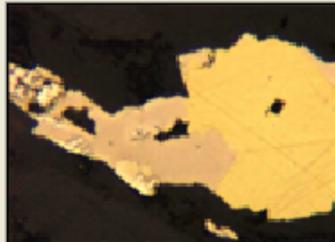
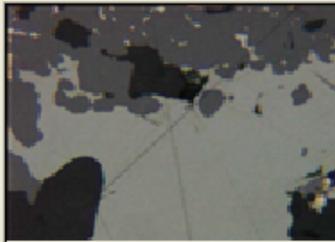
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 3 de 5 (Filtrado)

Ficha minerales1 [Minimizar] [Maximizar] [Cerrar]

Generalidades

Fecha: 01-07-2003 Número de probeta: HD 6770

Yacimiento de Origen: Friedberg, Hungen Tipo: Serie Magmática

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Limonita, goethita

Componentes Accesorios: Pirita, calcopirita

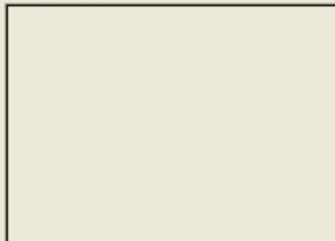
Textura: masiva (limonita)

Observaciones: La textura de la goethita es botrioidal fibrosa-radiada muy típica. La limonita es amorfa masiva con r.i. omnipresentes amarillentas con R < y zonas más cristalinas de goethita botrioidal (r.i mas rojizas)

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Masa limonítica (laterítica parte recristaliz

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 4 de 5 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 01-07-2003 Número de probeta: HD 6764
Yacimiento de Origen: Abu - Galga, Egipto Tipo: Serie Magmática

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ilmenita, magnetita, ganga

Componentes Accesorios: Hematita, limonita, goethita, pirotina, pentlandita, espinela

Textura: Granoblástica (il). Exol. Laminares(Mag)

Observaciones: Muy buen pulido, Ilmenita típica. Exol magnetita en laminas finas. Pirotina incluida en ilmenita. Limonita en fisuras y poros, aveces con cristalización fibrosa radiada de goethita. Gg y ru +/- espinela intersticiales.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Mena il-mag, ligeramente oxidada

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 5 de 5 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 773

Yacimiento de Origen: Kropfmühl, passau Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Grafito, pirrotina

Componentes Accesorios: Rutilo, pirita, esfalerita

Textura: Diseminada orientada

Observaciones: Como paragénesis metamórfica pueden citarse grafito, rutilo y pirrotina. Escasos vestigios de pirita y esfalerita (diseminada). Ejemplos típicos de grafito laminar (igual que HD 773).

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Roca metamórfica con gra-ru y sulf. Disem

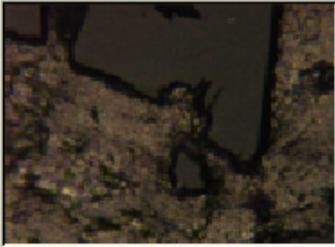
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 1 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 775

Yacimiento de Origen: Kropfmühl, Passau Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Pirrotina, grafito

Componentes Accesorios: Rutilo, pirita, marcasita

Textura: Diseminada

Observaciones: Como paragénesis metamórfica pueden citarse grafito, rutilo y pirrotina. Escasos vestigios de pirita con marcasita asociada. Ejemplos típicos de grafito laminar (igual que HD 773).

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Roca metamórfica con gra-ru y sulf. Disem

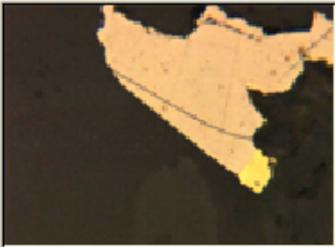
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 2 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 1146
 Yacimiento de Origen: Boliden, Suecia Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Esfalerita, pirita
 Componentes Accesorios: Calcopirita, galena, magnetita, Ag nativa
 Textura: Sulfuro masivo esfalerítico
 Observaciones: Muestra tipo genética similar a HD 1002 pero: deformada y recristalizada (pirita), más rica en esfalerita que parece en gran parte secundaria (reemplaza a pirita). Galena y calcopirita diseminada o incluida en esfalerita y pirita. Mag. Incluida en Esf.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Sulfuro masivo esfalerítico

Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 3 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 1002
 Yacimiento de Origen: Boliden, Suecia Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Pirita, pirrotina, esfalerita, ganga
 Componentes Accesorios: Calcopirita, galena
 Textura: Granoblastica dominada por pirita
 Observaciones: Dentro de la textura es de mencionar la ligera cataclasis (pirita, galena, calcopirita y otros) + ganga y otros sulfuros intersticiales.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Meta pirita (sulfuros masivo metamórfico)

Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 4 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 1336
 Yacimiento de Origen: Ammerberg, Nygruban, Suec Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Esfalerita, ganga(carbonato)
 Componentes Accesorios: Galena, pirita, calcopirita
 Textura: Diseminada, en parte poikoblastica
 Observaciones: Finos intercrecidos con ganga. Yacimiento puro de Zn de formación neumatolítica de contacto. (SHERNEIDERHOEHN, 1962).
 Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Roca calcosilicatada (skarn). Diseminación

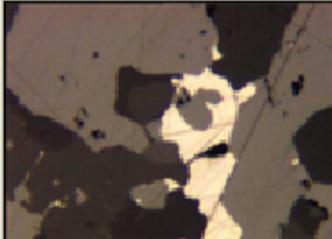
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 5 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

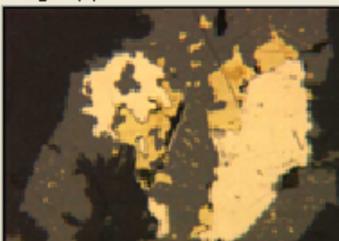
Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 1626
 Yacimiento de Origen: Bayerland, Alemania Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Magnetita, calcopirita, pirita
 Componentes Accesorios: Esfalerita, pirotina, ilmenita, galena, rutilo, tetrahedrita
 Textura: Grano poikiloblástica
 Observaciones: Típica muestra para confundir magnetita, ilmenita y esfalerita. Dos fases de mineralización: a) oxi (mag-ilm). b1) sulfuros que corroen (a). b2) ccp-sp, con gn, po y thd subordinadas. Sucesión típica de skarn.
 Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Skarn de Mag-Ilm-Sulfuros

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 6 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 1217b
 Yacimiento de Origen: Monteneve/Schneeberg,Tir Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Cubanita, esfalerita, ganga (cuarzo y carbonato)

Componentes Accesorios: Calcopirita, galena, tetrahedrita, marcasita, pirrotina.

Textura: Diseminada y finamente intercrecida.

Observaciones: Similar a HD 1217 pero peor pulida. La esfalerita se presenta de forma más clara, no así la cubanita.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Mena esfalerita y cubanita

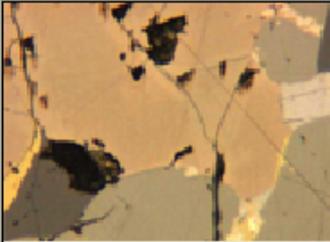
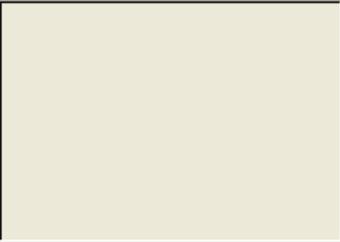
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 7 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 1217
 Yacimiento de Origen: Monteneve/Schneeberg,Tir Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Cubanita, esfalerita, ganga (cuarzo y carbonato)

Componentes Accesorios: Calcopirita, galena, tetrahedrita, marcasita, pirrotina.

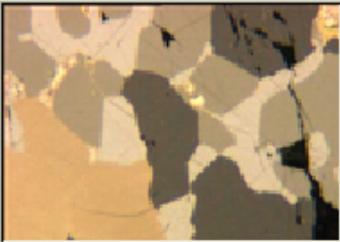
Textura: Diseminada y finamente intercrecida.

Observaciones: La textura tiene tendencia granoblástica. Probeta repulida (0.25 micras). Cubanita con típico color y maclas (polisintéticas irregulares) y colores de anisotropismo gris-azulados vivos. Los demás sulfuros aparecen dispersos en agregados.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Mena esfalerita y cubanita

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 8 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 1280
 Yacimiento de Origen: Mitterberg, Salzburg, Austria Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Gersdorffita, ganga (carbonato)
 Componentes Accesorios: Rutilo, linneita

Textura: Diseminada. Poik. o Poikilob./Granob.
 Observaciones: Gersdorffita abundante diseminada en ganga carbonatada. Rutilo (gris, anisotropo, maclas, r.i. Abundantes acarameladas). Linneita (mineral blanco, isótropo, idiomorfo y corroído). Posiblemente polydimita o siegenita en linneita.

Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Filón Carbonato-gersdorffita

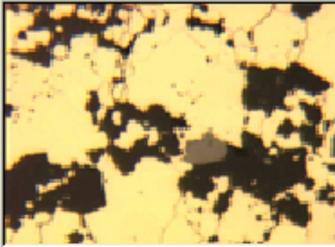
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 9 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 713
 Yacimiento de Origen: Mitterberg, Salzburg, Austria Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Calcopirita, gersdorffita, ganga
 Componentes Accesorios: Pirita, esfalerita, galena

Textura: Masiva (ccp-gg) con dism. Otros sulf.
 Observaciones: Calcopirita masiva anisótropa, con muchas inclusiones de grafito y pirita. Gersdorffita con mucho menos relieve que pirita. Galena y esfalerita como raras inclusiones en calcopirita. Marcasita solo en trazas.

Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Filón de sulfuros y sulfosales

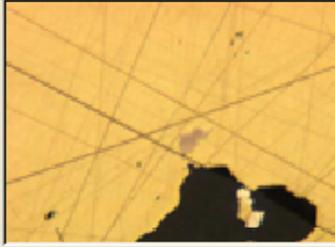
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 10 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 708

Yacimiento de Origen: Mitterberg, Salzburg, Austria Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Gersdorffita, calcopirita, ganga (cuarzo y carbonato)

Componentes Accesorios: Millerita, bornita, bismuto nativo

Textura: Bandeada

Observaciones: La gersdorffita es la mena más abundante, aparece en bandas con calcopirita asociada o en inclusiones. Fácil de reconocer por su color blanco puro (aceite). La millerita como interfase entre ccp y graf. Bismuto (amarillo crema) como inclusiones de ger.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Filón de cuarzo y grafito

Imagen (a)



Imagen (b)

Registro: 11 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 707

Yacimiento de Origen: Mitterberg, Salzburg, Austria Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga (carbonatos)

Componentes Accesorios: Calcopirita, pirita

Textura: Relleno filoneano (Carb. con sul. Dis.)

Observaciones: Calcopirita maclada anisótropa (con color pálido, pero sin anisotropismo de millerita), con relictos escasos de pirita (corroides)

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Filón carbonatos y calcopirita

Imagen (a)

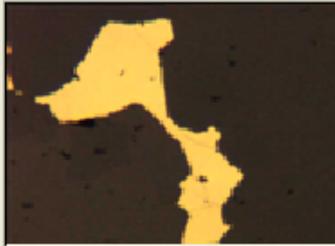


Imagen (b)



Registro: 12 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 02-07-2003 Número de probeta: HD 6666
 Yacimiento de Origen: Liberia Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Magnetita, silicatos

Componentes Accesorios: -

Textura: Grano poikiloblástica, bandeada

Observaciones: Inclusiones diminutas pero frecuentes de magnetita en ganga y viceversa determinan textura poikiloblástica. Alternan bandas ferríferas y silicatadas.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Itabirita de mg

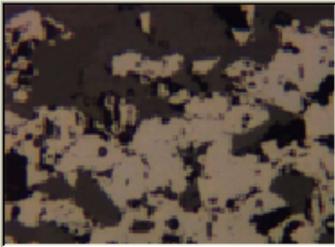
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 13 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 6748
 Yacimiento de Origen: Bayerland, Alemania Tipo: Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga (cuarzo), glaucodota, tetrahedrita, bourmonita, goethita

Componentes Accesorios: Esfalerita, pirita, rutilo

Textura: Diseminada. Gra. poikolo/diablástica

Observaciones: Mineralización dispersa intercrecida con ganga (sobre todo glaucodota y bourmonita)

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Fase sulfurada (Cu-Zn) de Skarn

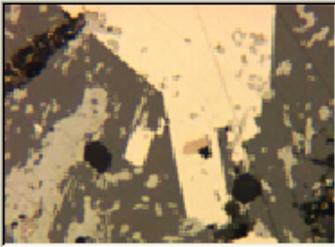
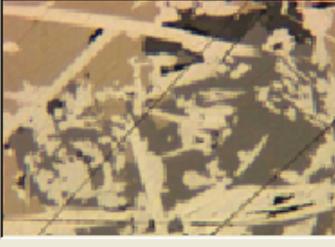
Imagen (a) 

Imagen (b) 

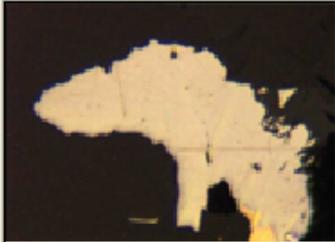
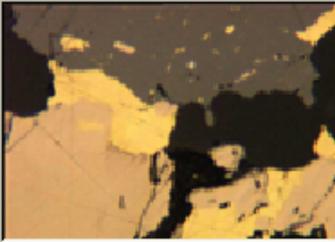
Registro: 14 de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha	02-07-2003	Número de probeta	HD 1631
Yacimiento de Origen	Bayerland, Alemania	Tipo	Serie Metamórfica

Descripción Mineralógica

<p>Componentes Principales</p> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; min-height: 20px;">Calcopirita, pirrotina, pirita, esfalerita</div> <p>Componentes Accesorios</p> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; min-height: 20px;">Marcasita, boulangerita (falkmannita), jamsonita, magnetita</div> <p>Textura</p> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; min-height: 20px;">Diseminada. Gra. poikolo/diablástica</div> <p>Observaciones</p> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; min-height: 40px;">Mineralización dispersa intercrecida con ganga (sobre todo esfalerita en agregados diablásticos). Pirita en grandes cristales a veces con tono rosado. Esfalerita dispersa. Jamsonita con maclas polisintéticas y pleocroísmo.</div> <p style="text-align: right;">Buena Calidad de Pulido <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Clasificación</p> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; min-height: 20px;">Fase sulfurada (Cu-Zn) de Skarn</div>	<p>Imagen (a)</p>  <p>Imagen (b)</p> 
--	---

Registro: de 15 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 6765
 Yacimiento de Origen: Teufelsgrund, Alemania Tipo: Serie Metamórfica (typical veins)

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Marcasita, pirita, ganga (cuazo y carbonato), esfalerita, galena
 Componentes Accesorios: Calcopirita, goethita
 Textura: Masiva parcialmente bandeada (mc)
 Observaciones: Muy buen pulido, abundante masa de marcasita (>70%).
 Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Mena de Zn

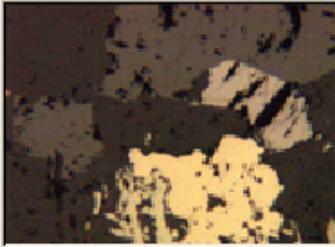
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 1 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 6023
 Yacimiento de Origen: Wölsendorf, Bavaria, Alemaia Tipo: Serie Metamórfica (typical veins)

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga (carbonato, cuarzo), goethita, uraninita (pitchblenda), eskuterudita.
 Componentes Accesorios: Pirita, esfalerita, marcasita
 Textura: Diseminada
 Observaciones: Buen ejemplo de uraninita (pitchblenda) con textura coloformes, zonación y halos de alteración. Además, aparece como granos esféricos con inclusiones de pirita y marcasita.
 Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Filón Pitchblenda

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 2 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 6794

Yacimiento de Origen: Zobes, Saxony Tipo: Serie Metamórfica (typical veins)

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga (carbonato), goethita

Componentes Accesorios: Pirita, pirrotina, rammsbergita, calcopita, hematites, safflorita

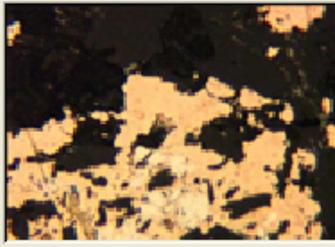
Textura: Diseminada

Observaciones: Probeta a tomar en cuenta por la variedad de mineralización que presenta aunque el tamaño de las fases es relativamente pequeño. Repulir.

Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena de Bi-Co-Ni

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 3 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 6872

Yacimiento de Origen: Wittichen, Black Fores, Alen Tipo: Serie Metamórfica (typical veins)

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga (carbonato y cuarzo)

Componentes Accesorios: Pitchblenda (uraninita), pirita, pirrotina, esfalerita y gohetita

Textura: Diseminada

Observaciones: Presencia de un masa de uraninita con sus características típicas. Resto de mineralizaciones diseminadas en la ganga. Mal pulido de la probeta.

Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena de U

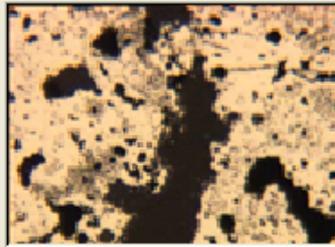
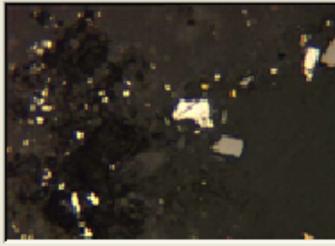
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 4 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 6767
 Yacimiento de Origen: Schneeberg, Saxony Tipo: Serie Metamórfica (typical veins)

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga (carbonato), parammelsbergita, safforita, boulangerita
 Componentes Accesorios: Eskuterudita, calcopirita
 Textura: Diseminada
 Observaciones: Observable la Safforita como cristales de forma de estrella rodeados y reemplazados por eskuterudita. Importante repulir.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena de Co

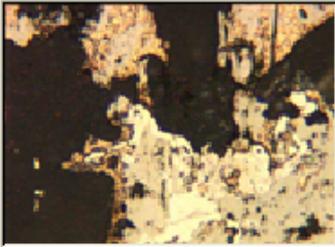
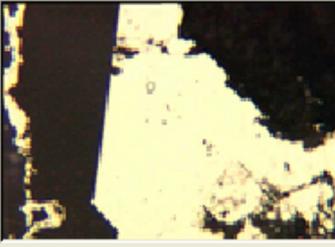
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 5 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 6672
 Yacimiento de Origen: Chritian Levin, Essen Tipo: Serie Metamórfica (typical veins)

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Galena, ganga (cuarzo)
 Componentes Accesorios: Esfalerita, calcopirita, pirrotina
 Textura: Diseminada
 Observaciones: Galena es la fase mineral más abundante, la mineralización se encuentra diseminada en cuarzo. Pulido medio de la probeta -repulir- para su utilización en ADI.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena de Pb

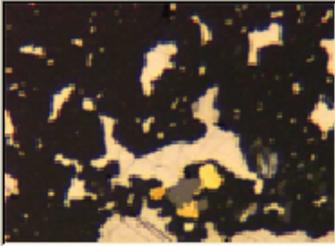
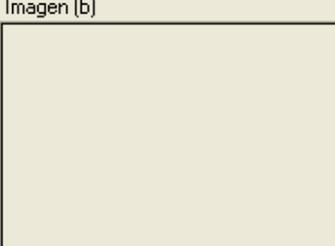
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 6 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 6790
 Yacimiento de Origen: Schnckenstein, Saxony Tipo: Serie Metamórfica (typical veins)

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Pirita, arsenopirita y arsenico
 Componentes Accesorios: -

Textura: Masiva

Observaciones: Domina la pirita y arsenopiritas masivas masiva. Muestra con mal pulido, necesario repulir.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Mena de Bi-Co-Ni

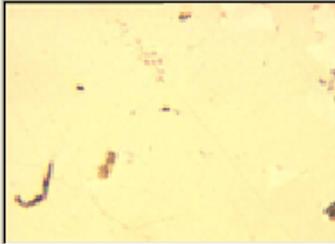
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 7 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 6790
 Yacimiento de Origen: Schnckenstein, Saxony Tipo: Serie Metamórfica (typical veins)

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Pirita, arsenopirita y arsenico
 Componentes Accesorios: -

Textura: Masiva

Observaciones: Domina la pirita y arsenopiritas masivas masiva. Muestra con mal pulido, necesario repulir.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Mena de Bi-Co-Ni

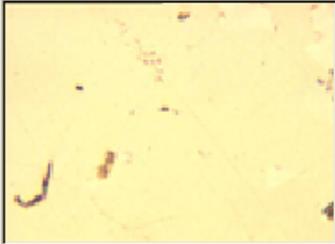
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 7 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 6031
 Yacimiento de Origen: Braubach (Rhine) Tipo: Serie Metamórfica (typical veins)

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Galena
 Componentes Accesorios: Pirita
 Textura: Masiva
 Observaciones: La probeta es en un 99,9 % galena. Aunque la galena se pule mal, el pulido de esta probeta es pésimo. Un repulido podría general que la probeta por su homogeneidad sea utilizada como patron de referencia.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena de galena

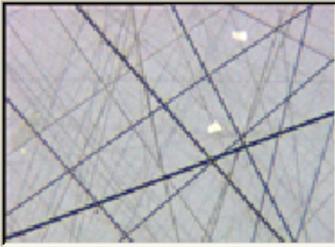
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 9 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 6167
 Yacimiento de Origen: Richlsdorf, Hessen, Alemani Tipo: Serie Metamórfica (typical veins)

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Nicolita
 Componentes Accesorios: Ganga (cuarzo)
 Textura: Masiva
 Observaciones: LA primera obsevación de esta probeta nos puede llevar a pensar la existencia de dos fases minerales principales (Pirrotina y pentlandita), mas un análisis exhaustivo nos permite determinar que es solo una fase "Nicolita".
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Filón de Co-Ni

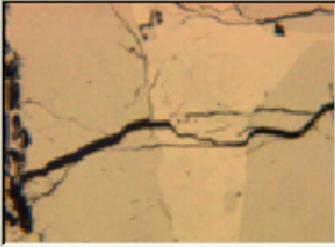
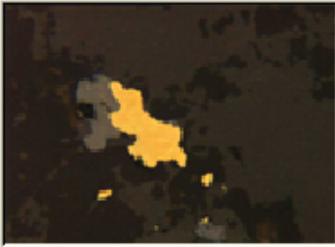
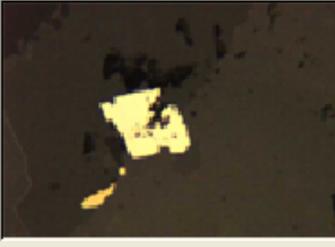
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 10 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1	
Generalidades	
Fecha	10-07-2003
Número de probeta	HD 136
Yacimiento de Origen	Gosenbach, siegen, Aleman
Tipo	Serie Metamórfica (typical veins)
Descripción Mineralógica	
Componentes Principales	Ganga (carbonato -siderita- y cuarzo)
Componentes Accesorios	Calcopirita, pirita, esfalerita
Textura	Masiva, posible relleno hidrotermal
Observaciones	Buen pulido y posibilidad de tomar buenas imágenes de los minerales presentes. La siderita es la fase más abundante de las otras presentes en la probeta.
Buena Calidad de Pulido	<input checked="" type="checkbox"/>
Clasificación	Filón siderita - sulfuros
	Imagen (a)
	
	Imagen (b)
	
Registro:	11 de 11 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 6185
 Yacimiento de Origen: Altenberg, Aachen Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Marcasita
 Componentes Accesorios: Ganga (cuarzo)
 Textura: Masiva
 Observaciones: La textura podría considerarse como: Fibrosa - Radiada (mayores diámetros), Diablástica (menor diámetro- agregados inter.)
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena masiva de sulfuro

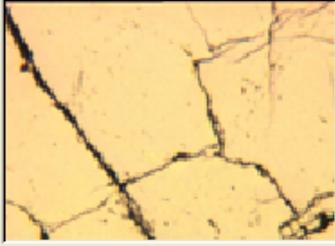
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 1 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-05-2002 Número de probeta: HD 6775
 Yacimiento de Origen: Rammelsberg Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Esfalerita, galena,pirita, pirrotina, calcopirita
 Componentes Accesorios: Marcasita y ganga
 Textura: Bandeada
 Observaciones: Mena bandeada, con bandas de esfalerita dominantes y galena subordinada. Parte de la pirita bandeada y otra diseminada en esfalerita. Pirrotina en laminillas, Calcopirita "disease". Esfalerita ferifera. La mena pudo haber sufridrido metamorfismo.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Kiesiges braunerz de esfalerita

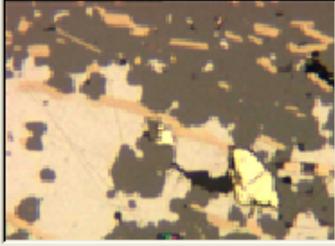
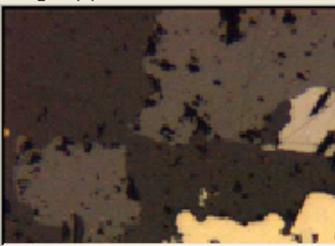
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 2 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-05-2002 Número de probeta: HD 6153
 Yacimiento de Origen: Banderz Rammelsberg Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga, esfalerita, marcasita, calcopirita, galena
 Componentes Accesorios: Tetrahedrita, plata nativa
 Textura: Esquistosa bandeada y recristalizada
 Observaciones: Plata con marcasita incluida en pirita. (bien visible). Texturas framboidales y fósiles (baraquiópodos?). Esfalerita acaramelada con reflexiones internas verdosas (cadmio)
 Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Banderz de esfalerita

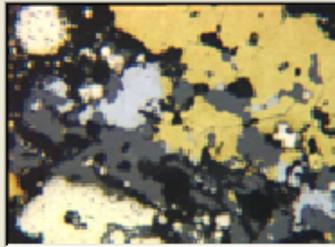
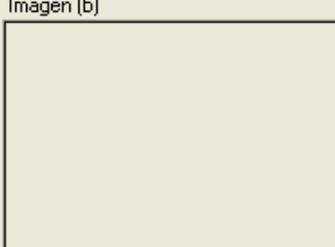
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 3 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-05-2002 Número de probeta: HD 6780
 Yacimiento de Origen: Banderz Rammelsberg Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Calcopirita, ganga, esfalerita, pirita
 Componentes Accesorios: Marcasita, galena, boulangetria, oro nativo, plata
 Textura: Esquistosa bandeada recristalizada
 Observaciones: Plata nativa incluida en calcopirita. Oro nativo: 2 cristales de aprox 10-20 um con galena y esfalerita, rellenando microfisura en pirita cristalina. Restos fósiles (fibrosos-radiados) piritizados.
 Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Banderz de calcopirita esfalerita

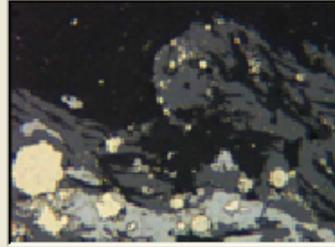
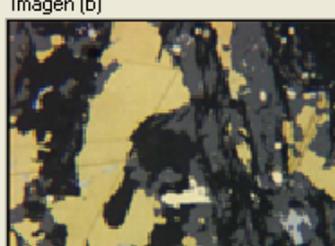
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 4 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-05-2002 Número de probeta: HD 673
 Yacimiento de Origen: Mansfeld Thälmannschacht Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Calcosina, bornita, linneita
 Componentes Accesorios: Covellina, digenita, calcopirita, piritita
 Textura: Diseminada, tendencia bandeada
 Observaciones: Observable zonado neto: calcosina centro, luego fina orla de linneita y finalmente bornita. Otros procesos (diagenéticos?): masas cs intercrecidas con linn rodeados por bn. Ccp,dig y py adaptados a orientación roca. Probeta repulida.
 Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Kupferschiefer

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 5 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-05-2002 Número de probeta: HD 1222 b
 Yacimiento de Origen: Eisleben Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Maucherita, arsenico nativo, rammelsbergita
 Componentes Accesorios: Eskutterudita, boulangerita, loellingita, niquelina, uranita
 Textura: Masiva, probable relleno filoniano
 Observaciones: Espectaculares estructuras dendríticas o esqueletiformes As-rmb, está con boulangerita (?) y loellingita (?) asociados (muy subordinados). As nativo con típica alteración superficial oculta propiedades.
 Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Veta (?) maucherita arsénico rammelsbergi

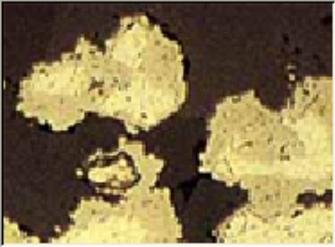
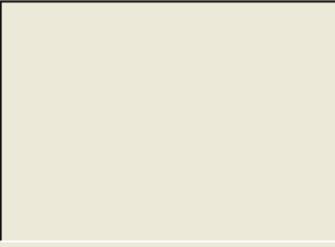
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 6 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-05-2002 Número de probeta: HD 6679

Yacimiento de Origen: Rammelsberg Melierterz Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Galena, esfalerita, pirita, marcasita

Componentes Accesorios: Bounonita, tetrahedrita, calcopirita, ganga

Textura: Bandeada masiva con removilización

Observaciones: Colores anómalos pirita y galena por posible oxidación superficial. Maracasita secundaria.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Mena de Pb-Zn Ag

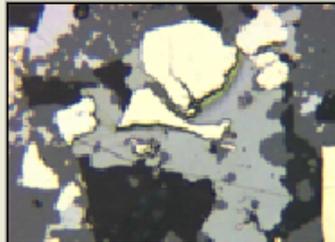
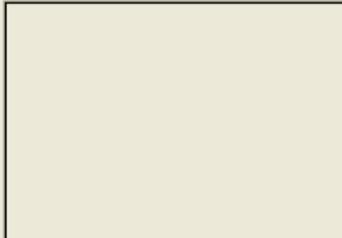
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 7 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-05-2002 Número de probeta: HD 6779

Yacimiento de Origen: Rammelsberg Melierterz Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Esfalerita, galena, pirrotina, marcasita

Componentes Accesorios: Calcopirita, pirita, ganga (cuarzo)

Textura: Bandeada y orientada

Observaciones: Colores anómalos pirita y galena por posible oxidación superficial. Maracasita secundaria.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Mena de Pb-Cu-Zn

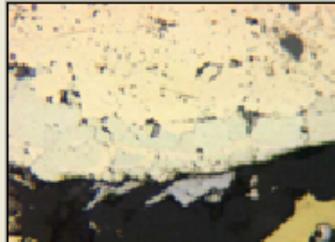
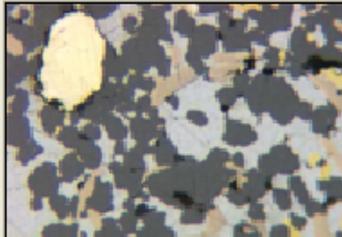
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 8 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-05-2002 Número de probeta: HD 6777
 Yacimiento de Origen: Rammelsberg Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga, esfalerita, galena, pirita
 Componentes Accesorios: Calcopirita, magnetita, burnonita
 Textura: Diseminada, tendencia bandeada
 Observaciones: Domina la esfalerita como principal sulfuro, con galena, burnonita, magnetita y calcopirita asociada. La magnetita finamente intercrecida con esfalerita.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Grauerz bario esfalerita

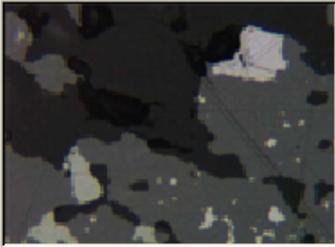
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 9 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

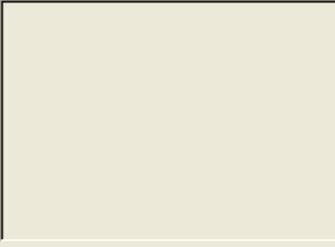
Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 10
 Yacimiento de Origen: Wiesloch, Baden Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Esfalerita, jordanita, gratonita
 Componentes Accesorios: Geocronita, melnicovita, As nativo, galena, pirita
 Textura: Coloforme(sp) y dendrítica (jd)
 Observaciones: Muestra repulida. Similar a HD 8. Masa coloforme de sp "schalenblende", con espectaculares texturas concéntricas; esta masa (brechificada y cementada pos sp más clara) incluye ge, gr, jd, As y gg.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena sp - jd

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 10 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales 1

Generalidades

Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 6769
 Yacimiento de Origen: Maucher Bleiberg Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Galena
 Componentes Accesorios: Esfalerita, pirita, bravoita
 Textura: Diseminada. (gn inters. en arenisca)
 Observaciones: Mineralización dominada por galena menos 5% de la roca (arenisca). Esfalerita frecuente, pirita idiomorfa. Bravoita escasa y aparece como zonas en pirita (nucleo y periferia).
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Arenisca con impreg gn y sulfs. Intersticial

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 11 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales 1

Generalidades

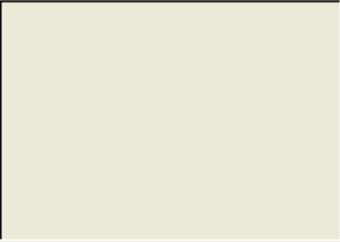
Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 863
 Yacimiento de Origen: Idria, Yugoslavia Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Cinabrio
 Componentes Accesorios: Pirita, calcopirita
 Textura: Diseminada y finas vetillas
 Observaciones: Cinabrio presente en forma masiva.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena de Hg

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 12 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-07-2003 Número de probeta: HD 897
 Yacimiento de Origen: Richelsdorf Kupferschiefer Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga (carbonato y cuarzo)
 Componentes Accesorios: Pirita, calcopirita, esfalerita, galena, bornita, calcosina y covellina
 Textura: Diseminada
 Observaciones: Calcopirita frecuentemente diseminada. Posible bornita en granos dispersos. Mineralización similar a la encontrada en HD 6615.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Kupferschiefer calcopirítico

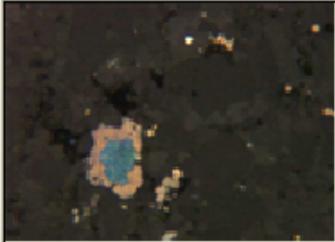
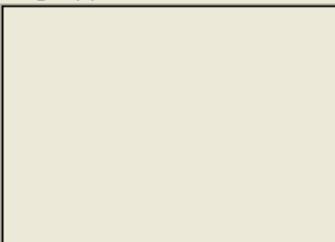
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 13 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 1060
 Yacimiento de Origen: Harzburg Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Magnetita, ganga (siderita)
 Componentes Accesorios: Pirita
 Textura: Masiva bandeada, geanoblástica
 Observaciones: Domina magnetita masiva, con interst. Ganga y lenticulas de pirita. Recristalización magnetita granoblástica.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena Magnetítica

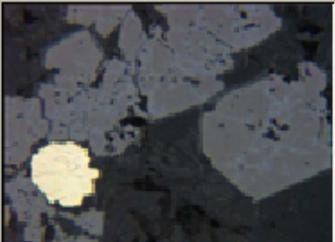
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 14 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 6615
 Yacimiento de Origen: Richelsdorf Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga silicatada y carbonatada, materia orgánica carbonificada

Componentes Accesorios: Calcopirita, (anat-ru), galena, bornita, esfalerita, bourmonita, piritita

Textura: Diseminada

Observaciones: Calcopirita frecuentemente diseminada. Mins ti hidrotermales (anat-ru, leucox) frecuentes, asociados a sulf. Reconocibles por (r.i blancas y R rel. Altas). Posible bornita en granos dispersos. Bourmonita reconocible por maclas.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Kupferschifer calcopirítico

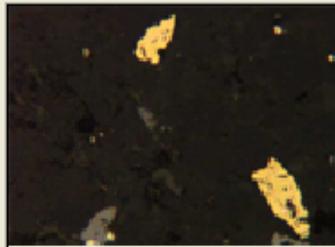
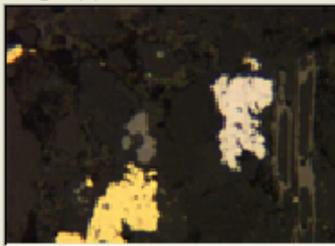
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 15 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 6800
 Yacimiento de Origen: Ramsbeck, Wettf. Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Ganga (cuarzo y carbonato), boulangerita

Componentes Accesorios: Trazas de: piritita, calcopirita, galena

Textura: Masiva (relleno filoniano?)

Observaciones: Conviene confirmar la boulangerita, aunque las propiedades visibles son típicas (reflectancia, color, pleocroísmo, etc) más, por estar aislada, las obs pudesden ser poco objetivas (confirmar MEB)

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Relleno filoniano q+carb, con diseminaciór

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 16 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 10-05-2003 Número de probeta: HD 1222
 Yacimiento de Origen: Eisleben Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Maucherita, arsénico nativo, Rammelsbergita

Componentes Accesorios: Eskutterudita, boulangerita, loellingita, níquelina, uranita(?)

Textura: Masiva, relleno hidrotermal

Observaciones: Espectaculares estructuras dendríticas (As-Rmmb) con boul(?) y loell(?). As nativo con alt. Sup. Mauch. bien caracterizada (blanco-rosa). Rmmb. Blanca con maclas polisintéticas constantes. Eskuterudita (isótropa y morf. cúbica).

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Veta Mauch-As-rmmbg.

Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 17 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 6199
 Yacimiento de Origen: Ramsbeck, Westf. Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Esfalerita, pirita, galena, calcopirita

Componentes Accesorios: Arsenopirita, bournonita

Textura: Masiva bandeada. Ligte: cataclástica

Observaciones: Domina esfalerita masiva, con "calcopirita disease" generalizada. Pirita en fenocristales o agreg cristalinos diseminados en esfalerita y aveces intercrecida con arsenopirita(?) ó Rammsb(?). Bournonita típica con maclas parquet.

Buena Calidad de Pulido

Clasificación: Mena masiva sp-gn

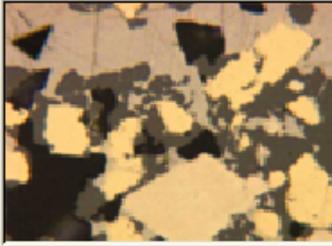
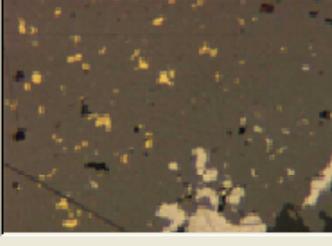
Imagen (a) 

Imagen (b) 

Registro: 18 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 6102
 Yacimiento de Origen: Maucher Bleiberg Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Galena, ganga (cuarzo)
 Componentes Accesorios: Esfalerita, bravoita, calcopirita, marcasita
 Textura: Diseminada. (gn inters. en arenisca)
 Observaciones: Mineralización dominada por galena menos 5% de la roca (arenisca). Galena tardía, intersticial que corroe el cuarzo. Bravoita con marcado zonado (ahora no se considera como una especie mineral propia). Esfalerita asociada a galena, Calcopirita dispersa.
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Arenisca con impreg gn y sulfs. Intersticial

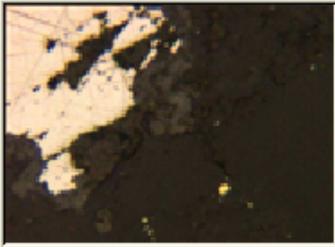
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 19 de 20 (Filtrado)

Ficha minerales1

Generalidades

Fecha: 30-06-2003 Número de probeta: HD 08
 Yacimiento de Origen: Wiesloch, Baden Tipo: Serie Sedimentaria

Descripción Mineralógica

Componentes Principales: Esfalerita, jordanita
 Componentes Accesorios: Geocronita, gratonita, melnicovita, As nativo, galena, pirita
 Textura: Coloforme(sp) y dendrítica (jd)
 Observaciones: Muestra repulida. Masa coloforme de sp "schalenblende", con espectaculares texturas concéntricas; esta masa (brechificada y cementada pos sp más clara) incluye ge, gr, jd, As y gg). Además, melhocovita (variedad de pirita).
 Buena Calidad de Pulido:

Clasificación: Mena sp - jd

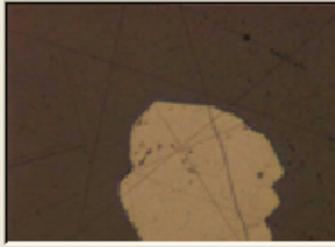
Imagen (a): 

Imagen (b): 

Registro: 20 de 20 (Filtrado)

Anexo 3
Macros

'Ventana para seleccionar Depósitos minerales de Ámbito Hidrotermal

```

Function DlgCallback(controlname$, action%, suppvalue%) As Integer
  Const crlf = Chr$(13) + Chr$(11)
  Select Case action
    Case 2
      Select Case controlname
        Case "PushButton1"
          DlgCallBack = False
        Case "PushButton2"
          DlgCallback = False
        Case "PushButton3"
          DlgCallback = False

        Case "PushButton5"
          DlgCallback = False
        Case "PushButton6"
          DlgCallback = False
        Case "PushButton7"
          DlgCallback = False

        Case "Close"
          DlgCallback = False
      '
    ' Help buttons
    '
    Case "Ayuda"
    str1 = "  PROGRAMA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE MINERALES" & crlf _
      &"PRIMERO DEBEMOS TOMAR EL TIPO DE YACIMIENTO A EVALUAR." & crlf & "  " _
      & crlf & crlf & "Clik SOBRE LA IMAGEN PARA EJECUTAR RUTINA " & crlf _
      &"y click SOBRE ? PARA DESCRIBIR LA APLICACIÓN."

      Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
      Sleep 8000
      Msg.Close
      DlgCallBack = True

    Case "PushButton21"

      str1 = "FILÓN HIDROTERMAL"
      Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
      Sleep 5000
      Msg.Close
      DlgCallBack = True

    Case "PushButton22"

      str1 = "EPITERMAL: ALTA SULFURACIÓN"
      Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
      Sleep 6000
      Msg.Close

      DlgCallBack = True

    Case "PushButton23"

      str1 = " EPITERMAL: BAJA SULFURACIÓN."
      Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
      Sleep 5000
      Msg.Close
      DlgCallBack = True

    Case "PushButton24"

      str1 = "PÓRFIDO DE Cu"
      Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000

```

```

Sleep 5000
Msg.Close
DlgCallBack = True
Case "PushButton25"
    str1 = "PÓRFIDO DE Mo"
    Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
    Sleep 8000
    Msg.Close
    DlgCallBack = True
Case "PushButton26"
    str1 = "CARLIN"
    Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
    Sleep 7000
    Msg.Close
    DlgCallBack = True
End Select
End Select
End Function
'
'
Sub Main
'-----
' *                      Declaraciones                      *
'-----
' Definición del dialogo principal
Begin Dialog DemoMenu 1,39,680,354,"
PROGRAMA PARA IDENTIFICAR DE MINERALES", .DlgCallBack
' Dibujos del menú
Picture 6,5,100,180,AphInstallationPath() + "\Macros\Graphics\microscopio.bmp",0,.Picture0,1
Picture 150,38,82,62,AphInstallationPath() + "\Macros\Graphics\stockcopia.bmp",0,.Picture1,1
Picture 280,38,82,62,AphInstallationPath() + "\Macros\Graphics\skarncopia.bmp",0,.Picture2,1
Picture 410,38,82,62,AphInstallationPath() + "\Macros\Graphics\epitermalbscopia.bmp",0,.Picture3,1
Picture 150,130,82,62,AphInstallationPath() + "\Macros\Graphics\epitermalbscopia.bmp",0,.Picture5,1
Picture 280,130,82,62,AphInstallationPath() + "\Macros\Graphics\porfidocopia.bmp",0,.Picture6,1
Picture 410,130,82,62,AphInstallationPath() + "\Macros\Graphics\porfidocopia.bmp",0,.Picture7,1
' Botones del Menú
PushButton 150,110,75,12,"1. FILÓN HIDROTERMAL",.PushButton1
PushButton 280,110,75,12,"2. ALTA SULFURACIÓN",.PushButton2
PushButton 410,110,75,12,"3. BAJA SULFURACIÓN",.PushButton3
PushButton 150,202,75,12,"5. PÓRFIDO DE Cu",.PushButton5
PushButton 280,202,75,12,"6. PÓRFIDO Mo",.PushButton6
PushButton 410,202,75,12,"7. CARLIN",.PushButton7
PushButton 12,188,40,14,"Ayuda",.Helpbutton
PushButton 62,188,40,14,"Cerrar",.Close
PushButton 225,110,22,12,"?",.PushButton21
PushButton 355,110,22,12,"?",.PushButton22
PushButton 485,110,22,12,"?",.PushButton23
PushButton 615,110,22,12,"?",.PushButton24
PushButton 225,202,22,12,"?",.PushButton25

```

```

        PushButton 355,202,22,12,"?",.PushButton26
End Dialog
Dim GetDemo As DemoMenu
'
'-----
' *                Main program                *
'-----
'
' * Abrir menu principal                *
'-----
        i = TRUE
        While i
            response% = Dialog(GetDemo)
'-----
' * Clean up and go home                *
'-----
Select Case response%
Case 1      ' Rutina Filón

retVal = AphRunMacro(AphInstallationPath() + "/macros/doctorado/filon.apm")
        str1 = "Programa de identificación de minerales terminado."
                Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
                Sleep 3000
                Msg.Close

Case 2      ' Rutina Alta S.
retVal = AphRunMacro(AphInstallationPath() + "/macros/doctorado/alta.apm")
                Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
                Sleep 3000
                Msg.Close

Case 3      ' Rutina Baja S.
retVal = AphRunMacro(AphInstallationPath() + "/macros/doctorado/baja.apm")
                Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
                Sleep 3000
                Msg.Close

Case 5      ' Rutina Pórfido Cu.
retVal = AphRunMacro(AphInstallationPath() + "/macros/doctorado/porfco.apm")
                Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
                Sleep 3000
                Msg.Close

Case 6      ' Rutina Pórfido Mo.
retVal = AphRunMacro(AphInstallationPath() + "/macros/doctorado/porfmo.apm")
                Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
                Sleep 3000
                Msg.Close

Case 7      ' Rutina Carlin.
retVal = AphRunMacro(AphInstallationPath() + "/macros/doctorado/carlin.apm")
                Msg.Open str1, 400, FALSE, FALSE, 7500, 4000
                Sleep 3000
                Msg.Close

Case 14

i = False
End Select
Wend
End Sub

```

```
'Modulo para llamar imágenes, seleccionar minerales a 'segmentar y
      abrir Excel
'Deposito Tipo: Filón Hidrotermal
```

```
Sub main
```

```
' Definición de Variables
```

```
' Definición de las variables OBJETO para abrir excel y crear hojas diferentes.
```

```
Dim Excel As Object
Dim WkBook as Object
Dim Sheet As Object
Dim Sheet1 As Object
Dim Sheet2 as object
Dim Sheet3 as object
Dim Sheet4 as object
Dim Sheet5 as object
Dim Sheet6 as object
Dim Sheet7 as object
Dim Sheet8 as object
Dim Sheet9 as object
```

```
' Definición de las variables para exportar datos a celdas de excel.
```

```
Dim ii As Object
```

```
' Definición de las variables para llamar imágenes.
```

```
Dim N as double
Dim abierto as double
```

```
'***** Dialogo para liberar Imágenes *****
```

```
Begin Dialog YesNoDialog , ,180,50,"CAJA DE DIALOGO"
```

```
OKButton 132,8,40,14
GroupBox 4,20,108,24,"",.GroupBox1
Text 4,8,108,8,"Deseas liberar todas las imágenes ?",.Text1
```

```
OptionGroup .OptionGroup1
OptionButton 16,32,32,10,"SI",.OptionButton1
OptionButton 72,32,32,10,"NO",.OptionButton2
```

```
End Dialog
```

```
Dim FreeImagesBox As YesNoDialog
Dim breaktime As Integer
Dim bt1000 As Integer
Dim x As Integer
graph8C = AphNgbGraph("2D 8-connected")
```

```
'***** Dialogo para llamar imagen *****.
```

```
Begin Dialog UserDialog 180,39,352,352,"Dialogo para llamar imágenes"
GroupBox 4,4,340,340, "YACIMIENTOS TIPO FILÓN HIDROTERMAL"
```

```

    OKButton 130,320,30,14,.OK
    CancelButton 170,320,30,14, .Cancel

Picture 230,38,50,50,AphInstallationPath() + "\images\E1.bmp",0,.Picture3,1
Picture 255,58,50,50,AphInstallationPath() + "\images\E1.bmp",0,.Picture3,1
Picture 275,78,50,50,AphInstallationPath() + "\images\E1.bmp",0,.Picture3,1

GroupBox 10,30,210,75, "DATOS DE LA IMAGEN A LEER"

Text 20,46,100,8, "Nombre de la Imagen (Letras) :           ",.Text1
Text 20,74,100,8, "Hasta           ej. 5 :           ",.Text2
Text 20,60,100,8, "Desde           ej. 1 :           ",.Text3
Text 20,88,100,8, "Paso (step)   ej. 1 :           ",.Text4

    TextBox 150,46,36,12,.TextBox1
    TextBox 150,74,36,12,.Textbox2
    TextBox 150,60,36,12,.Textbox3
    TextBox 150,88,36,12,.Textbox4

GroupBox 10,110,210,50, "TIPO DE IMAGEN"

OptionGroup .OptionGroup1
    OptionButton 80,126,108,8,"jpg",.OptionButton1
    OptionButton 80,136,130,8,"tif",.OptionButton2
    OptionButton 80,146,130,8,"bmp",.OptionButton3

GroupBox 10,166,210,60, "Aumento de la Imagen. Microscopio Óptico"

OptionGroup .OptionGroup2
    OptionButton 80,196,130,8,"5X",.OptionButton1
    OptionButton 80,206,130,8,"10X",.OptionButton2
    OptionButton 80,216,130,8,"20X",.OptionButton3

GroupBox 10,232,210,40, "Enlace con Hoja Electrónica "

OptionGroup .OptionGroup3
OptionButton 15,252,210,8,"Se Abrirá automáticamente documento excel",.OptionButton1

End Dialog

    '***** Abrir Documento Excel *****

    Dim Dlg as UserDialog
    response% = Dialog(Dlg)

If response% <> 0 Then

MsgBox "ABRIR HOJA Excel, pulse OK"

    'Hoja de cálculo*

If Abierto = 0 then

'    Inicia Excel

    Abierto = 1
    ExcelOpened = false
    On Error goto NoExcel
    Set Excel = CreateObject("excel.application")

```

```
' Hacer visible excel

Excel.Visible = True

' Crea un documento en Excel

Set WkBook = Excel.Workbooks
WkBook.Add

'Create a new WorkBook Activa las Hojas en el documento

Excel.Sheets("Hoja3").Select
Excel.Sheets("Hoja3").Name = "tetrahedrita"

Set Sheet8 = Excel.ActiveSheet
Excel.ActiveSheet.name = "tetrahedrita"
Excel.Sheets("Hoja2").Select
Excel.Sheets("Hoja2").Name = "Plata"

Set Sheet7 = Excel.ActiveSheet
Excel.ActiveSheet.name = "Plata"
Excel.Sheets.add
Excel.ActiveSheet.name = "Oro"

Set Sheet6 = Excel.ActiveSheet
Excel.ActiveSheet.name = "Oro"
Excel.Sheets.add
Excel.ActiveSheet.name = "Esfalerita"

Set Sheet5 = Excel.ActiveSheet
Excel.ActiveSheet.name = "Esfalerita"
Excel.Sheets.add
Excel.ActiveSheet.name = "Arsenopirita"

Set Sheet4 = Excel.ActiveSheet
Excel.ActiveSheet.name = "Arsenopirita"
Excel.Sheets.add
Excel.ActiveSheet.name = "Galena"

Set Sheet3 = Excel.ActiveSheet
Excel.ActiveSheet.name = "Galena"
Excel.Sheets.add
Excel.ActiveSheet.name = "Calcopirita"

Set Sheet2 = Excel.ActiveSheet
Excel.ActiveSheet.name = "Calcopirita"
Excel.Sheets.add
Excel.ActiveSheet.name = "Pirita"
Set Sheet1 = Excel.ActiveSheet
Excel.ActiveSheet.name = "Pirita"
Excel.Sheets.add
Excel.ActiveSheet.name = "Te"

Set Sheet9 = Excel.ActiveSheet
Excel.ActiveSheet.name = "Te"
Excel.Sheets("Hoja1").Select
excel.Sheets("Hoja1").Name = "ganga"

Set Sheet = Excel.ActiveSheet
```

```

Excel.ActiveSheet.name = "ganga"

end if

'***** Dialogo para seleccionar minerales a segmentar *****.

Begin Dialog SaveOptionsTemplate 300,300,300,300,"YACIMIENTOS MINERALES"

    GroupBox 4,4,290,290,"GRUPO DE MINERALES"
    CheckBox 12,20,67,8,"ganga",.GANGA
    CheckBox 12,40,73,8,"Pirita",.PIRITA
    CheckBox 12,60,67,8,"Calcopirita",.CALCOPIRITA
    CheckBox 12,80,73,8,"Galena",.GALENA
    CheckBox 12,120,73,8,"Esfalerita",.ESFALERITA
    CheckBox 12,100,67,8,"Arsenopirita",.ARSENOPIRITA
    CheckBox 12,140,67,8,"Oro",.ORO
    CheckBox 12,160,67,8,"Plata",.PLATA
    CheckBox 12,180,67,8,"Tetrahedrita",.TETRAHEDRITA
    CheckBox 12,200,67,8,"Te",.TE

        OKButton 140,260,40,14,.OK
        CancelButton 140,280,40,14,.Cancel

End Dialog

Dim SaveOptions As SaveOptionsTemplate

'*** Operaciones para determinar el minerales a seleccionar ***.

SaveOptions.GANGA = 0           'Check box initially on.
SaveOptions.PIRITA = 0         'Check box initially on.
SaveOptions.CALCOPIRITA = 0    'Check box initially on.
SaveOptions.GALENA = 0         'Check box initially on.
SaveOptions.ESFALERITA = 0     'Check box initially on.
SaveOptions.ARSENOPIRITA = 0   'Check box initially on.
SaveOptions.ORO = 0            'Check box initially on.
SaveOptions.PLATA = 0          'Check box initially on.
SaveOptions.TETRAHEDRITA = 0   'Check box initially on.
SaveOptions.TE = 0             'Check box initially on.

r% = Dialog(SaveOptions)

    If r% = -1 Then
        MsgBox "OK was pressed."
    End If

If r% <> 0 Then
'***** Operaciones para determinar el tipo de imagen *****.

if Dlg.OptionGroup1 = 0 then
    a=".jpg"
end if

if Dlg.OptionGroup1 = 1 then
    a=".tif"
end if

if Dlg.OptionGroup1 = 2 then
    a=".bmp"
end if

```

```
'*** Operaciones para determinar el aumento de la imagen ***.
```

```
  if Dlg.OptionGroup2 = 1 then
    b="5X"
  end if
```

```
  if Dlg.OptionGroup2 = 2 then
    b="10X"
  end if
```

```
  if Dlg.OptionGroup2 = 3 then
    b="20X"
  end if
```

```
      ***** Llamada de imagen *****.
```

```
'Asignación de valores a las variables.
```

```
  N = Dlg.TextBox2
  e = Dlg.TextBox1
  ex = Dlg.TextBox3
  s = dlg.textbox4
  tt = N
  InImg = AphImgNew("original")
```

```
'Lazo de llamada.
```

```
For zz = ex to N step s
  Imagen = e & zz & a
  msgbox Imagen
  AphImgRead InImg, imagen
```

```
' Separación en bandas R,G,B.
```

```
rOutImg = AphImgNew("ROJO")
gOutImg = AphImgNew("VERDE")
bOutImg = AphImgNew("AZUL")
```

```
AphImgColorToRGB InImg, routimg, goutimg, boutimg
```

'Operaciones de segmentado (tres bandas), filtrado por 'tamaño
de granos y exportación de datos
'Deposito Tipo: Filón Hidrotermal

```

'-----
' *                               GANGA                               *
'-----
dim indexes() as long
if SaveOptions.GANGA = 1 then

'Segmentación de la fase utilizando rangos de segmentación (R,G,B)
AphImgColorThreshold InImg, AphImgNew("ganga"), AphThreshold(0,30,0,21,0,21), 0

AphImgWrite AphImg("ganga"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempGanga.jpg", "AphJpegFile"
AphImgRead AphImgNew("ganga"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempGanga.jpg"

'Creación de objetos
AphImgThresholdObj AphImgNew("ganga"), AphObjNew("ganga"), AphThreshold(200,255)

'Filtro por área de granos (pixels).
AphObjFilter AphObjNew("ganga"), AphObjNew("ganga"), "PIXEL_COUNT", 36.0, 10000000000.0

' Medición de los parámetros básicos de los granos de pirita.

AphRegionShape AphObj("ganga"), "REGION"
AphObjGetIndexList AphObj("ganga"), indexes
If ArrayDims(indexes) <> 0 Then
    lo = LBound(indexes)
    hi = UBound(indexes)
    Set ii = Sheet.Cells
    'Datos en Hoja Excel
    Set cell = ii.Item(1,1)
    cell.value = "Ganga"
    Set cell = ii.Item(2,1)
    cell.value = "Low Bound"
    Set cell = ii.Item(2,2)
    cell.value = lo
    Set cell = ii.Item(3,1)
    cell.value = "High Bound"
    Set cell = ii.Item(3,2)
    cell.value = hi

    for j=lo to hi
        objIndex = indexes(j)
        attrValue = AphObjGetAttributeD( AphObj("ganga"), objIndex, "AREA")
        If tt=1 Then l=tt*j
        ' Escribir datos en las celdas en Excel
        Set cell = ii.Item(4+l,1)
        cell.value = zz
        Set cell = ii.Item(4+l,2)
        cell.value = j+1
        Set cell = ii.Item(4+l,3)
        cell.value = attrValue
        l= l+1
    next j
    AphObjFree AphObj("ganga")
end if
end if
tt=N

```

```

'-----
' *                               PIRITA                               *
'-----

if SaveOptions.PIRITA = 1 then

'Segmentación de la fase utilizando rangos de segmentación (R,G,B)

AphImgColorThreshold InImg, AphImgNew("PY"), AphThreshold(185,194,185,194,142,155), 0

AphImgWrite AphImg("PY"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempPirita.jpg", "AphJpegFile"

AphImgRead AphImgNew("PY"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempPirita.jpg"

'Creación de objetos (seleccionado 255)

AphImgThresholdObj AphImgNew("PY"), AphObjNew("PY"), AphThreshold(254,255)

'Filtro por área de granos (pixels).

AphObjFilter AphObjNew("PY"), AphObjNew("PY"), "PIXEL_COUNT", 36.0, 10000000000.0

' Medición de los parámetros básicos de los granos de pirita.

AphRegionShape AphObj("PY"), "REGION"

AphObjGetIndexList AphObj("PY"), indexes

If ArrayDims(indexes) <> 0 Then

    lo = LBound(indexes)
    hi = UBound(indexes)
    Set ii = Sheet.Cells
    'Datos en Hoja Excel
    Set cell = ii.Item(1,1)
    cell.value = "Pirita"
    Set cell = ii.Item(2,1)
    cell.value = "desde"
    Set cell = ii.Item(2,2)
    cell.value = lo
    Set cell = ii.Item (3,1)
    cell.value = "hasta"
    Set cell = ii.Item(3,2)
    cell.value = hi

    for j=lo to hi
    objIndex = indexes(j)
    attrValue = AphObjGetAttributeD( AphObj("PY"), objIndex, "AREA")

        If tt=1 Then ll=tt*j
        ' Escribir datos en las celdas en Excel
        Set cell = ii.Item(4+ll,1)
            cell.value = zz
        Set cell = ii.Item(4+ll,2)
            cell.value = j+1
        Set cell = ii.Item(4+ll,3)
            cell.value = attrValue
        ll= ll+1
    next j
    AphObjFree AphObj("PY")
end if
end if
tt=N

```

```

'-----
' *                               CALCOPIRITA                               *
'-----

if SaveOptions.CALCOPIRITA = 1 then

'Segmentación de la fase utilizando rangos de segmentación (R,G,B)

AphImgColorThreshold InImg, AphImgNew("CCPY"), AphThreshold(155,168,151,164,100,114), 0

AphImgWrite AphImg("CCPY"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempCalcopirita.jpg",
"AphJpegFile"

AphImgRead AphImgNew("CCPY"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempCalcopirita.jpg"

'Creación de objetos (seleccionado 255)

AphImgThresholdObj AphImgNew("CCPY"), AphObjNew("CCPY"), AphThreshold(254,255)

'Filtro por área de granos (pixels).

AphObjFilter AphObjNew("CCPY"), AphObjNew("CCPY"), "PIXEL_COUNT", 36.0, 10000000000.0

' Medición de los parámetros básicos de los granos de Calcopirita.

AphRegionShape AphObj("CCPY"), "REGION"

AphObjGetIndexList AphObj("CCPY"), indexes

If ArrayDims(indexes) <> 0 Then

    lo = LBound(indexes)
    hi = UBound(indexes)
    Set ii = Sheet.Cells
    'Datos en Hoja Excel
    Set cell = ii.Item(1,1)
    cell.value = "Calcopirita"
    Set cell = ii.Item(2,1)
    cell.value = "desde"
    Set cell = ii.Item(2,2)
    cell.value = lo
    Set cell = ii.Item(3,1)
    cell.value = "hasta"
    Set cell = ii.Item(3,2)
    cell.value = hi

    for j=lo to hi
    objIndex = indexes(j)
    attrValue = AphObjGetAttributeD( AphObj("CCPY"), objIndex, "AREA")

        If tt=1 Then lll=tt*j
        ' Escribir datos en las celdas en Excel
        Set cell = ii.Item(4+lll,1)
            cell.value = zz
        Set cell = ii.Item(4+lll,2)
            cell.value = j+1
        Set cell = ii.Item(4+lll,3)
            cell.value = attrValue
        lll= lll+1
    next j
    AphObjFree AphObj("CCPY")
end if
end if
tt=N

```

```

'-----
' *                               *
'-----

if SaveOptions.GALENA = 1 then

'Segmentación de la fase utilizando rangos de segmentación (R,G,B)

AphImgColorThreshold InImg, AphImgNew("GALENA"), AphThreshold(130,145,135,148,134,147), 0

AphImgWrite AphImg("GALENA"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempGALENA.jpg",
"AphJpegFile"

AphImgRead AphImgNew("GALENA"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempGALENA.jpg"

'Creación de objetos (seleccionado 255)

AphImgThresholdObj AphImgNew("GALENA"), AphObjNew("GALENA"), AphThreshold(254,255)

'Filtro por área de granos (pixels).

AphObjFilter AphObjNew("GALENA"), AphObjNew("GALENA"), "PIXEL_COUNT", 36.0, 10000000000.0

' Medición de los parámetros básicos de los granos de GALENA.

AphRegionShape AphObj("GALENA"), "REGION"

AphObjGetIndexList AphObj("GALENA"), indexes

If ArrayDims(indexes) <> 0 Then

    lo = LBound(indexes)
    hi = UBound(indexes)
    Set ii = Sheet.Cells
    'Datos en Hoja Excel
    Set cell = ii.Item(1,1)
    cell.value = "GALENA"
    Set cell = ii.Item(2,1)
    cell.value = "desde"
    Set cell = ii.Item(2,2)
    cell.value = lo
    Set cell = ii.Item (3,1)
    cell.value = "hasta"
    Set cell = ii.Item(3,2)
    cell.value = hi

    for j=lo to hi
    objIndex = indexes(j)
    attrValue = AphObjGetAttributeD( AphObj("GALENA"), objIndex, "AREA")

        If tt=1 Then llll=tt*j
        ' Escribir datos en las celdas en Excel
        Set cell = ii.Item(4+llll,1)
            cell.value = zz
        Set cell = ii.Item(4+llll,2)
            cell.value = j+1
        Set cell = ii.Item(4+llll,3)
            cell.value = attrValue
        llll= llll+1
    next j
    AphObjFree AphObj("GALENA")
end if
end if
tt=N

```

```

'-----
' *                               ESFALERITA                               *
'-----

if SaveOptions.ESFALERITA = 1    then

'Segmentación de la fase utilizando rangos de segmentación (R,G,B)

AphImgColorThreshold InImg, AphImgNew("ESFALERITA"), AphThreshold(50,63,55,66,53,66), 0

AphImgWrite AphImg("ESFALERITA"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempESFALERITA.jpg",
"AphJpegFile"

AphImgRead AphImgNew("ESFALERITA"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempESFALERITA.jpg"

'Creación de objetos (seleccionado 255)

AphImgThresholdObj AphImgNew("ESFALERITA"), AphObjNew("ESFALERITA"), AphThreshold(254,255)

'Filtro por área de granos (pixels).

AphObjFilter AphObjNew("ESFALERITA"), AphObjNew("ESFALERITA"), "PIXEL_COUNT", 36.0, 10000000000.0

' Medición de los parámetros básicos de los granos de ESFALERITA.

AphRegionShape AphObj("ESFALERITA"), "REGION"

AphObjGetIndexList AphObj("ESFALERITA"), indexes
If ArrayDims(indexes) <> 0 Then

    lo = LBound(indexes)
    hi = UBound(indexes)
    Set ii = Sheet.Cells
    'Datos en Hoja Excel
    Set cell = ii.Item(1,1)
    cell.value = "ESFALERITA"
    Set cell = ii.Item(2,1)
    cell.value = "desde"
    Set cell = ii.Item(2,2)
    cell.value = lo
    Set cell = ii.Item(3,1)
    cell.value = "hasta"
    Set cell = ii.Item(3,2)
    cell.value = hi

    for j=lo to hi
    objIndex = indexes(j)
    attrValue = AphObjGetAttributed( AphObj("ESFALERITA"), objIndex, "AREA")

        If tt=1 Then lllt=tt*j
        ' Escribir datos en las celdas en Excel
        Set cell = ii.Item(4+lllt,1)
            cell.value = zz
        Set cell = ii.Item(4+lllt,2)
            cell.value = j+1
        Set cell = ii.Item(4+lllt,3)
            cell.value = attrValue
        lllt= lllt+1
    next j
    AphObjFree AphObj("ESFALERITA")
end if
end if
tt=N

```

```

'-----
' *                               *
'-----

if SaveOptions.ORO = 1 then

'Segmentación de la fase utilizando rangos de segmentación (R,G,B)
AphImgColorThreshold InImg, AphImgNew("ORO"), AphThreshold(255,255,235,244,112,121), 0
AphImgWrite AphImg("ORO"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempORO.jpg", "AphJpegFile"
AphImgRead AphImgNew("ORO"), "C:\Archivos de programa\Aphelion\Images\tempORO.jpg"

'Creación de objetos (seleccionado 255)
AphImgThresholdObj AphImgNew("ORO"), AphObjNew("ORO"), AphThreshold(254,255)

'Filtro por área de granos (pixels).
AphObjFilter AphObjNew("ORO"), AphObjNew("ORO"), "PIXEL_COUNT", 36.0, 100000000000.0

' Medición de los parámetros básicos de los granos de ORO.

AphRegionShape AphObj("ORO"), "REGION"

AphObjGetIndexList AphObj("ORO"), indexes

If ArrayDims(indexes) <> 0 Then

    lo = LBound(indexes)
    hi = UBound(indexes)
    Set ii = Sheet.Cells
    'Datos en Hoja Excel
    Set cell = ii.Item(1,1)
    cell.value = "ORO"
    Set cell = ii.Item(2,1)
    cell.value = "desde"
    Set cell = ii.Item(2,2)
    cell.value = lo
    Set cell = ii.Item (3,1)
    cell.value = "hasta"
    Set cell = ii.Item(3,2)
    cell.value = hi

    for j=lo to hi
    objIndex = indexes(j)
    attrValue = AphObjGetAttributeD( AphObj("ORO"), objIndex, "AREA")

        If tt=1 Then lllu=tt*j
        ' Escribir datos en las celdas en Excel
        Set cell = ii.Item(4+lllu,1)
            cell.value = zz
        Set cell = ii.Item(4+lllu,2)
            cell.value = j+1
        Set cell = ii.Item(4+lllu,3)
            cell.value = attrValue
        lllu= lllu+1
    next j
    AphObjFree AphObj("ORO")
end if
end if
tt=N

```