

Trabajo de Diploma
En Opción al Título de
INGENIERO GEÓLOGO

*Título: Caracterización mineralógica de los
principales depósitos de hierro de Angola
mediante técnicas de difracción de Rayos-X.*

Autora: Dumila Suzilene António Fernandes

Tutores: Dr.C Arturo Rojas Puro

Dr.C Alain Carvalho Pereira

PENSAMIENTO

Sabiduría ante todo; adquiere sabiduría, y sobre todas sus posesiones adquiere inteligencia. Engrandécela, y ella te engrandecerá.



Proverbios 4: 7-8

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia por su constante apoyo e incentivo, por creer siempre en mí y por el amor incondicional, por la dedicación y el esfuerzo que han hecho para que yo pudiera concluir mi formación.

A mi madre Prudência Da Conceição Francisco António por hacerse siempre tan presente y positiva, te lo dedico a ti mi madre porque lo mereces de hecho, todo lo que hice y conseguí fue gracias a ti, el espejo más limpio y bello del universo. A mi padre Manuel Ernesto Freire Dos Santos Fernandes por el cariño, apoyo y atención, por su instrucción y firmeza a cuando la educación, por la confianza y amistad.

A mis sobrinos y hermanos, en especial a "Brother Jazz" Hildnel Teles António Fernandes (in memoria), me faltan palabras para expresar todo lo que siento y representas en mi vida, mi otra mitad, gemelo, amigo, compañero, confidente, protector, cómplice, el mejor hermano del mundo entero. A ti porque siempre estuviste ahí para mí y conmigo, nunca necesité de más amigos porque te tenía a ti, siempre me apoyaste y creíste en mí desde el inicio, en todas mis conquistas y fracasos, victorias y derrotas, errores y aciertos estuviste a mi lado, cuando gané la beca profetizaste que lo lograría, adivina qué? Como siempre tenías razón lo hice, infelizmente ya no estás aquí para celebrar conmigo una conquista más, pero sé que estarías muy orgulloso de mí. Te voy a amar por siempre my soldier, prometí que no lloraría al hablar de ti pero no lo cumplí, es que me emocionas!

AGRADECIMIENTOS

- ❖ *Primeramente a Dios todo poderoso por haberme bendecido con el don de la vida, por sostenerme siempre en Sus santas manos, por ser mi guía y protección, por todo lo que hicisteis, haces y aún harás por mí y por mi familia Te lo agradezco con el alma Padre, por siempre honraré y exaltaré Tu santo nombre.*

Gracias Señor por el coraje y la determinación para cumplir con estos cinco años de la carrera, por la fuerza para la realización de este trabajo que significa mucho para mí, gracias por tus enseñanzas que mucho ayudaron en la formación de mi ser, por la salud, inspiración e incentivo a cada día.

- ❖ *No me alcanzan las palabras para agradecer tanta bendición, cuando pensé que todo se había terminado y todas las puertas se cerraron para mí, decidí poner un punto final en mi historia y llegaste Tú diciéndome que siguiera adelante que aunque fuera por la ventana que entrara que Estarías allí esperándome para justificarme, he aprendido bastante, he tenido experiencias que dieron cierto felicidad por eso, pero también aquellas que no y confortaste mi corazón con sabiduría, porque me has enseñado que simplemente existen dos experiencias, una que se gana y la otra que se aprende y asimismo fue.*
- ❖ *A mis padres por lucharen siempre por el mejor para mí, por apoyaren mis sueños y decisiones, por el esfuerzo de realizar mis deseos, por confiar en mí y en mis capacidades, gracias por la expectativa y el entusiasmo que tuvieron durante mi trayectoria, gracias a mi madre Prudência da Conceição Francisco António por abdicar de sus sueños para realizar los míos, por la educación, apoyo y amor incondicional, por la dedicación y por ser esta*

persona maravillosa y virtuosas que eres, te bendigo en nombre de Jesucristo mi madre y te digo sin miedo de errar eres la mejor madre del mundo, es para ti que yo vivo, te amo de todo mi corazón mi reina.

- ❖ *A mi padre Manuel Ernesto Freire Dos Santos Fernandes por tratar siempre que no me faltara nada, por ser positivo y amigo mi héroe y ejemplo de fuerza y dedicación, por regalarme el mundo y creer siempre en mí, mira que decepcionarte yo no soy capaz, te quiero como a la vida “meu cota”.*
- ❖ *A mis hermanos Ana Mendes António Fernandes, la nena de los ojos brillantes, te agradezco por ser tan amiga, consejera y amable, la persona con quien siempre se puede contar, por el apoyo y la fuerza que me brindas desde tan lejos, he cometido algunos errores, pero quiero que sepas que aún quiero ser como tu cuando crezca, no eres perfecta lo sé, pero tu carácter y virtudes hacen que tus imperfecciones sean invisibles, además de mamá no he conocido otra mujer tan admirable como tú, por la alegría, confianza, amistad y el cariño que solo tú sabes dar te lo agradezco, mi fuente de inspiración.*
- ❖ *Valdano Francisco Dos Santos Fernandes el festero, gracias por las palabras de motivación, el apoyo y la fuerza que siempre me brindaste, gracias por ser tan protector y excelente hermano que eres, le pido a Dios que bendiga siempre tu corazón bondadoso.*
- ❖ *Joelma Das Dores António Fernandes la niña de la risa bonita, fuerte y determinada gracias por el calor y el amor que me haces llegar con tu energía tan positiva y agradable, cualidades a ti te sobran para regalar, tu espontaneidad hace que uno vea la vida de una forma diferente y tu actitud y determinación transmiten esperanza, tu irradas felicidad, gracias por hacerme sentir querida, por todo el apoyo cariño mío mil y una gracias.*

- ❖ *Surídia Neiride Dos Santos Fernandes la loca, el tocororo de la familia, nadie logra ser tan libre y colorido como tú, haciendo siempre que los demás entiendan que hay que vivir cada día como si fuera el último, tu eres única.*
- ❖ *Hildnel Teles António Fernandes el cerebro de la casa, te extraño mucho pero sé que estarías feliz por mí, apoyo, cariño y buenos consejos de tu parte nunca me faltaron, gracias por todo una vez más.*
- ❖ *Petra De M´beck António Fernandes la niña linda, tan pequeña y tan seria, nuestra princesa gracias por todo muñeca siempre preocupada por los demás, por el amor, cariño, apoyo e incentivo, por estar siempre ahí deseando y anhelando siempre lo mejor que pueda existir en ese mundo, por todos los buenos y malos momentos que te hiciste presente dando aquella palabras tiernas de conforto muchas gracias, admiro mucho tu madurez, felicidad por eso.*
- ❖ *A mis sobrinos Lizandro, Katséquia Taynara, Cayenne, Elieser, Valdo, Ed, Freire y Regiane, ustedes son las personitas más lindas y amables del mundo siempre transmitiendo amor, cariño, paz y tranquilidad, son los niños más tiernos e inteligentes que conozco los amo muchísimo mis motivos para seguir luchando son mi mayor y más valioso tesoro.*
- ❖ *A mis cunados Calma y Osvaldo por el cariño, apoyo y afecto que han creado por mí, muchas gracias se les quiere.*
- ❖ *A mis compañeros de aula que se han convertido en hermanos en especial Amarildo Cavinda, Bruno Leopoldo, Francisco Soki, Pedro Lufuankenda, Rodrigues Cardoso, gracias por todo, por haber estado a mi lado en los malos y buenos momentos no solo de la carrera sino también de la vida en general, por el apoyo, incentivo, ayuda incondicional, hemos aprendido y crecido mucho entre todos, juntos fuimos capaces de superar nuestras diferencias,*

desentendimientos e individualismo, que tiempos más hermosos tuvimos nuestras divergencias sí, y entendimos que la diferencia hace el mundo pero todo eso es normal acontece en las mejores familias, porque para mí en eso nos hemos convertido, en familia. Hemos batallado duro y miren adonde llegamos, solo sabe el valor de una victoria el que mucho lucha y nosotros lo sabemos.

- ❖ A mi novio por haber estado siempre a mi lado, por el cariño y apoyo, por incentivar y motivar mi formación, gracias amor.*
- ❖ A mis amigos Jessica Zola, Jessica Martins, Elizandra Cayela, Esperança Paquissi, Edna Mpalanga (in memoria), Celso Neto, Sílvio Cavanda, Yuri da Costa, Jéssica Raúl, que mismo estando tan lejos y tanto tiempo sin vernos siempre estuvieron apoyándome y dando fuerza, su cariño y ternura inspiraron mi deseo de terminar la formación y volver a casa, pues no hay nada mejor ni más gratificante que estar al lado de quien nos quiere bien, muchas gracias por todo a ustedes, os considero todos como parte de la familia.*
- ❖ A todos mis profesores del ISMM, por sus enseñanzas y dedicación, por transmitirnos con humildad sus más modestos conocimientos, bajo el empeño de forjar en nosotros un mejor profesional. En especial profesor Yurislei Mariño Valdéz y al Dr. C Alain Carvalho Peña por el tiempo dispensado, la atención y la ayuda, infelizmente por motivos ajenos no pudimos concluir el trabajo juntos pero he aprendido bastante con usted, gracias.*
- ❖ A mi tutor Dr. C Arturo Rojas Purón por su ayuda y apoyo incondicional, por el esfuerzo y tiempo brindados durante el desarrollo de la tesis, gracias por haber creer en mi potencial.*
- ❖ A la Ing. Keilín Matos Pérez por cada detalle y momento dedicado para aclarar cualquier tipo de duda que me surgiera, por la exactitud y comprensión, Dios te bendiga mucho, gracias por todo.*

RESUMEN

El hierro siempre estuvo asociado a la riqueza del hombre debido a su utilidad, por lo que es conocido a nivel mundial y tiene un alto interés económico. Es uno de los recursos minerales más importantes de Angola, después del petróleo y el diamante. El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar mineralógicamente los principales depósitos de hierro en Angola que son los depósitos del Saia, de Cuíma y Cassinga, además fueron analizadas algunas muestras del Río Luembe, aplicando técnicas de Difracción de Rayos-X (DRX), a fin de tener registros que avalen la composición mineralógica de estos recursos minerales. Los resultados de la investigación apuntan que las muestras analizadas presentan una fuerte mineralización ferrífera, las áreas de estudio están representadas por rocas itabiríticas compuestas por óxidos (hematita, magnetita y limonita), sulfuros (pirita y calcopirita) y sílice (cuarzo), en algunos casos el mineral de hierro viene asociado a componente carbonatado (dolomita).

ABSTRACT

Iron was always associated with the wealth of man due to its usefulness, which is why it is known worldwide and has a high economic interest. It is one of Angola's most important mineral resources, after oil and diamond. The objective of this work is to characterize mineralogically the main deposits of iron in Angola, which are the deposits of Saia, Cuíma and Cassinga, and some samples from the Luembe River were analyzed, applying X-ray diffraction (XRD) techniques, in order to have records that substantiate the mineralogical composition of these mineral resources. The results of the research indicate that the analyzed samples have a strong ferriferous mineralization, the study areas are represented by itabiritic rocks composed of oxides (hematite, magnetite and limonite), sulfides (pyrite and chalcopyrite) and silica (quartz), in some In some cases, iron ore is associated with a carbonate component (dolomite).

ÍNDICE

Contenido

RESUMEN VII

ABSTRACT VIII

INTRODUCCIÓN 1

ESTADO DEL ARTE.....	3
• Marco teórico contextual	3
• Marco teórico conceptual	5
CAPÍTULO 1. CARÁCTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LAS ÁREAS ASOCIADAS A LOS DEPÓSITOS DE HIERRO DE ANGOLA	10
1.1 Introducción.....	10
1.2 Geología regional.....	10
1.3 Hidrografía	11
1.4 Ubicación geográfica de la mineralización ferrosa en Angola.....	12
1.5 Descripción de las provincias con muestras representativas de las principales manifestaciones de hierro en Angola.....	14
1.6 Características geológicas asociadas a la mineralización del hierro en Angola	15
1.7 Yacimientos minerales de hierro en Angola.....	17
- Zona de Saia (zona de Cassala- Quitungo).....	17
1.8 Descripción de los yacimientos de hierro estudiados en Angola.....	18
1.9 Explotaciones de hierro en Angola.....	23
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN	25
2.1 Introducción.....	25
2.2 Fase de Laboratorio	26
2.3 Métodos de investigación utilizados.....	32
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	39
3.1 Introducción.....	39

3.2 Caracterización mineralógica de las muestras por depósitos	39
3.3 Discusión de los resultados	66
CONCLUSIONES	68
RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	70

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. FOTO DEL MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ÁREAS DE MINERALIZACIÓN FERROSA EN ANGOLA.	13
FIGURA 2 FOTO DEL MAPA GEOLÓGICO DE OCURRENCIAS MINERALES DE ANGOLA SEGÚN SERVICIO GEOLÓGICO DE ANGOLA (SGA – LUANDA, 1966).	17
FIGURA 3. FOTO DEL MAPA DEL YACIMIENTOS DE CASSINGA SUR, (GOUVEIA, C., ET AL., 1993).....	20
FIGURA 4. FOTO DEL MAPA DEL YACIMIENTOS DE CASSINGA NORTE (GOUVEIA, C., ET AL., 1993).....	21
FIGURA 5. FOTO DE LA VISTA PANORÁMICA DE LA MINA DE HIERRO KWANZA NORTE	24
FIGURA 6. ORGANIGRAMA ILUSTRATIVO DE LAS ETAPAS FUNDAMENTALES DE LA INVESTIGACIÓN.	26
FIGURA 7. ILUSTRACIÓN DE LOS PASOS SEGUIDOS EN EL LABORATORIO PARA EL PROCESO DE ANÁLISIS. SECTOR DE CORTE DE MUESTRAS (I); MUESTRA RECORTADA (II); ALMOHADA Y SUS ACCESORIOS UTILIZADOS A ESCALA DE LABORATORIO EN LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS (III); CRIBAS DE VARIOS DIÁMETROS (IV); RECIPIENTE PLÁSTICO PARA LA COLOCACIÓN DE LAS MUESTRAS EN POLVO (V).	27
FIGURA 8. FOTO DE LAS MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE LOS DEPÓSITOS DE HIERRO DE SAIA.....	29
FIGURA 9. FOTO DE LAS MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE LOS DEPÓSITOS DE HIERRO DE CUÍMA.	30
FIGURA 10. FOTO DE LAS MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE LOS DEPÓSITOS DE HIERRO DE CASSINGA	31
FIGURA 11. FOTO DE LAS MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE LOS DEPÓSITOS DE HIERRO DEL RÍO LUEMBE.	32
FIGURA 12. FOTO DEL MICROSCOPIO BINOCULAR, MARCA COLEMAN.....	33
FIGURA 13. FOTO DE UN DIFRACTÓMETRO X'PERT PRO DE MARCA PANALYTICA, MODELO PW 3710, RADIACIÓN DE CU KA 1	34
FIGURA 14. FOTO DEL SOFTWARE APD (PHILIPS) Y EL XPERT HIGH SCORE 1B DEL AÑO 2002	35
FIGURA 15. FOTO DE LOS UTENSILIOS Y MATERIALES UTILIZADOS EN LA PREPARACIÓN DE LA HOJA PARA PROCESARLAS POR LA TÉCNICA ANALÍTICA DRX.	36
FIGURA 16. FOTO DE LA MUESTRA RX1 DEL DEPÓSITO DE HIERRO SAIA.	39
FIGURA 17. FOTO DEL DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX1. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. MGT (MAGNETITA), HMT (HEMATITA).	40
FIGURA 18. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX1, SEGÚN LA DRX.....	40
FIGURA 19. FOTO DE LA MUESTRA RX2 DEL DEPÓSITO DE HIERRO SAIA	41

FIGURA 20. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX2. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. MGT (MAGNETITA), PRT (PIRITA).	41
FIGURA 21. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX2, SEGÚN LA DRX.	42
FIGURA 22. FOTO DE LA MUESTRA RX3 DEL DEPÓSITO DE HIERRO DE SAIA.	42
FIGURA 23. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX3. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. MGT (MAGNETITA)	43
FIGURA 24. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX3, SEGÚN LA DRX.	43
FIGURA 25. FOTO DE LA MUESTRA RX6 DEL DEPÓSITO DE HIERRO DE SAIA.	44
FIGURA 26. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX6. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. HMT (HEMATITA)	45
FIGURA 27. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX6, SEGÚN LA DRX.	45
FIGURA 28. FOTO DE LA MUESTRA RX11 DEL DEPÓSITO DE HIERRO DE SAIA	46
FIGURA 29. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX11. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. GTH (GOETHITA), QTZ (CUARZO), HMT (HEMATITA)	47
FIGURA 30. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX11, SEGÚN LA DRX.	47
FIGURA 31. FOTO DE LA MUESTRA RX9 DEL DEPÓSITO DE HIERRO DEL CUÍMA.	48
FIGURA 32. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX9. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. HMT (HEMATITA)	49
FIGURA 33. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX9, SEGÚN LA DRX.	49
FIGURA 34. FOTO DE LA MUESTRA RX10 DEL DEPÓSITO DE HIERRO DEL CUÍMA.	50
FIGURA 35. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX10. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. QTZ (CUARZO), HMT (HEMATITA)	51
FIGURA 36. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX10, SEGÚN LA DRX.	51
FIGURA 37. FOTO DE LA MUESTRA RX5 DEL YACIMIENTO DE CASSINGA.	52
FIGURA 38. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX5. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. MGT (MAGNETITA).	53
FIGURA 39. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX5, SEGÚN LA DRX.	53

FIGURA 40. FOTO DE LA MUESTRA RX7 DEL YACIMIENTO DE CASSINGA.	54
FIGURA 41. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX7. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. PRT (PIRITA).....	54
FIGURA 42. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX7, SEGÚN LA DRX.....	55
FIGURA 43.FOTO DE LA MUESTRA RX14 DEL YACIMIENTO DE CASSINGA.	55
FIGURA 44. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX14. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. QTZ (CUARZO), HMT (HEMATITA)	56
FIGURA 45. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX14, SEGÚN LA DRX.....	56
FIGURA 46. FOTO DE LA MUESTRA RX16 DEL YACIMIENTO DE CASSINGA.	57
FIGURA 47. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX16. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. QTZ (CUARZO), PRT (PIRITA)	58
FIGURA 48. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX16, SEGÚN LA DRX.....	58
FIGURA 49. FOTO DE LA MUESTRA RX17 DEL DEPÓSITO DE CASSINGA.....	59
FIGURA 50. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX17. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. CPT (CALCOPIRITA), PRT (PIRITA).	60
FIGURA 51.COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX17, SEGÚN LA DRX.	60
FIGURA 52. FOTO DE LA MUESTRA RX19 DEL YACIMIENTO DE CASSINGA.	61
FIGURA 53. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX19. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. HMT (HEMATITA), PRT(PIRITA).	62
FIGURA 54. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX19, SEGÚN LA DRX.....	62
FIGURA 55. FOTO DE LA MUESTRA RX8 DEL RIO LUEMBE.	63
FIGURA 56. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX8. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. QTZ (CUARZO), DMT (DOLOMITA).	64
FIGURA 57. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX8, SEGÚN LA DRX.....	64
FIGURA 58. FOTO DE LA MUESTRA RX13 DEL RIO LUEMBE.	65
FIGURA 59. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS-X DE LA MUESTRA RX13. EN LA PARTE SUPERIOR SE EXPONEN LOS VALORES DIFRACTOMÉTRICOS EN ANGSTROM. HMT (HEMATITA)	65

FIGURA 60. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUANTITATIVA DE LA MUESTRA RX13, SEGÚN LA DRX..... 66

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX1.....	1
ANEXO 2. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX2.....	2
ANEXO 3. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX3.....	4
ANEXO 4. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX5.....	5
ANEXO 5. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX6.....	7
ANEXO 6. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX7.....	8
ANEXO 7. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX8.....	10
ANEXO 8. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX9.....	11
ANEXO 9. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX10.....	13
ANEXO 10. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX11.....	14
ANEXO 11. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX13.....	16
ANEXO 12. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX14.....	17
ANEXO 13. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX16.....	19
ANEXO 14. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX17.....	21
ANEXO 15. DATOS DIFRACTOMÉTRICOS DE LA MUESTRA RX19.....	22

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. . UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LA MINERALIZACIÓN FERROSA EN ANGOLA	28
TABLA 2. CONDICIONES DE MEDIDA DEL DIFRACTÓMETRO A LAS MUESTRAS EN EL MOMENTO DEL PROCESAMIENTO.	35

INTRODUCCIÓN

El hierro es uno de los componentes químicos más destacados, incluido en el grupo de los metales, siendo el metal duro más usado y el más abundante de la corteza terrestre. Su importancia a través de la historia ha sido relevante, de hecho un período de la misma se conoce como la Era de Hierro. Este elemento siempre estuvo asociado a la riqueza del hombre debido a su utilidad, por lo que es conocido a nivel mundial y tiene un alto interés económico.

Actualmente se utiliza extensivamente para la producción de acero, aleación metálica en la producción de herramientas, máquinas, vehículos de transporte (automóviles, buques, etc.), como elemento estructural de puentes, edificios y otras aplicaciones.

En Angola el hierro es uno de los recursos minerales más importantes, después del petróleo y el diamante. Su importancia se hace extensiva en la industria metalúrgica para la producción de acero, en la industria pesada sirve en la fabricación de automóviles, aviones, armas, aleaciones metálicas; todo esto contribuyendo en el desarrollo económico del país.

Como parte del patrimonio geólogo-minero del país, digno de conservar y divulgar dentro y fuera, se cuenta con una apreciable colección de minerales de hierro, que actualmente se encuentran en el museo de Mineralogía y Geología de la Facultad de Ciencia (MGFC) en la Universidad Agostinho Neto (UAN). De ellos existen muestras de localidades como Saia, Cuíma, Cassinga, Rio Luembe, además de otras localidades extranjeras como Portugal, Brasil, Nueva York, Wilberforce Ontario y Michigan y otras muestras sin localidades declaradas. Todo esto como resultado de mucho trabajo y dedicación por parte de geólogos angoleños y extranjeros.

En el país existen reservas importantes de depósitos de hierro, como es el caso de la zona de Cassinga. La composición mineralógica de estos depósitos de Angola no está determinada, de ahí la necesidad de determinar esta composición con una técnica analítica fiable como la difracción de Rayos X; la cual no es sólo importantes

desde el punto de vista científico, sino que también permite evaluar la calidad de la materia prima mineral que existe en estos yacimientos.

El presente trabajo tiene como principal objetivo identificar los minerales presentes en las muestras representativas de depósitos de minerales de hierro en Angola, a partir de colecciones existentes en el museo de Geología de la UAN, utilizando técnicas de Difracción de Rayos X (DRX).

La tesis está constituida por 3 capítulos, en los cuales se trata en el primer capítulo las características físico-geográficas y geológicas de las áreas asociadas a los depósitos de hierro en Angola; un segundo capítulo donde se exponen los materiales y métodos utilizados en el desarrollo de la investigación y por último, un tercer capítulo que expresa el análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

Problema científico

Necesidad de caracterizar mineralógicamente los depósitos de hierro de Angola mediante técnicas de Difracción de Rayos-X (DRX), que permitirá tener registros de determinaciones instrumentales que fundamentan la composición mineralógica de estos recursos minerales.

Objetivo General

Caracterizar mineralógicamente los principales depósitos de hierro en Angola, aplicando técnicas de Difracción de Rayos-X (DRX).

Hipótesis

Si se determina la composición mineralógica de las muestras de hierro presentes en los principales depósitos de Angola mediante técnica de Difracción de Rayos-X, se podrá caracterizar mineralógicamente estos depósitos.

Objeto de estudio

Los minerales presentes en las muestras de los principales depósitos de hierro de Angola.

Objetivos específicos

- Fundamentar la necesidad de caracterizar los minerales asociados a la mineralización de hierro de Angola, mediante técnicas de investigación mineralógicas.
- Establecer los principales aspectos geológicos que caracterizan la mineralización de los depósitos de hierro de Angola
- Determinar la composición mineralógica de las muestras de los depósitos de hierro de Angola mediante la interpretación de los registros de Difracción de Rayos-X

ESTADO DEL ARTE

- **Marco teórico contextual**

Los objetos más antiguos hechos de hierro usados por el hombre son algunos adornos de siderita, hechos en Egipto en aproximadamente 4000 a. C. El descubrimiento de la fundición llevó al inicio de la era del hierro, alrededor de 1200 a. C, y al uso prominente de hierro para herramientas y armas.

Desde mediados de la década de 1950 hasta 1975, el mineral de hierro, uno de los principales recursos minerales de Angola, fue extraído en las provincias de Malanje, Bié, Huambo y Huila; la producción alcanzó un promedio de 5.7 millones de toneladas por año entre 1970 y 1974.

Después de la independencia, la reactivación de la minería de hierro es parte de los planes del gobierno. Por lo tanto, el gobierno estableció una compañía estatal, la Compañía nacional de hierro de Angola (Ferrangol) para la exploración, extracción, procesamiento y comercialización de minerales de hierro.

El país cuenta con reservas importantes de hierro, como es el caso de la zona de Cassinga que contiene al menos 500 000 000 de toneladas métricas de mineral explotable con un contenido de hierro superior al 35%. Los controles geológicos que se deben tener en cuenta en la planificación de la mina y la decisión de preparación del mineral son, principalmente, unidades mineralógicas luego estratigráficas. Las investigaciones geológicas concluyeron que el distrito de Cassinga Iron tiene un potencial económico definido y que se justifica con una investigación más detallada.

Principales depósitos de hierro en Angola

Entre los principales depósitos de hierro de Angola se pueden señalar: el depósito del Saia ubicado en el camino de hierro Luanda-Malange, el depósito de Cassala-Quitungo en el Kwanza sur, el de Cuíma entre Benguela y Huambo y el yacimiento de Cassinga en el camino de hierro Moçamedes-Menongue. (Da Cunha Gouveia y outros 1993).

Se puede decir que los minerales de hierro conocidos pueden agruparse, fundamentalmente, en dos tipos de depósitos:

- Depósitos de segregación magmática en rocas básicas: los más característicos de este tipo son los de Gambos y Chitado, con minerales ricos en titanio. El yacimiento de Mbassa se incluye también en este tipo, aunque con niveles de titanio inferiores a los de aquellos depósitos del sur de la provincia de Huila.
- Depósitos de hematita de génesis mal definida: Se incluyen en este grupo los yacimientos de Saia, Cuíma y Cassinga y algunos de los yacimientos de la Zona de influencia del Camino de hierro de Luanda. (Citado: Inglés, R., et al., 2015 informe de trabajo de metalogenia: características metalogenéticas de los minerales de Fe UAN).

Principales yacimientos conocidos en Angola

- Luanda: Afuera de los depósitos de itabiritos a que anteriormente se hizo referencia, en el área este de Ndalatando, se señalaron otros depósitos de minerales de hierro del tipo titano-magnetita, como por ejemplo los de MBassa, Jangada, Cassala, Saia,

Quissaquel, Quiala, Caho, Camoma-Quirima, Quibala, Quitungo, Quitunda, Caçalala, Zunge, Saraquete, Dazondo, Pamba Quipipa e Quiçama.

- Benguela: Chilessó (Andulo), Bailundo, Cuíma y Chindonga.

- Moçamedes: Cassinga, Dongo, Gambos y Chitado.

No se determinan estrictamente las reservas de los depósitos anteriormente mencionados. Sólo en algunos de ellos se realizaron trabajos mineros, que permitieron a las respectivas concesionarias, el establecimiento de planes de explotación. Sin embargo, puede afirmarse que son muy abundantes, en Angola, los minerales de hierro y se estiman las reservas conocidas en más de una centena de millones de toneladas.

Actualmente, todos los minerales explotados se destinan a la exportación, que tiene lugar por los puertos de Luanda, Lobito y Moçamedes.

En los últimos años, Angola ha producido y exportado más de cuatro millones y medio de toneladas de mineral de hierro. (Gouveia, C., et al., 1993)

- **Marco teórico conceptual**

Mineral: sólido homogéneo por naturaleza, de origen inorgánico con una composición química definida, pero generalmente no fija y una disposición atómica ordenada.

Mineralización: aquellas acumulaciones de minerales o rocas, que por algún motivo no pueden declararse menas de determinada materia prima mineral. Se dan casos en que los contenidos útiles de los elementos, tienen valores por encima del contenido mínimo industrial y presentan impurezas beneficiosas que permitirían su explotación racional y rentable a la economía. SMINORV, V. I., 1982

Yacimiento mineral

Es una acumulación natural de materia prima, formada por uno o varios cuerpos minerales que deben cumplir con un volumen mínimo de reservas de minerales útiles.

Hierro

El hierro es un metal maleable, tenaz, de coloración Gris plateado que presenta propiedades magnéticas; es ferromagnético a temperatura ambiente, así como el Níquel y el Cobalto. Los números que acompañan el ion de hierro se refieren a los estados de oxidación presentados por el mismo, que son +2 y +3, y es raramente encontrado libre. Para obtener hierro en el estado elemental, los óxidos se reducen con Carbono e inmediatamente son sometidos a un proceso de refinado para retirar las impurezas presentes.

En la naturaleza se encuentra formando parte de la composición de diversos minerales, entre ellos muchos óxidos, como el óxido de hierro II u óxido ferroso (FeO), o el óxido de hierro III u óxido férrico (Fe_2O_3) (tomado de Pirajno 2009).

Itabiritos

Los itabiritos son rocas de origen sedimentaria constituida por bandas alternadas de minerales silíceos y de minerales ferruginosos que tomaron su nombre del monte Itabiran, en minas gerais (Brasil). En la literatura geológica portuguesa estas rocas eran conocidas por cuarcitos ferruginosos listados. Otras designaciones han sido utilizadas a partir de los términos ingleses, Banded Ironstone, Banded Hematite Quartzite, taconite y hasta itacolumite y jaspilite.

Tipos genéticos de yacimientos de hierro

Existen 9 tipos de yacimientos genéticos de hierro según Ariosa, J 1977:

1- Magmático

Dentro de los yacimientos magmáticos el principal es el histeromagmático, el cual se puede subdividir en:

a) Formación mineral apatito - magnetita: asociada con sienitas y sienodioritas, en estos yacimientos es característico el enriquecimiento del apatito y la magnetita, con la hematita, fluorita y la mica. El contenido de hierro (Fe) se eleva de 55 a 70% y el de fósforo (P) entre 2 y 4%, en general los cuerpos tienen forma de diques y lentes.

b) Formación mineral magnetita - titanio: son masas en forma de stocks (bolsas de gran dimensión y estructura isométrica definida) y depósitos de filones de magnetita impregnada en titanio (Ti), yacientes en rocas básicas y ultrabásicas. El contenido de Fe oscila entre 50 y 55%, el de Ti puede llegar hasta 8 y 12%, contiene además vanadio (V) 0,5 a 1%, y a veces algún contenido no importante de cobre (Cu) y platino (Pt).

Para concluir podemos añadir que los yacimientos histeromagmáticos aportan el 5% de la producción mundial de Fe.

2- Metasomático

Los yacimientos metasomáticos de contacto (skarn) están relacionados con granitoides moderadamente ácidos o de composición media que han intruido series de rocas carbonatadas o efusivo sedimentarias. Los cuerpos minerales tienen la forma de bolsas y lentes, la mineralización fundamental es magnetita, martita, oligisto primario, pirita y calcopirita, junto a esos se encuentran los minerales de skarn como piroxenos, calcitas, granate, epidota y otros. El contenido de hierro en las menas oscila entre 20 y 70% (generalmente 40 y 50%), con más de 1 y 2% de azufre (S) y algo de P.

3- Hidrotermales

Aunque este tipo genético no es característico del hierro y no posee importancia industrial, se reconocen algunas formaciones minerales:

- Formación de yacimientos de magnetita: asociada con trapps de altas temperaturas, cerca de la superficie
- Formación de yacimientos de temperaturas medias: son menas sideríticas dentro de rocas carbonatadas, el contenido de Fe oscila entre 30 y 40%.

4- Placeres de magnetita-ilmenita

Estas formaciones son aluviones marinos, que no tienen gran importancia económica.

5- Sombreros de hierro

Se han formado como resultado de la oxidación de las partes superficiales de los cuerpos sulfurosos.

6- Residual de laterías ferruginosas

Están relacionados genética y espacialmente con rocas ultrabásicas a partir de los cuales se han formado como resultado de los procesos de meteorización química en condiciones favorables de relieve y clima.

Tienen un contenido de Fe que oscila entre 40 y 50%, además tiene determinado porcentaje de manganeso (Mn), cromo (Cr), níquel (Ni), cobalto (Co) y V.

7- Sedimentarios

Los yacimientos de este tipo son cuencas y capas oolíticas de hematita-goethita-shamosita confinadas a facies sedimentarias de tipo marino, cerca de la costa, y también a facies efusivo-sedimentario.

De este se reconocen tres subtipos:

- subtipo hematítico: se desarrolla en series arcillosas con conglomerados en los cuales está presente la estratificación cruzada, a veces las menas están asociadas con calizas y poseen entre 35 y 50% de Fe, y entre 8 y 18% de sílice (Si)
- subtipo limonítico: su mineralización es de goethita, oligisto, magnetita, siderita y calcita, el contenido de Fe es variable pero casi siempre inferior al 40%
- subtipo vulcano – sedimentario: el mineral es oligisto, su estructura es colomórfica, el vulcanismo asociado a este subtipo es de carácter geosinclinal-queratófidos y leptitas-rocas volcánicas ácidas o tufas recristalizadas y espilitas en almohadas.

8- De infiltración

Son menas oolíticas de siderita (esfero siderita) y limonita, su importancia industrial no es significativa.

9- Metamorfogénicos

Tienen una gran importancia puesto que aportan el 60% del total del mineral de Fe que se produce en el mundo. Todos los grandes yacimientos de este tipo son precámbricos (proterozoico) y están formados por las llamadas cuarcitas ferruginosas y asociadas a ellas menas ricas en martita, hematita y magnetita. El contenido promedio de Fe oscila entre 25 y 40%, contienen además 0,2 y 0,25% de P y entre 7 y 12% de Si. Las cuarcitas ferruginosas son equivalentes a las taconitas, itabiritas, jaspilitas ferríferas, yacimientos de Fe estratificados (banded iron ore), etc.

La interpretación genética de estos yacimientos está definida como el resultado de 4 etapas:

- Concentración sedimentaria por precipitación química singenética, como resultado del aporte de Fe y Si desde un continente lateritizado con relieve favorable.
- Metamorfismo, recristalización en cuarcitas y formación de ciertos silicatos.
- Deformaciones tectónicas, a veces fallas y zona de brechas.
- Rejuvenecimiento morfológico.

Difracción de Rayos-X

La difracción de rayos-X es uno de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de rayos X, de una determinada longitud de onda, con una sustancia cristalina.

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LAS ÁREAS ASOCIADAS A LOS DEPÓSITOS DE HIERRO DE ANGOLA

1.1 Introducción

En este capítulo se exponen los principales aspectos geográficos y geológicos de las áreas más importantes donde se localizan los depósitos de hierro en Angola. Inicialmente se expondrán las características geográficas de estas áreas, tales como extensión territorial, clima y los municipios que componen las provincias donde están ubicados estos depósitos; luego se presentan las características geológicas regionales, concebidas según los tres caminos del hierro: Camino Luanda – Malange, Camino Benguela – Huambo y Camino Namibe – Lubango – Menongue.

1.2 Geología regional

Angola puede ser dividida en cinco unidades geológicas principales, cada una conteniendo una combinación distinta de depósitos minerales. (Beukes, et al., 2002).

-Cuaternario: la cobertura de rocas sedimentarias del Terciario, que comprenden arena, arenita y arcilla que se extienden por casi la mitad de Angola, incluyendo toda la parte oriental.

-Pleistoceno: a los sedimentos marinos del Cretácico en una serie de cuencas costeras en el margen occidental de Angola.

-Mesozoico: a los sedimentos del paleozoico son equivalentes al súper grupo Karroo, ocurre principalmente en el Graben Cassanje, un centro norte para la depresión geográfica norte occidental. Ocurren diversos cuerpos sub-volcánicos y volcánicos incluyendo kimberlitas y carbonatitas a lo largo del sur-oeste para la línea de

tendencia a camino del nordeste de Angola (corredor de Lucapa), como el basalto, doleritas, sienitas, traquitas y fenolitos.

-Cinturones doblados del proterozoico superior (edad Pan-Africano) ocurren a lo largo de los márgenes de Angola del escudo pre-cambriano, siendo la más importante la de Congo-Occidental, Damara y Mayombe-Macongo. Ellos son caracterizados por la ocurrencia de la mineralización de metales y una variedad de minerales industriales.

-Proterozoico inferior a las rocas del Arqueano, de los escudos de Angola, Mayombe, Cassai, Benguela y Horst Kwanza. En el centro sur de Angola (Cassinga y Menongue) está presente el granito-gnéisico, área meta-vulcano sedimentar (roca verde) y cinturones. El complejo básico (ultra básico) de Cunene ocupa 20 000 km² de la parte sur-occidental del escudo Angoleño. (Beukes y Gutzmer 2008)

1.3 Hidrografía

La configuración hidrográfica de Angola está íntimamente ligada a su relieve. Los ríos se originan en las zonas montañosas y planas del interior y corren hacia las regiones más bajas. En su mayoría, los lechos son irregulares, no faltando las caídas de agua, las cascadas y los rápidos, presentando márgenes más anchos en las zonas costeras, (Viera, F.R., 2014).

Angola posee 77 cuencas hidrográficas, siendo 47 principales y las restantes litorales, las cuencas del Zaire, Zambeze y Cubango son sistemas de ríos internacionales importantes con gran volumen de agua. Las tierras altas del Huambo, Bié y Moxico constituyen algunas de las nacientes más importantes, y algunos de los ríos desembocan en el océano Atlántico (Zaire, Kwanza y Cunene) y otros atraviesan países vecinos para llegar al océano Índico (ríos Zambeze y Cuando Cubango). (Mendes 2012).

Siendo que la vertiente del Cubango, con un área de afluencias del 11,9% de la superficie total del territorio angoleño, alimenta la región del Okavango, en la República de Botsuana. El Río Cubango-Okavango nace en la meseta central de Angola, de donde proviene la mayor parte de su caudal, atravesando la frontera entre Namibia y Angola y desemboca en el Delta del Okavango, en Botsuana, recorriendo 1000 km, siendo que la extensión topográfica de la región de la cuenca hidrográfica abarca un área de aproximadamente 700 000 km².

El río Cunene, en la provincia de Cunene, sirve de límite sur de la provincia de Namibe, también sirve como fuente de alimentación para la República de Namibia, nace en el Huambo, atravesando Huila, recorre la frontera sur de la provincia de Namibe y desemboca en el océano Atlántico al sur del Tômbua.

1.4 Ubicación geográfica de la mineralización ferrosa en Angola

Geográficamente las áreas en objeto de estudio, fueron determinadas según la localización de las muestras representativas de minerales de hierro de Angola, ubicadas en las principales zonas de desagüe entre el camino de hierro Luanda-Malanje, provincia del Kwanza Norte (zona del Saia), camino de hierro Benguela-Huambo, provincia del Huambo (zona do Cuíma), camino de hierro Moçamedes-Menongue, provincia de Huíla (zona de Cassinga) y ejemplares del Rio Luembe que geográficamente está ubicado entre Lunda Norte e Lunda Sur.

La Figura 1 representa el mapa donde se definen los caminos de hierro de: Luanda-Malange; Benguela-Huambo; Moçamedes-Menongue y minas del Saia y del Cuíma. Además de los depósitos minerales ferrosos de Cassala-Quitungo y Cassinga, (Gouveia, C., et al., 1993).

Figura 1. Foto del mapa de ubicación geográfica de las áreas de mineralización ferrosa en Angola.

1.5 Descripción de las provincias con muestras representativas de las principales manifestaciones de hierro en Angola

- Kwanza Norte

Con una extensión de 24.110km², la provincia es compuesta por 11 municipios: Cazengo, Lucala, Ambaca, Golungo Alto, Quiculungo, Bolongongo, Banga, Samba Cajú, Ngonguembo, Cambambe. La capital provincial es Ndalatando. El río Kwanza separa esta provincia de Kwanza sur. El clima de la provincia es tropical húmedo y registra una temperatura media de 23°C. Entre los principales productos cultivados está el algodón y el café. En términos de recursos minerales la provincia es rica en cobre, hierro, manganeso y diamante.

- Huambo

Con un área de 34.270km², tiene como capital la ciudad con el mismo nombre. Tiene 11 municipios: Huambo, Londuimbale, Bailundo, Mungo, Tchindjenje, Ucuma, Ekunha, Tchicala-Tcholoanga, Catchiungo, Longonjo e Caála. Teniendo el maíz como principal cultura.

El distrito de Huambo está ubicado sensiblemente en el centro de Angola, un poco dislocado para oeste del centro geográfico de la provincia. Tiene groseramente forma rectangular, los lados mayores orientados en la dirección norte-sur, y es limitado aproximadamente por los paralelos 11°30' y 13°30' de latitud sur y por los meridianos 15° e 16°30' de longitud este de Greenwich.

El clima de la provincia es tropical de altitud, con temperaturas medias de 19°C, con una estación seca y fría y una estación lluviosa, donde el calor no se hace sentir debido a las constantes precipitaciones. En cuanto a la humedad del aire, es seco, pues la humedad relativa media anual es de aproximadamente de 60 a 70%, presentando los meses de la estación de las lluvias valores más elevados (75 a 85%)

y los del invierno valores bajos (35 a 55%), con días o periodos del día de humedades relativas muy bajas (< 30%).

- Huíla

Tiene un área de 75.002 km² y cuenta con 14 municipios: Caconda, Cacula, Caluquembe, Chiange, (Ngambos) Chibia, (Villa de Juan de Almeida) Chicomba, Chipindo, Cuvango, Humpata, Jamba, Lubango, Matala, Quilengues y Quipungo.

El distrito de Huíla está ubicado al sudoeste de Angola, teniendo forma gruesa rectangular, limitado, aproximadamente, por el paralelo 13° y 17°30' de latitud sur e por el meridiano 13° y 17° de longitud este de Greenwich.

El clima de la provincia es alternado húmedo y seco de las regiones inter tropicales en general el clima es caliente o tropical (con una temperatura media anual de 20°C).

- Lunda Norte

La provincia se extiende por 103.000 km² y está compuesta por 9 municipios: Cambulo, Tchitato, Cuilo Caungula, Cuango, Lubalo, Capenda, Camulemba y Xá Muteba. El clima de la provincia es tropical húmedo con una temperatura media anual de 24°C.

- Lunda Sul

Con un área de 77.367 km², la provincia tiene 4 municipios: Saurimo, Dala, Muconda e Cacolo. Con un clima tropical húmedo, la temperatura media anual de la provincia es de 22°C.

1.6 Características geológicas asociadas a la mineralización del hierro en Angola

Según la distribución de los minerales ferrosos, la geología estará determinada consonante a las áreas de las muestras tomadas, zona de Saia, zona de Cuima y zona de Cassinga, (Figura 2).

En la zona de Saia, al norte, la geología que predomina son las formaciones más modernas del sistema de Oendolongo, Congo occidental y Karroo, huellas de rocas precámbricas esencialmente de granitos, paragneises e itabiritos, correspondiendo a las ocurrencias de minerales de hierro. En estos depósitos se prolongan manifestaciones de composición titano-magnetita, sea en el sentido norte o sur. Es constituido por una camada principal en parte macizo y en otras secciones foliadas debido a las intercalaciones de rocas granulíticas. El mineral itabirito es gris con bandas silíceas alternando con otras de magnetita, hematita asociada a martita y goethita.

En la zona de Cuima, parte central, ocurren depósitos eluviales y masa de hematita con alguna magnetita. La génesis de estas masas de hematita se acepta que sean de origen sedimentario, relacionada con deposición de las rocas del precámbrico medio al superior sobrepuesta por una acción hidrotermal posterior.

En la zona de Cassinga, para el sur, tenemos formaciones ferruginosas en el sistema de Oendolongo y fueron establecidas tres series, la más antigua la de Jamba, con características vulcano-sedimentarias y con representación importante de itabiritos, la segunda serie la del Cuandja con evidentes señales de metamorfismo separada de la anterior por una nítida discordancia, y finalmente la serie superior la de Bale, no metamórfica y de composición esencialmente detrítica. (Correia, H. 1976)

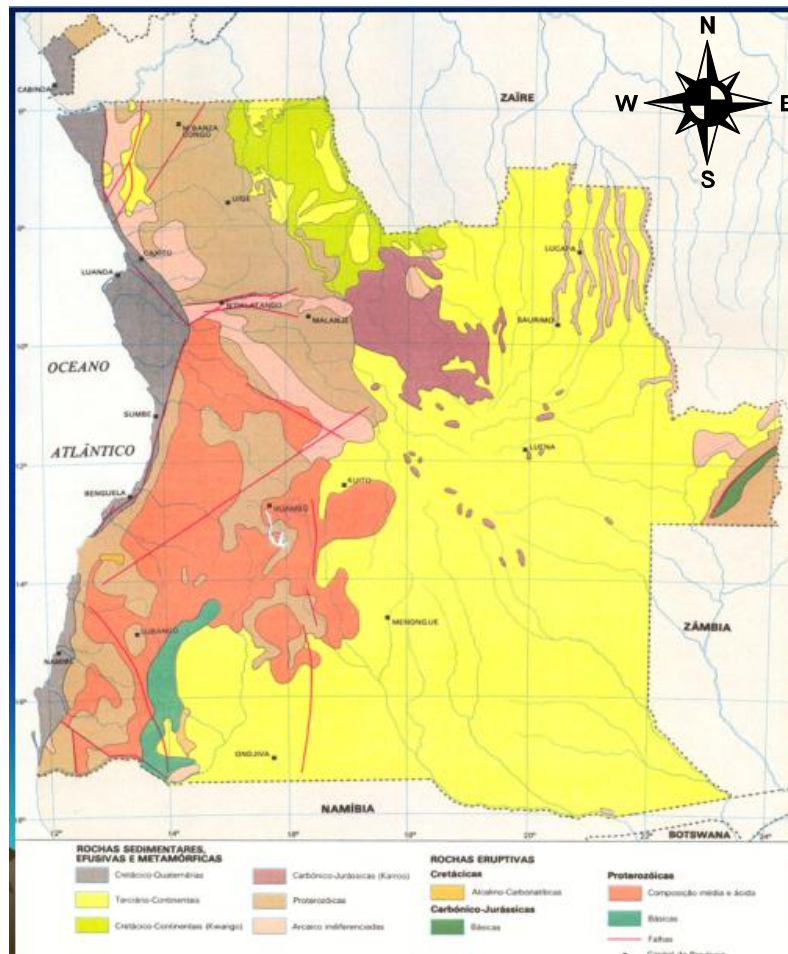


Figura 2. Foto del mapa geológico de ocurrencias minerales de Angola según Instituto Geológico de Angola (IGA, 2010).

1.7 Yacimientos minerales de hierro en Angola

- Zona de Saia (zona de Cassala- Quitungo)
- Zona de Cassinga (zona de Gambos y zona de Curoca)
- Zona de influencia del camino de hierro de Luanda
- Región de Quiçama
- Zona del Cuima (región de Andulo-Chillesso y región del Bailundo)
- Región del Alto Zambeze.

1.8 Descripción de los yacimientos de hierro estudiados en Angola.

Los yacimientos de hierro de Angola objeto de la presente investigación son: Saia, Cassinga y Cuima, los cuales se describen a continuación.

- Cassinga

La región de Cassinga se sitúa en la provincia de Huíla, entre el camino de hierro Moçamedes-Menongue, es considerado el principal yacimiento de hierro de Angola con una mineralización diversificada que presenta cuerpos metálicos y no metálicos. Ocupando una posición central y meridional en la extensa unidad fisiográfica de Angola, vulgarmente conocida como el «Planalto».

La altitud media de esta área va de los 1000 m a los 1500 m pudiendo localmente alcanzar los 2000 m. La topografía es en cierto modo monótona, con interrupciones esporádicas de montículos Graníticos o de rocas cuarcíticas y volcánicas. Para el sur la altitud va, progresivamente, bajando en dirección a la Cuenca del Kalahari. Existen minerales de hierro en la región de Cassinga, predominando las rocas del complejo de Base, representados por granitos y gneises, a las que se asocian esquistos y cuarcitas precámbricas.

En 1953, la Sociedad Minera del Lombige obtuvo un exclusivo de investigación y explotación minera, en un área de 55.000 kilómetros cuadrados, que engloba la región de Cassinga. A partir de 1958 aquella Sociedad inició estudios y trabajos mineros con vista al conocimiento de las ocurrencias de minerales de hierro, fue posible seleccionar dos áreas «Zona sur de Cassinga» y «Zona norte de Cassinga». En cada una de las áreas se señalaron diversos yacimientos de minerales de hierro, de gran interés, en los que predomina la hematita. (Cohen, et al., 1984).

En la zona sur de Cassinga (Figura 3), existen tres tipos de mineral de hierro:

a) Masas de hematita con alto contenido de hierro

La hematita de Cassinga se produce en los cuarcitos ferruginosos («banded ironstone») del Precámbrico. Aparecen en los contactos de rocas itabiríticas con rocas de esquistos (esquisto/pizarra) que les son subyacentes, o incluidas en las rocas itabiríticas.

Se encuentran afloramientos de estas masas en las montañas designadas Tchamutete y Campulo, que dieron los nombres a los respectivos yacimientos. Estos afloramientos deben corresponder a la erosión de pliegues. En las masas, se presenta el mineral compacto, o con intercalaciones de rocas de esquistos e itabiríticas; es el caso de las masas de hematita en el Tchamutete, cuya postura llega a alcanzar 30 a 40 m.

En el yacimiento de Campulo la hematita es a menudo friable y con intercalaciones de esquistos, no observándose el tipo compacto, que ocurre en el Tchamutete. La erosión de estas masas originó interesantes yacimientos de minerales eluviales, que han sido explorados desde hace algunos años.

b) Yacimientos residuales y eluviales

La génesis de estos yacimientos se relaciona con el fenómeno de las alteraciones y de re-deposiciones de la hematita de las rocas itabiríticas, de las cuales resultó un enriquecimiento en minerales de hierro. Estos minerales de alto contenido, localmente denominados «Chapinha» o «Pebble ore», son susceptibles de fácil concentración y aprovechamiento. Se conocen yacimientos de este tipo en Tchamutete, Campulo, Matote, Baca-la-Mitcha, Gimbo, Cachibamba y Mutango-Capungo.

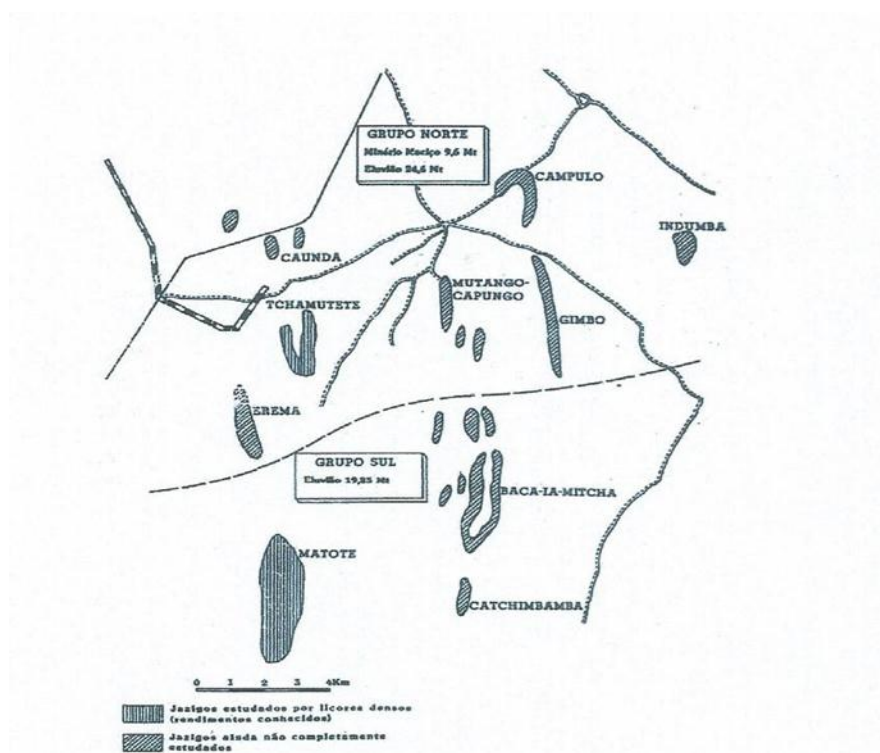


Figura 3. Foto del esquema del yacimiento de Cassinga sur, (Gouveia, C., et al., 1993).

Los minerales eluviales resultan de la meteorización de las rocas itabiríticas y son caracterizadas por poseer elevado contenido de hierro. En cuanto a la concentración, estos minerales fueron clasificados según las siguientes categorías:

- Minerales lavables: que permiten la obtención de concentrados con un mínimo de 62% de hierro, por simple lavado y clivaje.
- Minerales concentrables en medios densos: (densidad alrededor de 2,93%), que se pudieron atingir porcentajes de hierro entre 62% y 65%.
- Minerales difícilmente concentrables: no permitiendo la obtención de concentrado en condiciones económicas, por lo menos de acuerdo con las técnicas utilizables, hasta los primeros años de la década de 70.

Las reservas probadas de minerales, conocidas a mediados de los 70 abarcando las tres categorías referidas, se podrían estimar en cerca de 83 millones de toneladas, las

que se podrían juntar cerca de 8,5 millones de toneladas de reservas probables y más 6,5 millones de toneladas de reservas posibles, sumando 98 millones de toneladas, digamos 100 millones, con contenidos de hierro entre 35% y 50%. Finalmente, el último tipo de mineral de hierro, es constituido por las propias rocas itabiríticas, que corresponden a las reservas más vastas.

c) Yacimientos de bajo contenido de hierro

En la zona norte de Cassinga los yacimientos conocidos son del tipo residual y eluvial «Chapinha» o «Pebble ore». Hasta la fecha, se conocen los yacimientos Jamba, Cateruca, Issaca, Mavulo e Indungo, con reservas bastante interesantes, (Figura 4).

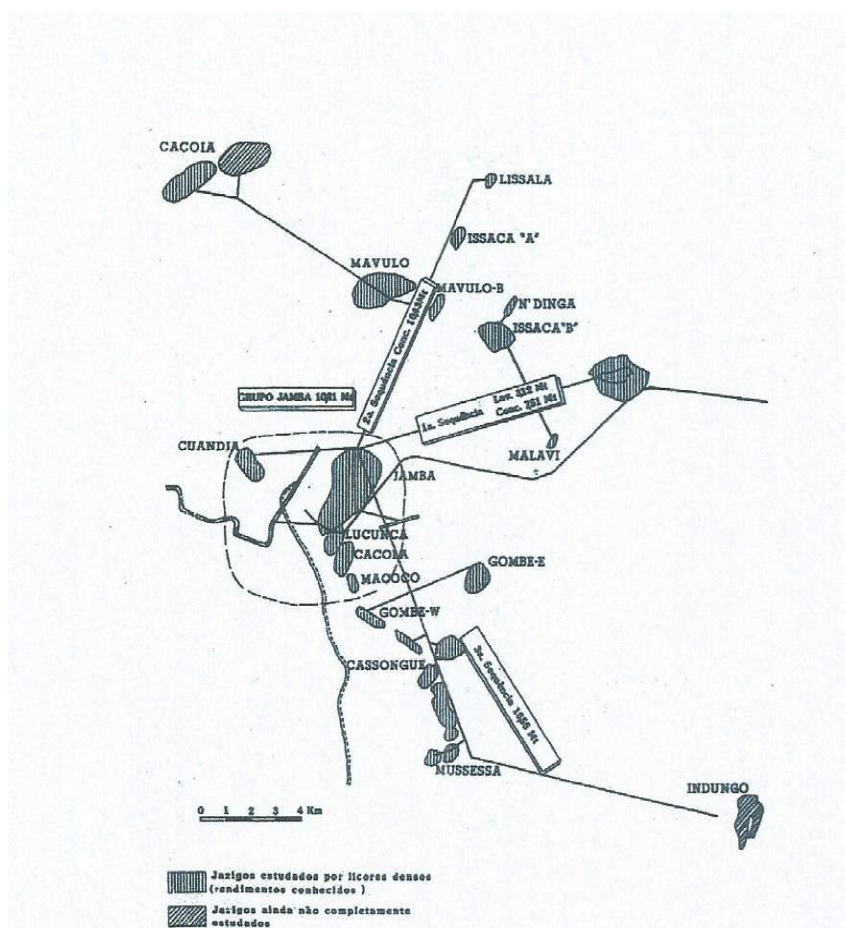


Figura 4. Foto del esquema del yacimiento de Cassinga norte (Gouveia, C., et al., 1993).

Las reservas de itabiritos son grandes, totalizando centenas de millones de toneladas, quizás mismo 1,5 billones de toneladas de material con 25% a 40% de hierro. Los itabiritos de Cassinga fueron agrupados según los tipos siguientes: Ignacio Subias, Isabel Fanlo y Jose Manuel (2011)

- Con cuarzo grueso (Dongo)
- Con cuarzo fino a muy fino (Cassinga Norte)
- Con shert y jaspe (Cassinga sur).

- Saia

En cuanto al depósito de Saia, según trabajos recientemente efectuados, existe la convicción de que debe estar relacionada con la fase terminal de un Magmatismo Queratofírico, magmatismo que está ligado a la fase final del Geosinclinal de Pungo Andongo.

La mena del Saia es la más representativa después de los yacimientos de Cassinga, situada entre el ferrocarril de Luanda-Malange, cerca de 23 km al sur-sudoeste de Lucala, se conocen también varios depósitos, esencialmente constituidos por hematita, muchas veces de estructura micácea, están situados entre los ríos Lucala y su afluente Zunguege, en una zona de contacto entre el complejo de base, las rocas grauvacas y diabasas del sistema del Congo occidental. El mineral aparece en masas lenticulares, que dieron lugar a la formación de extensos estratos; que están siendo estudiados para mejorar el conocimiento del potencial minero de la región.

- Cuíma

La mina del Cuíma está ubicada entre el camino de hierro Benguela-Huambo, en una extensa área que se sitúa a unos 60 kilómetros al sur de Robert Williams, donde aparecen Depósitos eluviales y masas de hematitas, con algunas magnetita, que son objeto de una importante explotación.

La génesis de estas masas de hematita no está debidamente esclarecida, sin embargo se cree que pueden tener un origen sedimentario relacionado con la deposición de las rocas del precámbrico medio a superior, superpuesta por una acción hidrotermal, posterior. Otras tres ocurrencias similares se conocen en la región al noreste de Cuima y junto al Cunene: Chindonga, Gunge y Chiviri. Este depósito está actualmente muy cercano al agotamiento por la explotación intensiva a la que es objeto.

1.9 Explotaciones de hierro en Angola

La explotación de hierro en Angola comenzó en 2017, con el proyecto mineral de Cassala/Quitungo, en la provincia de Kwanza Norte, que inicio con una producción inicial de 6 millones de toneladas.

Los trabajos de pre-viabilidad se centraron en la recogida de 2100 muestras enviadas a laboratorios internacionales, destacándose los laboratorios de Namibia y Sudáfrica, a fin de determinar la cantidad de hierro disponible, su calidad, así como el tiempo probable para su explotación total.

La información preliminar indica que el volumen de mineral existente permitirá extraer hasta 15 millones de toneladas al año, teniendo en cuenta que hasta la fecha se ha identificado un volumen de 292 millones de toneladas de mineral y que puede traducirse en una reserva de 120 millones de toneladas.

Los trabajos de la primera fase del estudio de pre-viabilidad se concluyeron en el primer semestre de 2014 para dar lugar a la fase de estudio de viabilidad, estando el inicio de explotación previsto para 2017.

La mina se localiza en la comuna de Dange ya Menha, en el municipio de Cambambe, en la provincia de Kwanza Norte, siendo la AEMR (Angola Exploration Mining Resources) un consorcio entre DT Group, una asociación entre Trafigura Pte Ltd y Cochan Ltd, y la Empresa Nacional de Hierro de Angola (FERRANGOL).



Figura 5. Foto de la vista panorámica de la mina de hierro Kwanza Norte

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN

2.1 Introducción.

El presente trabajo trata sobre la problemática determinante de la composición de la mineralización de hierro en Angola y se dispone de toda una colección de muestras minerales representativas de los principales depósitos de hierro angoleño que existen en el museo de MGFC de la UAN, se aprovechó la presencia de estos materiales para desarrollar la investigación, teniendo en cuenta las informaciones que se tienen sobre estos recursos minerales recogidos en las publicaciones de Gouveia, C., et al., (1993) y Ferrão, N., et al., (1965), de donde se declaran los principales caminos de este metal en Angola.

La siguiente investigación se realizó en tres etapas fundamentales como se ilustra en el organigrama (Figura 6). La primera etapa, dedicada a la revisión bibliográfica, la segunda etapa, dedicada a los trabajos de muestreo, preparación de muestras y laboratorio, y la tercera etapa, dedicada al trabajo de gabinete donde se interpretaron los registros de Difracción de Rayos X.



Figura 6. Organigrama ilustrativo de las etapas fundamentales de la investigación.

2.2 Fase de Laboratorio

Preparación de muestras

En el conjunto de las muestras de rocas recolectadas sobre el terreno, cada una de las muestras se lavó con agua y tallada en el sector de corte del laboratorio perteneciente al Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias (DGFC) de la

UAN. A continuación, se separaron las muestras recortadas de manera que se obtuvieran secciones de las mismas. Una parte destinada a la descripción macroscópica y la otra parte de ellas fueron tamizadas para ser usada para análisis mineralógicos por técnica de DRX (Figura 7).

Figura 7. Ilustración de los pasos seguidos en el laboratorio para el proceso de análisis. Sector de corte de muestras (I); Muestra recortada (II); Almohada y sus accesorios utilizados a escala de laboratorio en la preparación de muestras para análisis (III); Cribas de varios diámetros (IV); Recipiente plástico para la colocación de las muestras en polvo (V).

Luego se tuvo que realizar un cuidadoso trabajo de selección y preparación de muestras presentes en el museo de MGFC de la UAN. que fueron los más ricos de las principales manifestaciones ferrosas de Angola, en este sentido se puede establecer la siguiente lista de muestras para las localidades más importantes relacionadas con el hierro (Tabla 1)

Tabla 1. . Ubicación de las muestras de la mineralización ferrosa en Angola

Descripción de las muestras	Ubicación de las muestras	Observaciones de las muestras
Muestra RX ₁	Depósito del Saia	Magnetite y hematite *
Muestra RX ₂	Depósito del Saia	Magnetite y pirite
Muestra RX ₃	Depósito del Saia	Magnetite
Muestra RX ₆	Depósito del Saia	Hematite especular
Muestra RX ₁₁	Depósito del Saia	Hematite, quartzo y goethite (limonita)
Muestra RX ₉	Depósito de Cuíma	Hematite

Muestra RX ₁₀	Depósito de Cuima	Hematite jaspoide y quartzo
Muestra RX ₅	Yacimiento de Cassinga	Itabirito
Muestra RX ₇	Yacimiento de Cassinga	Pirite
Muestra RX ₁₄	Yacimiento de Cassinga	Hematite y quartzo
Muestra RX ₁₆	Yacimiento de Cassinga	Pirite y quartzo
Muestra RX ₁₇	Yacimiento de Cassinga	Pirite y chalcopirite
Muestra RX ₁₉	Yacimiento de Cassinga	Hematite y pirite
Muestra RX ₈	Rio Luembe	Dolomite y quartzo
Muestra RX ₁₃	Rio Luembe	hematite

*: Así fue declarada esta muestra en el museo y también sucede para todas las demás.

Muestras para análisis mineralógicos por técnica de DRX



A: muestra RX₁- Magnetite y Hematita



B: muestra RX₂- Magnetite y Pirite



C: muestra RX₃- Magnetite



D: muestra RX₆- Hematite Especular



E: muestra RX₁₁- Hematite Especular y Limonita.

Figura 8. Foto de las muestras representativas de los depósitos de hierro de Saia.



A: muestra RX₉- Hematita



B: muestra RX₁₀- Hematite Jasperite

Figura 9. Foto de las muestras representativas de los depósitos de hierro de Cuíma.



Figura 10. Foto de las muestras representativas de los depósitos de hierro de Cassinga.



A: muestra RX₈- dolomite y cuarzo



B: muestra RX₁₃- Hematite.

Figura 11. Foto de las muestras representativas de los depósitos de hierro del Río Luenbe.

2.3 Métodos de investigación utilizados

El principal método de investigación utilizado fue la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) por cuanto constituye una potente técnica de identificación de sustancias cristalinas, como los minerales, capaz de detectar contenidos de componentes cristalinos a partir de unos 3 a 5% en peso en la muestra mineral, distinguiendo cuando la sustancia es amorfa. Además permite realizar cálculos cuantitativos de los distintos minerales en una muestra poli mineral como las estudiadas.

Además de la técnica de DRX, previamente, las muestras fueron examinadas mediante Microscopía Óptica ordinaria, determinándose las principales propiedades físicas de los distintos granos minerales, teniendo que utilizar separaciones magnéticas y evaluar el grado de magnetismo que tienen algunas muestras; todo para confirmar la presencia de magnetita y hematita, entre otros minerales de hierro.

Microscopía Óptica

Las muestras colectadas tuvieron un reconocimiento mineralógico elemental empleando el microscopio binocular, marca COLEMAN (Figura 12), y tomando como

base las propiedades físicas diagnósticas (color, brillo, morfología cristalina, clivaje, dureza) de los granos minerales.



Figura 12. Foto del microscopio binocular, marca COLEMAN.

Técnica de Difracción de Rayos X (DRX)

Para la caracterización mineralógica de las muestras, las mismas se prepararon moliéndolas y tamizándolas hasta adquirir las dimensiones granulométricas adecuadas para la ejecución de los análisis. El objetivo de la muestra en forma de polvo es garantizar que todos los planos cristalinos se parezcan y asimilan todas las reflexiones posibles a partir de los planes para que se revelen las múltiples fases mineralógicas. Para que tal condición sea la adecuada, es de vital importancia que la muestra posea una granulometría de cerca de 5 micrómetros (μm), siendo que partículas de tamaño inferior pueden llevar a la formación de fases amorfas, (Formoso, ., 1984 y Silva, ., 2013). Las cantidades para ese fin tenían que ser representativas del afloramiento muestreado.

Los análisis por Difracción de Rayos X (DRX) se realizaron en el Laboratorio de Rayos X del DGFC de la UAN. Las muestras fueron previamente molidas y homogeneizadas, luego prensadas en porta-muestras múltiples preparadas para el procesamiento.

La DRX se realizó con un difractómetro X'Pert PRO de marca PANalytica, modelo PW 3710, radiación de Cu K α 1 (Figura 13). El proceso de lectura e interpretación de los difractogramas, se utilizaron los softwares APD (Philips) y el Xpert High Score 1b del año 2002 (Figura 14), así como la base de datos de ICDD (International Center for Diffraction Data) de 1998 y Power Diffraction File (PDF).



Figura 13. Foto de un difractómetro X'Pert PRO de marca PANalytica, modelo PW 3710, radiación de Cu K α 1.

Figura 14. Foto del software APD (Philips) y el Xpert High Score 1b del año 2002

Las muestras preparadas fueron procesadas según las condiciones de trabajo descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de trabajo del difractómetro para el procesamiento de las muestras en estudio.

Parámetros	Condiciones
Radiación	Cu K α (λ = 1,5418 Å)
Tensión	40 kV
Corriente	45 mA
Rango angular de barrido (2θ)	5 a 90°
Paso angular (2θ)	0,02°
Tiempo de barradura por paso	0,5 s
Tiempo de barradura total	35 minutos
Fenda soller (óptica primaria)	0,04 rad
Fenda soller (óptica secundaria)	0,04 rad
Fenda de divergencia (pulgada)	1°
Fenda receptora (pulgada)	1°
Máscara	15 mm

Preparación de la hoja:

1-Nombrar la muestra.

2-Preparar el porta-muestra

3-Pulverizar la muestra.

4-Colocar la muestra en la porta-muestra.

5-Pegar la muestra en la porta-muestra.

6- Llevar y colocar muestra en Difractómetro de Rayos - X.



Figura 15. Foto de los utensilios y materiales utilizados en la preparación de la hoja para procesarlas por la técnica analítica DRX.

Pasos a seguir

1. Conectar el interruptor del agua (éste se encuentra en la pared detrás del Difractómetro), conectar los ordenadores y entrar en el programa APD (presionar la tecla F2).

2. Dirigir el botón de Amperes a 10mA.

3. Presione el botón - para encender el aparato. Después de 5 minutos bajar el Amperaje a 0mA (el botón rojo (tensión) se enciende inmediatamente).

4- Aumentar lentamente el Voltaje y el Amperaje (recordando que siempre el Voltaje debe ser mayor que el Amperaje, nunca al revés) a 45kV y 35mA, respectivamente. Antes de llegar a la capacidad máxima (45 kV y 35mA), conectar la célula de conexión del equipo con los ordenadores.

5- En el programa Xpert, entrar en Data collection, identificación de identidades, elegir el programa que se va a usar y pulsar Enter. Identificar las muestras con un máximo de ocho dígitos.

6- Colocar la lámina en el porta muestra del Difractómetro, luego abrir la ventana correspondiente al goniómetro usado.

7- Iniciar la exploración (pulsando la tecla F1 en el ordenador correspondiente al goniómetro usado). Para visualizar el Difractograma en la pantalla del ordenador basta presionar la tecla Enter y luego la tecla D.

8 - Al final de la exploración cerrar la ventana.

9- Salir del programa XPert.exe y entrar en el DATA.

10- Abrir el disquete (Alt + F1, colocar en el A), seleccionar las muestras a copiar (presionar la tecla Ins) y copiar (presionar F5).

11- Cerrar el disquete (Alt + F1, colocar en el C).

Caracterización de un difractograma de Rayos X.

En un registro se tiene:

- Serie de picos o reflejos difractométricos de debajo del difractograma.
- Escala angular del difractograma.
- Escala de intensidad de los picos del difractograma.

Lectura de los difractograma de Rayos X.

- Ángulos 2θ .
- Distancia interplanar d de cada pico difractométrico.

- Intensidad relativa de cada pico I / I_0 difractométrico.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Introducción

En este capítulo se realiza la determinación de la composición mineralógica de las muestras de los minerales asociados a la mineralización de hierro de Angola, empleando Técnicas de Difracción de rayos X (DRX), según las diferentes zonas de estudio y de esta forma se caracterizan mineralógicamente los depósitos de hierro en Angola.

3.2 Caracterización mineralógica de las muestras por depósitos

- **Depósito del Saia**

En este sector se realizó DRX en cinco (5) muestras donde se logró hacer la interpretación de los difractogramas de Rayos X.

- Muestra RX₁

La muestra RX₁ es un óxido de coloración castaño rojizo oscura a negro de hierro, granulometría fina, parcialmente magnética, su composición mineralógica de hematita y magnetita (Figura 16).



Figura 16. Foto de la muestra RX₁ del depósito de hierro Saia.

En el difractograma de la muestra RX₁ se encontraron picos principales con reflejos difractométricos: 2.70 Å⁰; 2.29 Å⁰; 1.14 Å⁰, 1.69 Å⁰ distintivos para el mineral hematita (Fe₂O₃) que ocupa el 81% de la muestra y los picos 2.51 Å⁰, 1.61 Å⁰, 1.48 Å⁰ de la magnetita (Fe₃O₃) que ocupa el 19% de la muestra (Figura 17 y Figura 18).

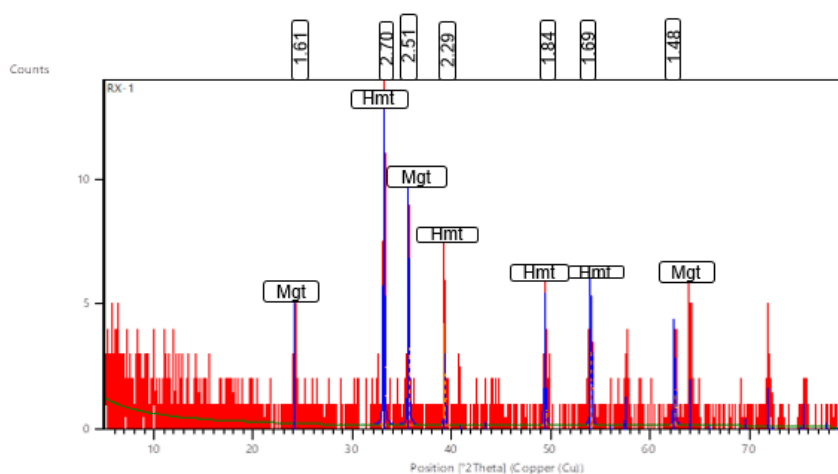


Figura 17. Foto del difractograma de Rayos-X de la muestra RX₁. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Mgt (magnetita), Hmt (hematita).

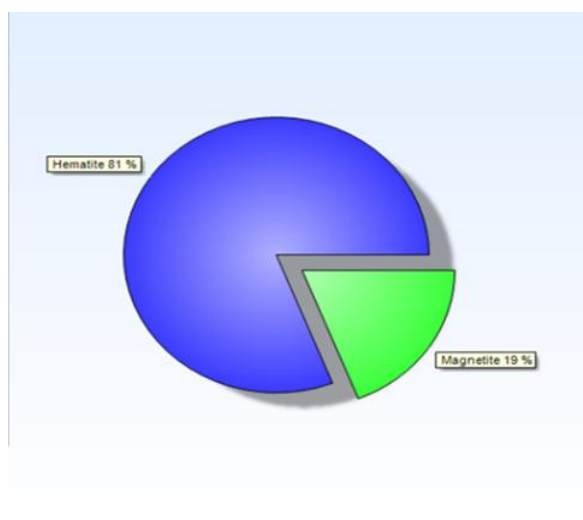


Figura 18. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX_1 , según la DRX.

- Muestra RX_2

Muestra de coloración oscura, parduzco amarillenta, de granulometría fina compuesta por sulfuro de hierro, pirita, y óxido de hierro, magnetita (Figura 19).



Figura 19. Foto de la muestra RX_2 del depósito de hierro Saia.

Se registraron en el difractograma los picos principales: $2.70 \text{ \AA}^0$, $2.21 \text{ \AA}^0$, $1.84 \text{ \AA}^0$ y $1.63 \text{ \AA}^0$ asignados a la pirita FeS_2 , que ocupa el 87% de la muestra. Además se registraron los reflejos: $2.52 \text{ \AA}^0$, $3.63 \text{ \AA}^0$, $1.69 \text{ \AA}^0$ de la magnetita Fe_2O_4 ocupando el 13% restante de la muestra (Figura 20 y Figura 21).

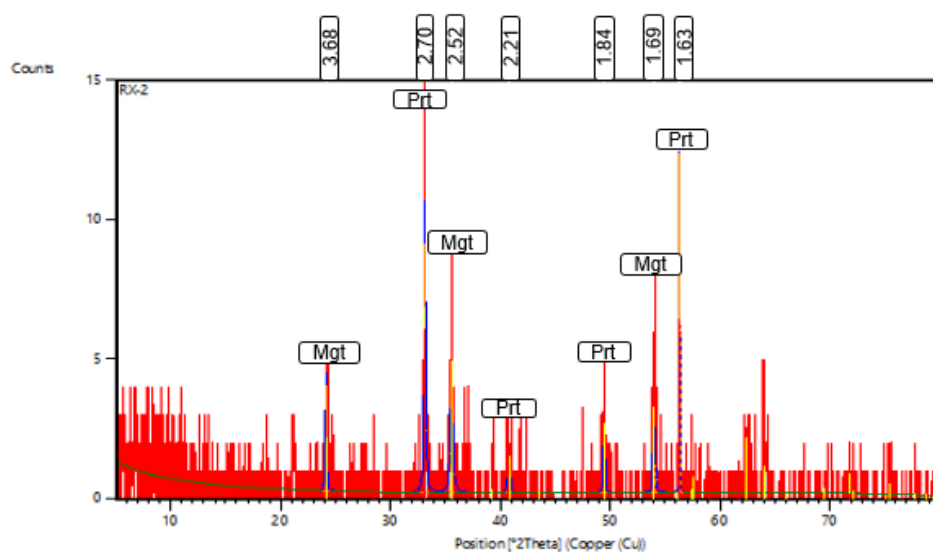


Figura 20. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX_2 . En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Mgt (magnetita), Prt (pirita).

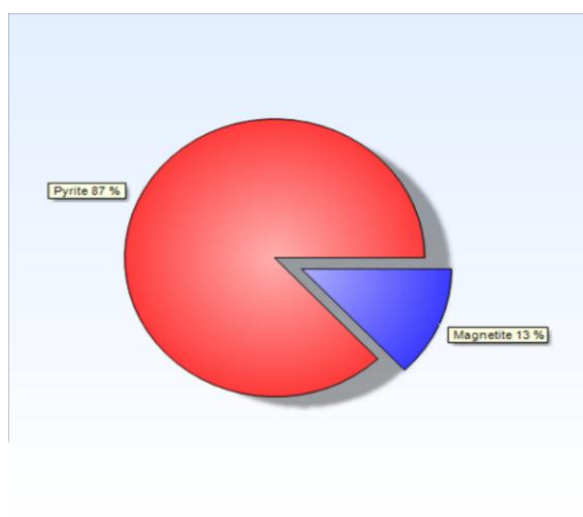


Figura 21. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX_2 , según la DRX.

- Muestra RX_3

Muestra de color negro y brillo metálico, compuesta por mineral de hierro, de carácter magnético, magnetita (Figura 20)



Figura 22. Foto de la muestra RX₃ del depósito de hierro de Saia.

El difractograma de la muestra RX₃ presenta los principales picos del mineral que la compone: 2.97 Å⁰, 2.54 Å⁰, 2.42 Å⁰, 2.10 Å⁰, 1.61 Å⁰ y 1.48 Å⁰, correspondiente a la magnetita Fe₃O₄ (Figura 23 y 24).

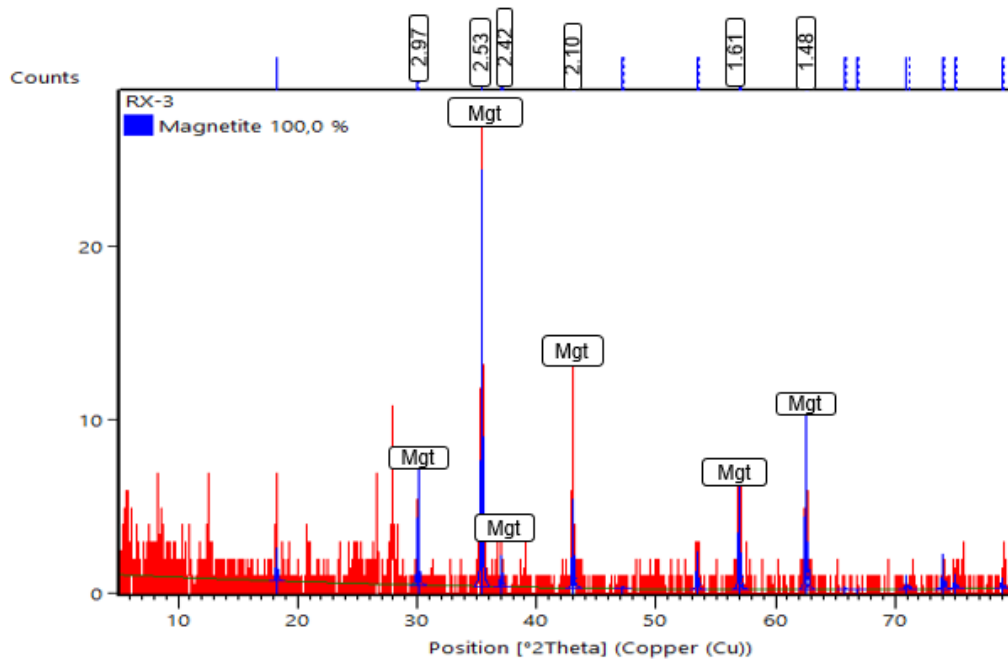


Figura 23. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX₃. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Mgt (magnetita).

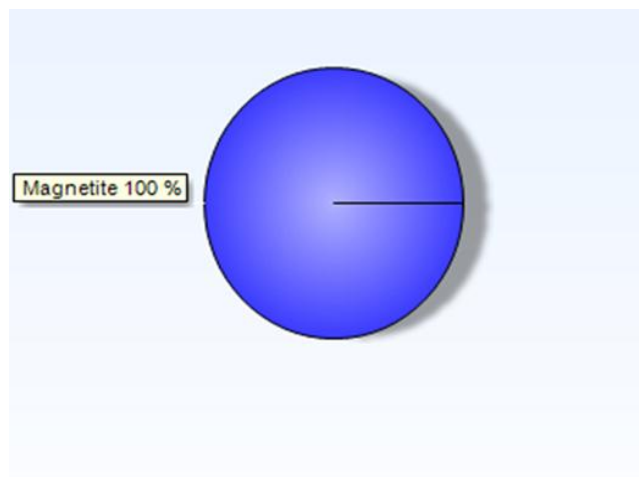


Figura 24. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₃, según la DRX.

- Muestra RX₆

La muestra RX₆ está compuesto por hematita, mineral de coloración negro y brillo metálico, compuesta por hematita debiendo su apellido especular por pertenecer a la variedad metálica y laminada (especularita) de la hematita (figura 25).



Figura 25. Foto de la muestra RX₆ del depósito de hierro de Saia.

Fueron detectados los picos fundamentales de la muestra RX₆ en el difractograma: 3.69 Å⁰, 2.70 Å⁰, 2.51 Å⁰, 2.29 Å⁰, 1.84 Å⁰, 1.69 Å⁰, 1.48 Å⁰ y 1.31 Å⁰ pertenecientes a la hematita Fe₂O₃ que ocupa el 100% de la muestra (Figura 26 y 27).

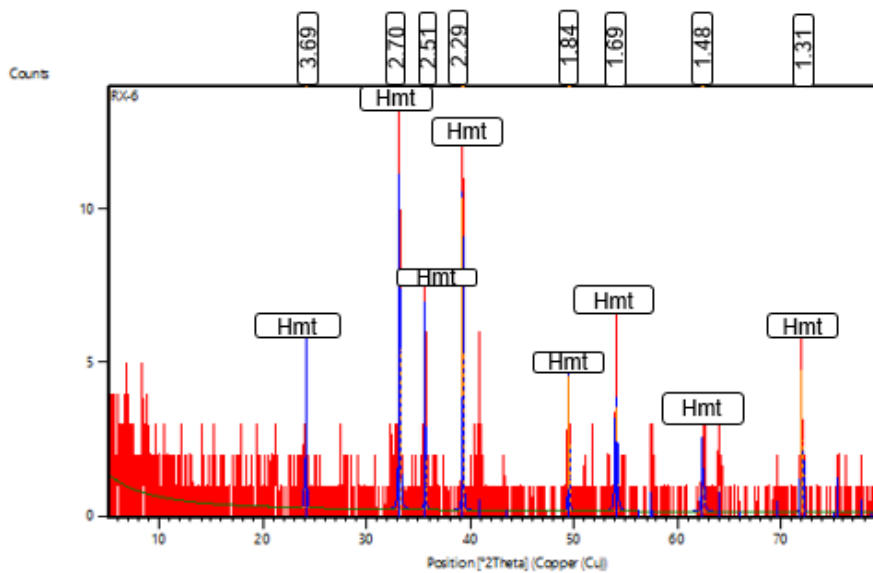


Figura 26, Difractograma de Rayos-X de la muestra RX6. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Hmt (hematita).

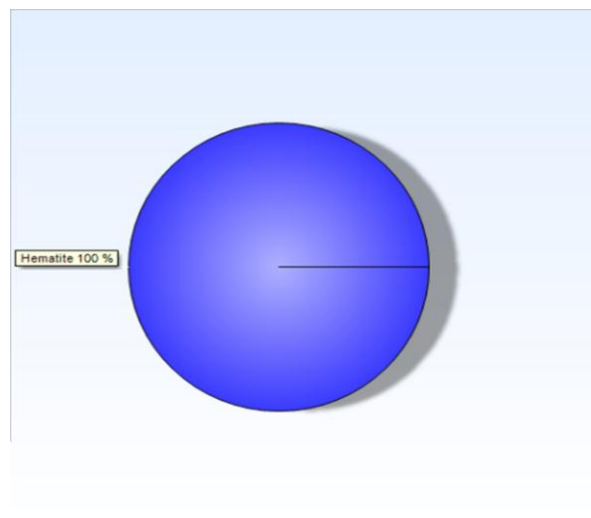


Figura 27. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX6, según la DRX.

- Muestra RX₁₁

Muestra de coloración oscura verdosa con brillo metálico, compuesta por hematita especular, cuarzo y limonita (Figura 28).



Figura 28. Foto de la muestra RX11 del depósito de hierro de Saia.

Se pudo observar en el difractograma los picos principales: 1,25 Å y 2,51 Å correspondiente a la hematita Fe_2O_3 que ocupa el 48,5% de la muestra, y también los reflejos: 3,34 Å del cuarzo SiO_2 , que ocupa el 43,6% de la muestra y 4,19 Å de la goethita ($\alpha \text{FeO} \cdot \text{OH}$) que ocupa el 7,9% de la muestra, además fueron identificadas dos paragénesis en los picos: 2,70 Å de goethita + hematita y 1,45 Å de cuarzo + hematita (Figura 29 y 30).

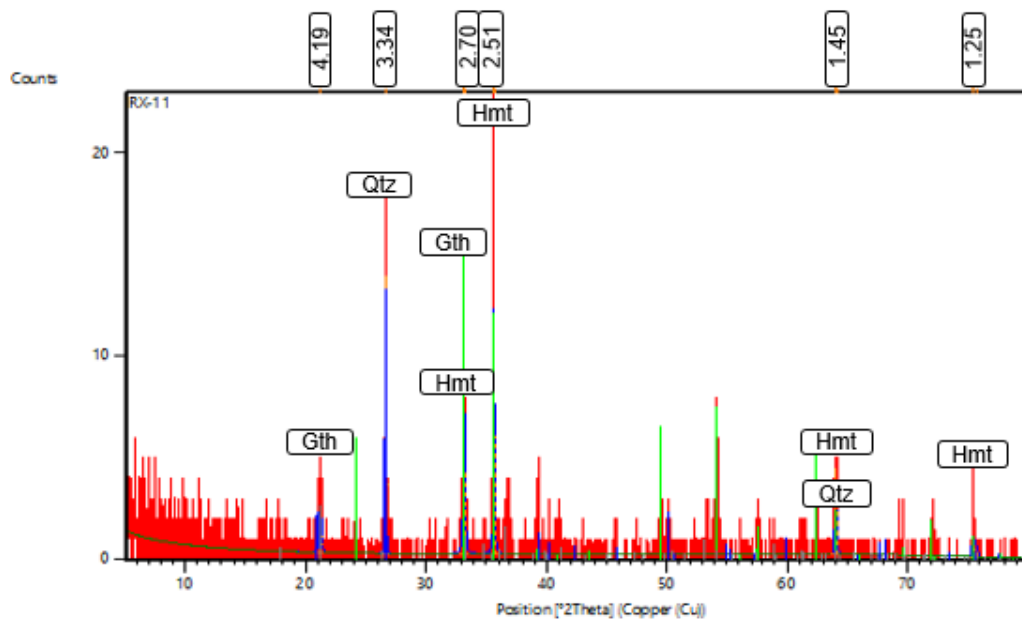


Figura 29. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX₁₁. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Gth (goethita), Qtz (cuarzo), Hmt (hematita).

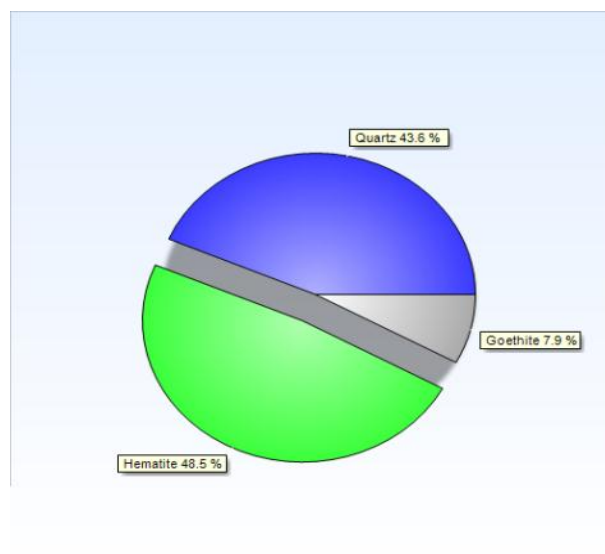


Figura 30. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₁₁, según la DRX.

- **Depósito del Cuíma**

En este sector se realizaron DRX en dos (2) muestras donde se logró hacer la interpretación de los difractogramas de Rayos X.

- **Muestra RX₉**

En esta muestra se observa hematita de coloración negro rojizo y brillo mate, compuesta únicamente por hematita (Figura 31).



Figura 31. Foto de la muestra RX₉ del depósito de hierro del Cuíma.

El difractograma detectó los principales picos: 2.70 Å⁰, 2.52 Å⁰, 2.20 Å⁰, 1.84 Å⁰ y 1.69 Å⁰ correspondientes a la hematita Fe₃O₃ ocupa el 100% de la muestra (Figura 32 y 33).

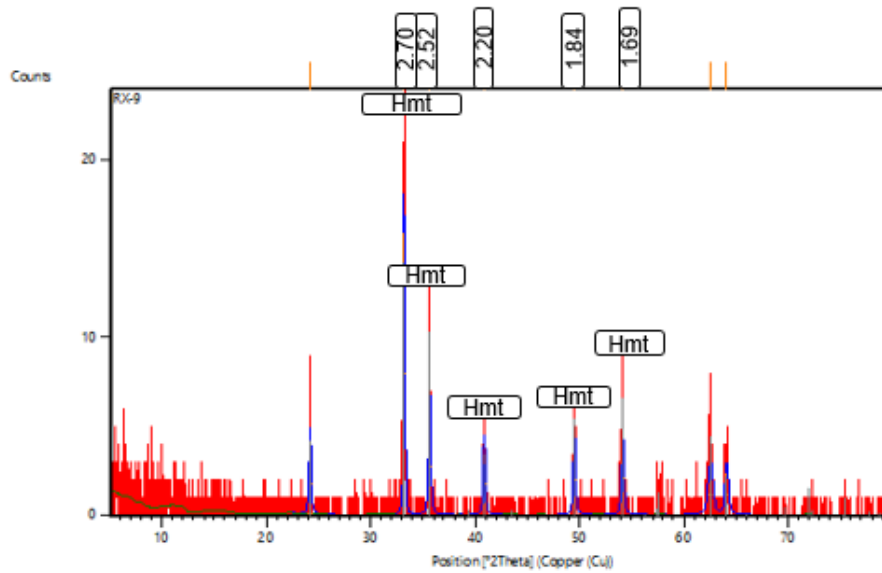


Figura 32. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX₉. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Hmt (hematita).

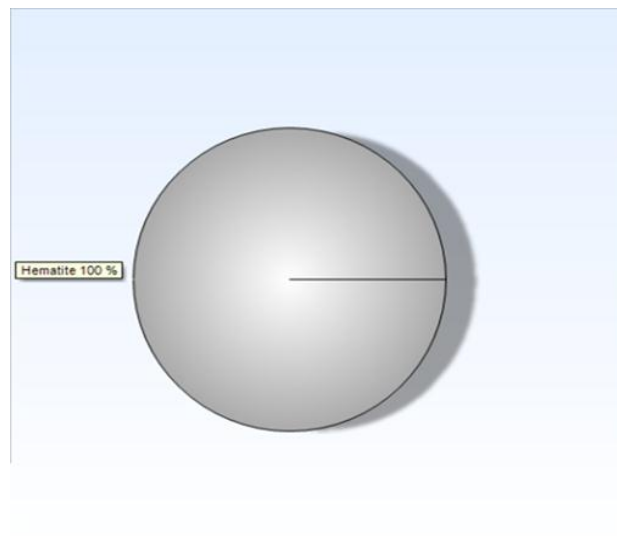


Figura 33. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₉, según la DRX

- Muestra RX₁₀

En esta muestra se observa hematita de coloración negro rojizo y brillo mate, compuesta por hematita jaspoide y cuarzo (Figura 34).

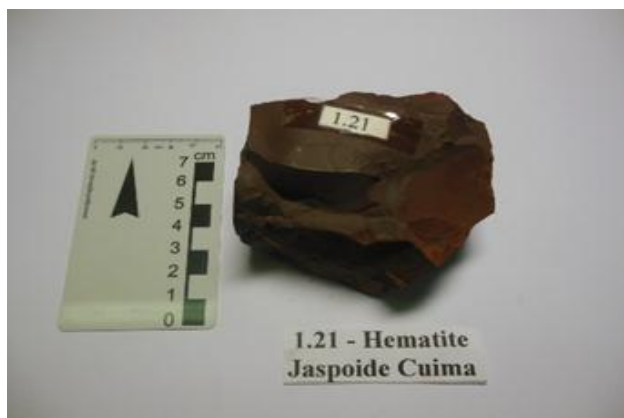


Figura 34. Foto de la muestra RX₁₀ del depósito de hierro del Cuíma.

A través del difractograma fue posible identificar los principales picos: $2.70 \text{ \AA}^0$, $2.51 \text{ \AA}^0$, $1.70 \text{ \AA}^0$ y $1.48 \text{ \AA}^0$ correspondientes a la hematita Fe_3O_3 que predomina el 54% de la muestra, además los picos: $3.34 \text{ \AA}^0$ y $1.45 \text{ \AA}^0$ que corresponden al cuarzo SiO_2 ocupando el 46% de la muestra (Figura 35 y 36).

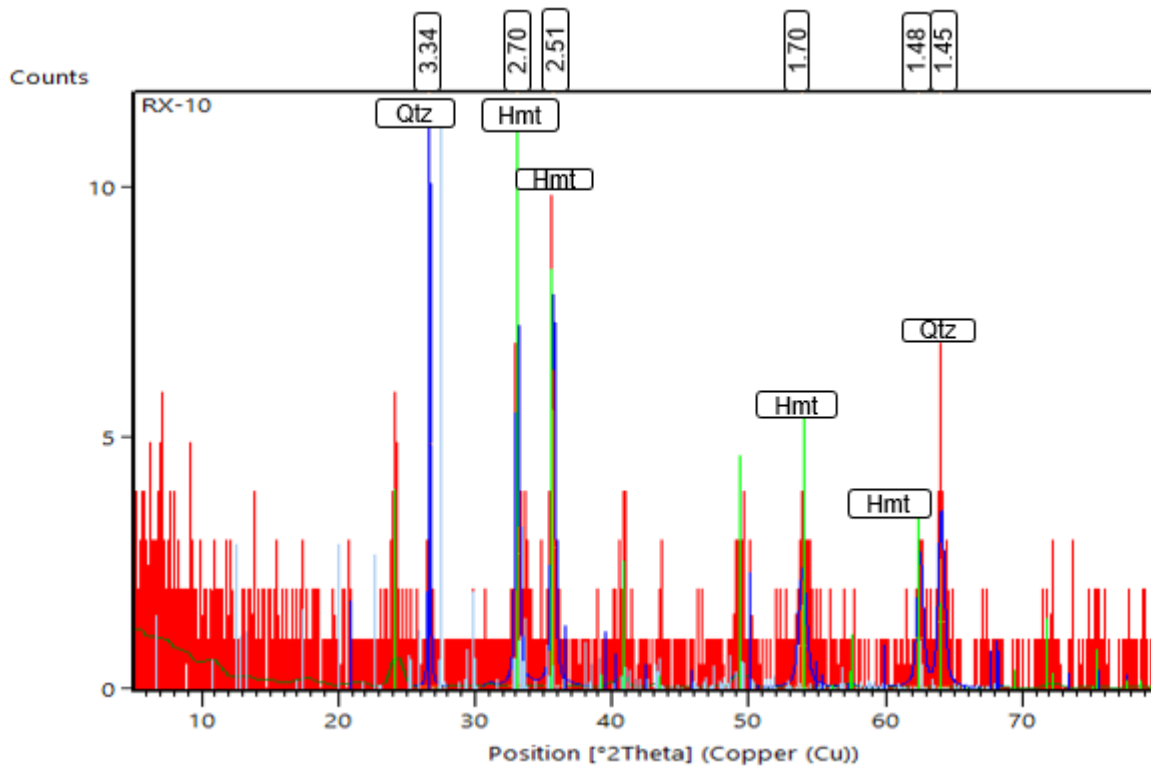


Figura 35. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX₁₀. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Qtz (cuarzo), Hmt (hematita).

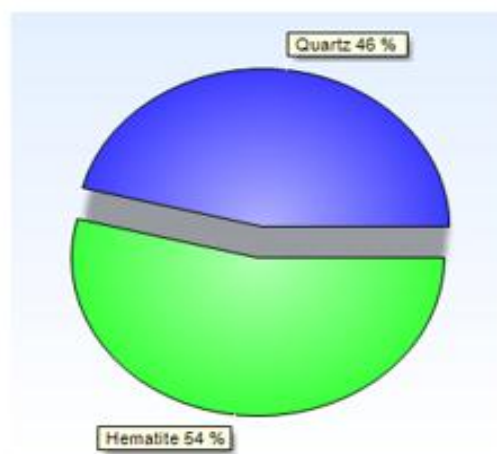


Figura 36. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₁₀, según la DRX.

Yacimientos de Cassinga

En este sector se realizaron DRX en dos (2) muestras donde se logró hacer la interpretación de los difractogramas de Rayos X.

- Muestra RX₅

La muestra de itabirito presenta una coloración rojiza oscura a negro de hierro compuesto por magnetita (Figura 37).



Figura 37. Foto de la muestra RX₅ del yacimiento de Cassinga.

Fueron detectados en el difractograma los principales picos: $2.97 \text{ \AA}^0$, $2.53 \text{ \AA}^0$, $2.09 \text{ \AA}^0$, $1.61 \text{ \AA}^0$ y $1.48 \text{ \AA}^0$ correspondientes a la magnetita Fe_3O_4 que ocupa el 100% de la muestra (Figura 38 y 39).

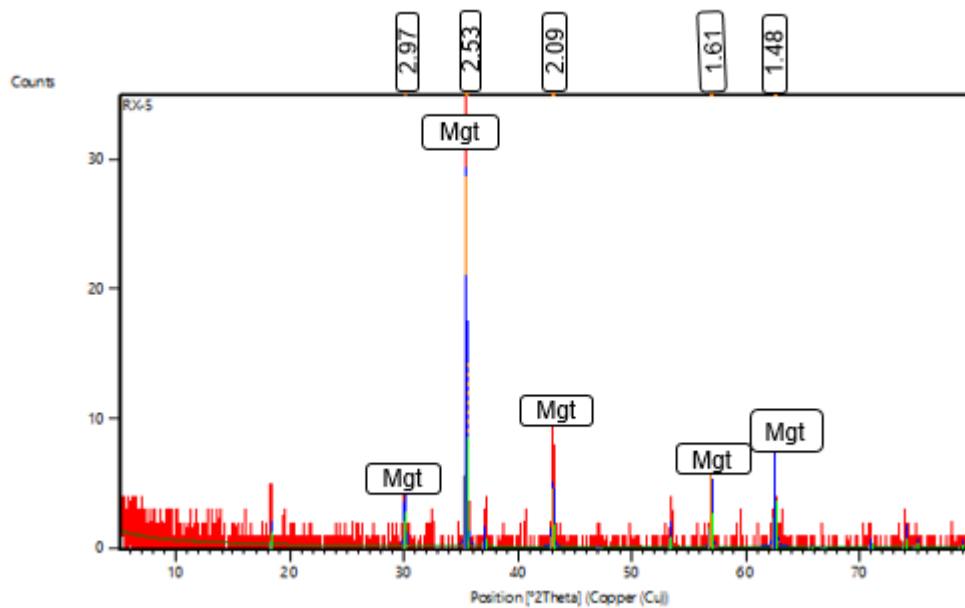


Figura 38. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX₅. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Mgt (magnetita).

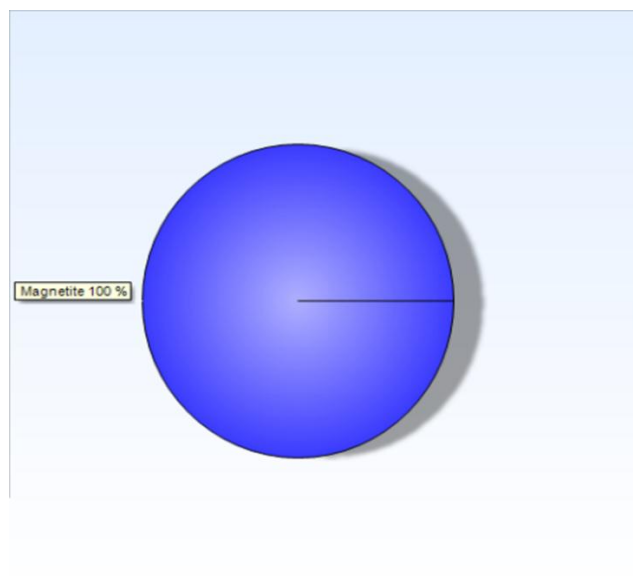


Figura 39. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₅, según la DRX.

- Muestra RX₇

La muestra RX₇ está compuesta básicamente por pirita de coloración clara, amarillo latón pálido de granulometría fina, compuesta únicamente por pirita (Figura 40).



Figura 40. Foto de la muestra RX₇ del yacimiento de Cassinga.

El difractograma detectó los principales picos: 2.71 Å⁰, 2.42 Å⁰, 2.21 Å⁰, 1.63 Å⁰ correspondientes a la pirita (FeS₂) que ocupa el 100% de la muestra (Figura 41 y 42).

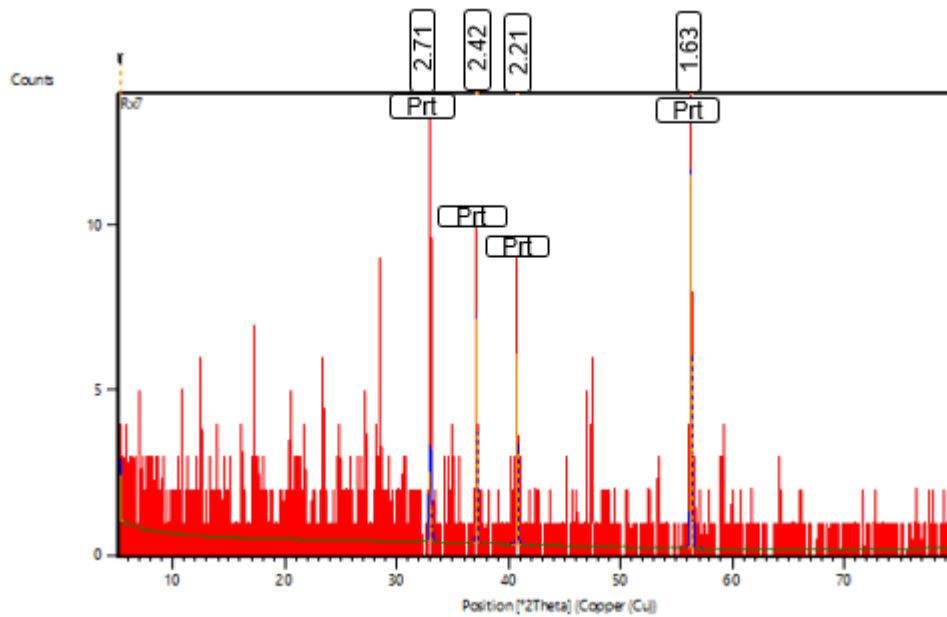
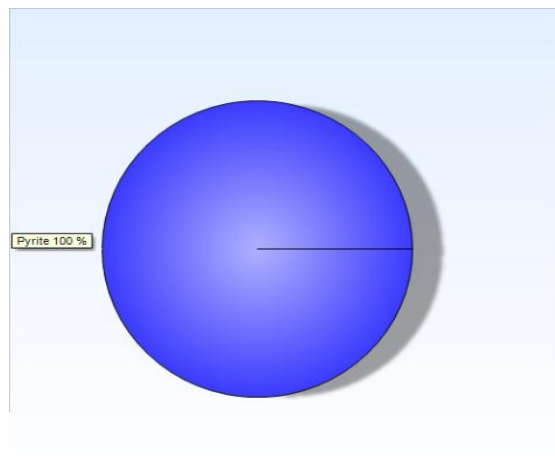


Figura 41. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX₇. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Prt (pirita).

- Muestra

La muestra básicamente grano fino, brillo metálico.



RX₁₄

RX₁₄ está compuesta de hematita y cuarzo de coloración castaña parda y

Figura 42. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₇, según la DRX.



Figura 43. Foto de la muestra RX₁₄ del yacimiento de Cassinga.

Se detectaron los picos: 4.26 Å⁰, 3.34 Å⁰, 1.81 Å⁰ y 1.54 Å⁰ correspondientes al cuarzo SiO₂ que ocupa el 65% de la muestra y los reflejos: 2.70 Å⁰, 2.51 Å⁰ y 1.69 Å⁰ de la hematita Fe₂O₃ que ocupa el 35% de la muestra (Figura 44 y 45).

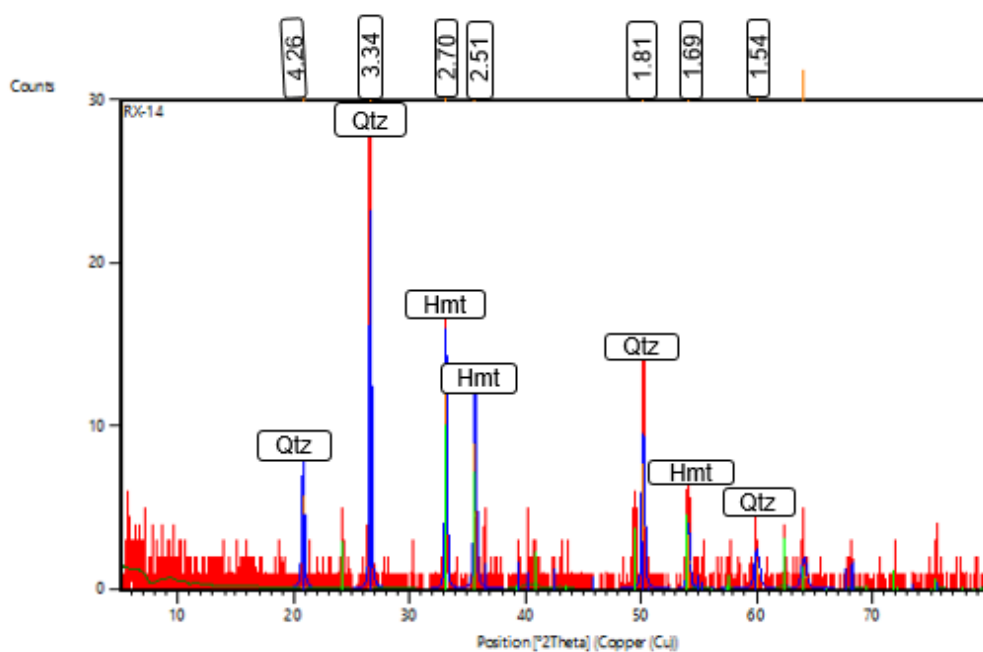


Figura 44. Diffractograma de Rayos-X de la muestra RX₁₄. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Qtz (cuarzo), Hmt (hematita).

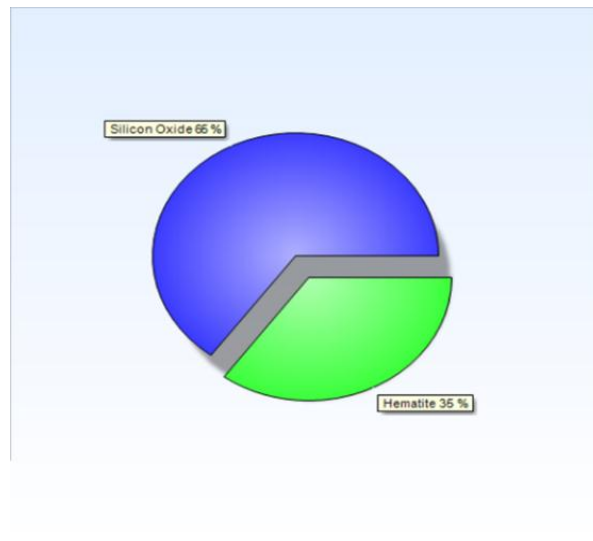


Figura 45. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₁₄, según la DRX.

- Muestra RX₁₆

La muestra RX₁₆ está compuesta básicamente de pirita y cuarzo de coloración claro, brillo metálico (Figura 46)



Figura 46. Foto de la muestra RX₁₆ del yacimiento de Cassinga.

El difractograma detectó los picos: $2.70 \text{ \AA}$, $2.42 \text{ \AA}$, $2.21 \text{ \AA}$, $1.91 \text{ \AA}$ y $1.69 \text{ \AA}$ correspondientes a la pirita FeS_2 que ocupa el 89% de la muestra, además los reflejos $3.12 \text{ \AA}$ y $1.50 \text{ \AA}$ que corresponde al cuarzo SiO_2 que ocupa el 13% de la muestra (Figura 47 y 48).

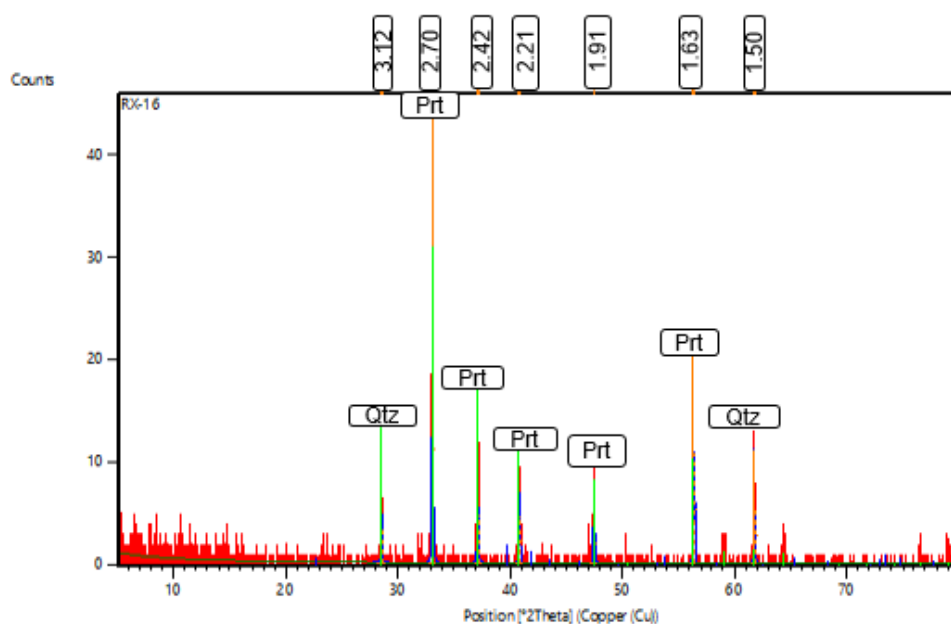


Figura 47. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX_{16} . En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Qtz (cuarzo), Prt (pirita).

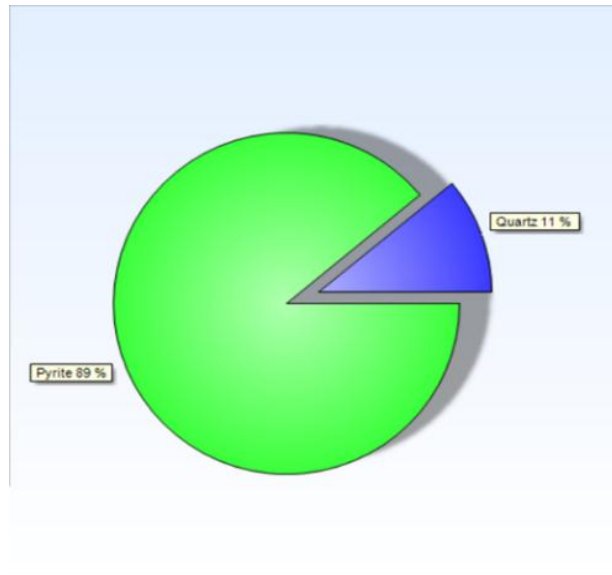


Figura 48. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX_{16} , según la DRX.

- Muestra RX_{17}

La muestra RX_{17} está compuesta básicamente de calcopirita y pirita de coloración claro amarillo latón pálido, brillo metálico (Figura 49).



Figura 49. Foto de la muestra RX_{17} del depósito de Cassinga.

El difractograma captó los principales picos: 2.70 Å⁰, 2.42 Å⁰, 2.21 Å⁰, 1.91 Å⁰ y 1.63 Å⁰ correspondientes a la pirita FeS₂ que ocupa el 80% de la muestra, también los picos: 3.13 Å⁰, 3.04 Å⁰ y 1.86 Å⁰ correspondientes a la calcopirita CuFeS₂ que ocupa el 20% de la muestra (Figura 50 y 51).

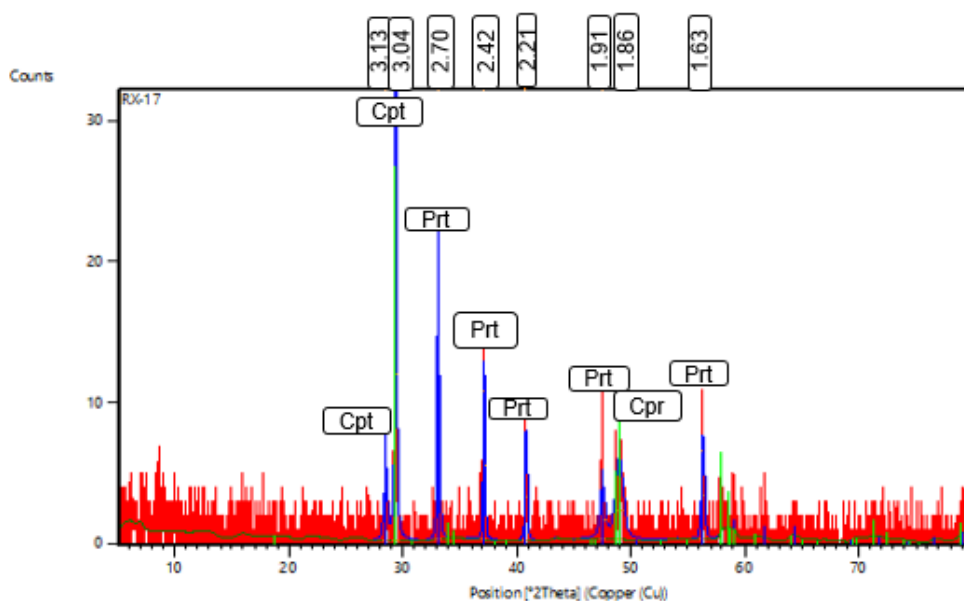


Figura 50. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX₁₇. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Cpt (calcopirita), Prt (pirita).

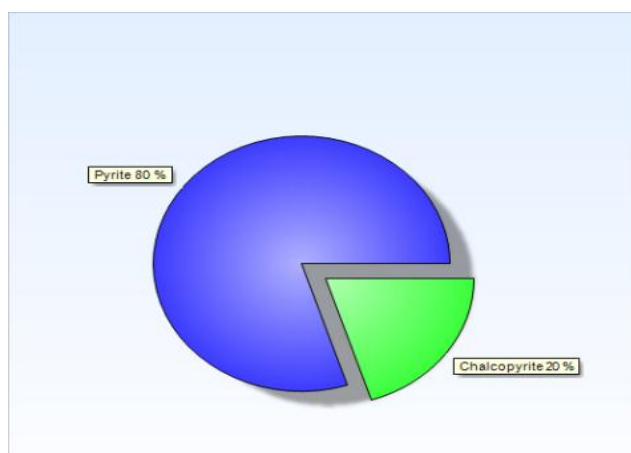


Figura 51. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₁₇, según la DRX.

- Muestra RX₁₉

La muestra RX₁₉ está compuesta básicamente de pirita y hematita de coloración rojo parduzco, brillo metálico (Figura 52)



Figura 52. Foto de la muestra RX₁₉ del yacimiento de Cassinga.

Fueron detectados en el difractograma los picos principales: $2.69 \text{ \AA}^0$ correspondiente a la hematita Fe_2O_3 que ocupa el 82,4% de la muestra y $2.52 \text{ \AA}^0$, $1.91 \text{ \AA}^0$ y $1.63 \text{ \AA}^0$ correspondiente a la pirita FeS_2 que ocupa el 17,6% de la muestra, además fueron detectadas importantes paragénesis mineral reflejados en los picos: $2.52 \text{ \AA}^0$, $2.70 \text{ \AA}^0$ y $2.21 \text{ \AA}^0$ (Figura 53 y 54).

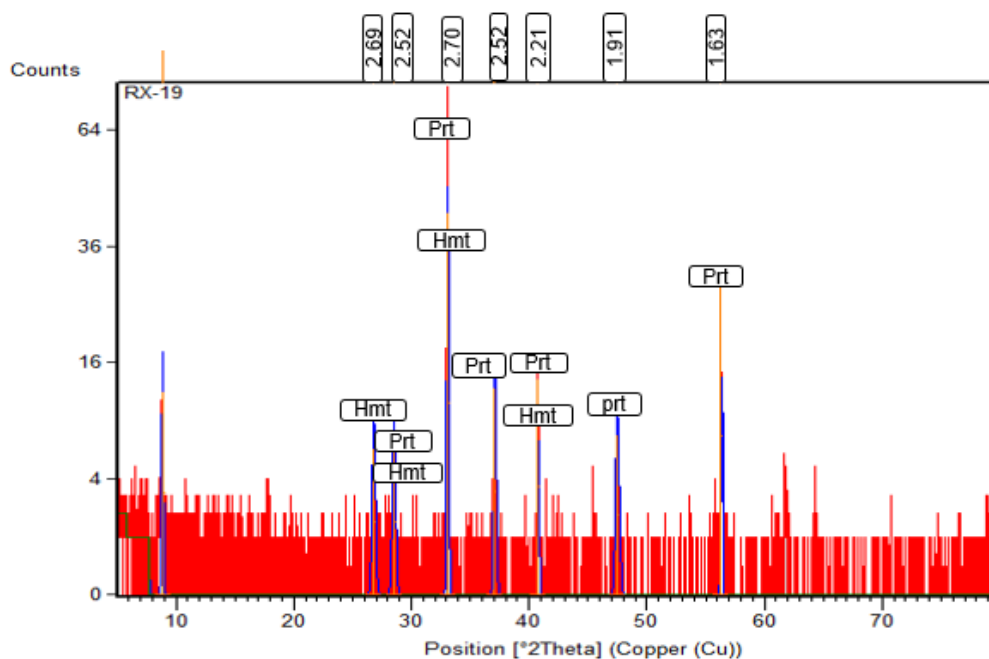


Figura 53. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX₁₉. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Hmt (hematita), Prt (pirita).

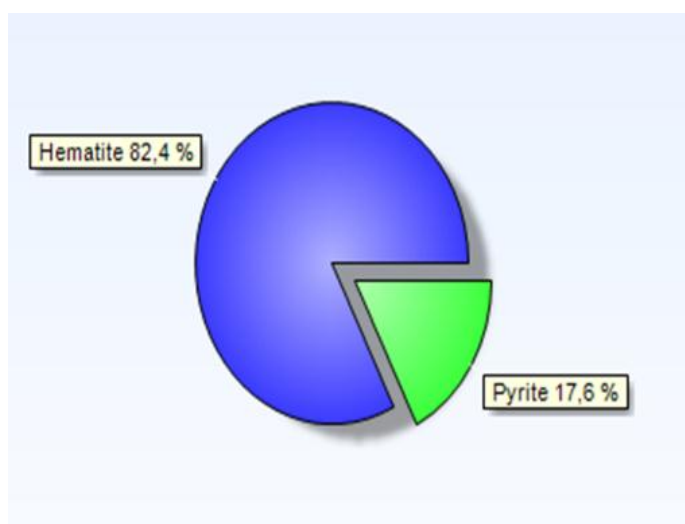


Figura 54. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₁₉, según la DRX.

- **Rio Luembe**

En este sector se realizaron DRX en dos (2) muestras donde se logró hacer la interpretación de los difractogramas de Rayos X

- Muestra RX8

La muestra RX₈ está compuesta por dolomita y cuarzo, color rojizo grisáceo y granulometría fina (Figura 55).



Figura 55. Foto de la muestra RX₈ del Rio Luembe.

En el difractograma se detectaron los picos: 2.88 A⁰, 2.19 A⁰ y 2.01 A⁰ correspondientes a la dolomita (CO₃)₂CaMg que ocupa el 53% de la muestra, además fueron detectados los picos: 4.26 A⁰, 3.34 A⁰ y 1.54 A⁰ del cuarzo ocupando los restantes 47% de la muestra (Figura 56 y 57).

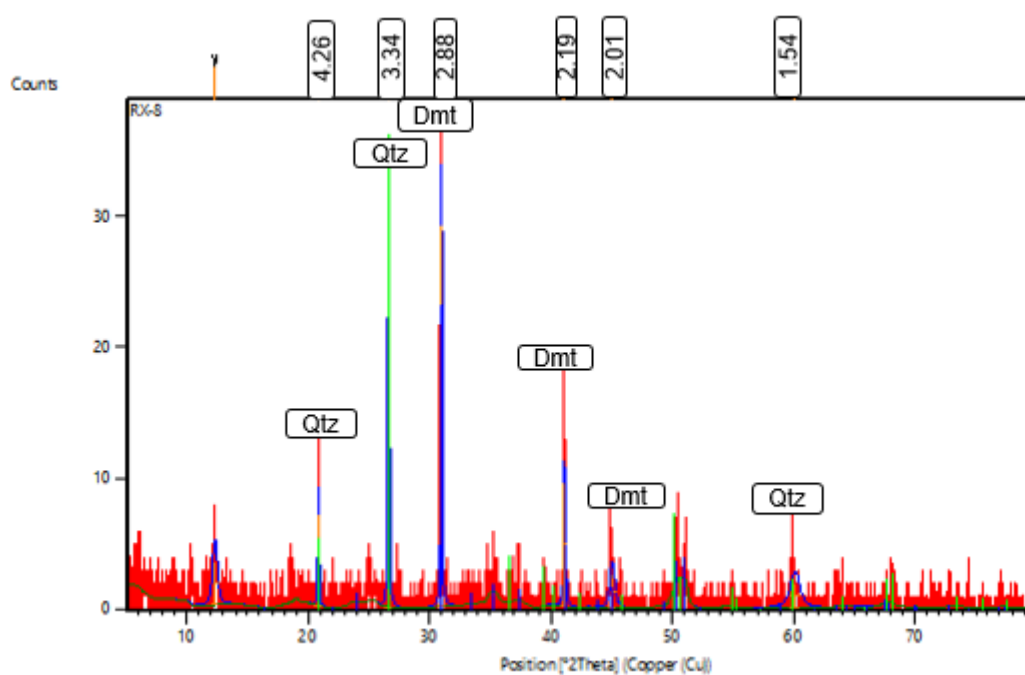


Figura 56. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX₈. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Qtz (cuarzo), Dmt (dolomita).

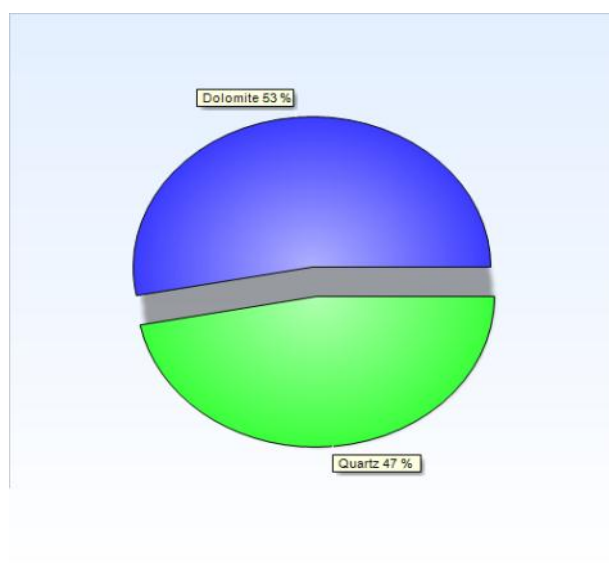


Figura 57. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₈, según la DRX

- Muestra RX₁₃

La muestra RX₁₃ está compuesta básicamente de hematita de coloración oscuro negro de hierro y brillo metálico (Figura 59).



Figura 58. Foto de la muestra RX₁₃ del Rio Luembe.

Los principales picos detectados por el difractograma fueron: 2.69 Å⁰, 2.52 Å⁰, 2.20 Å⁰ y 1.48 Å⁰ pertenecientes a la hematita Fe₂O₃ ocupando el 100% de la muestra (Figura 60 y 61).

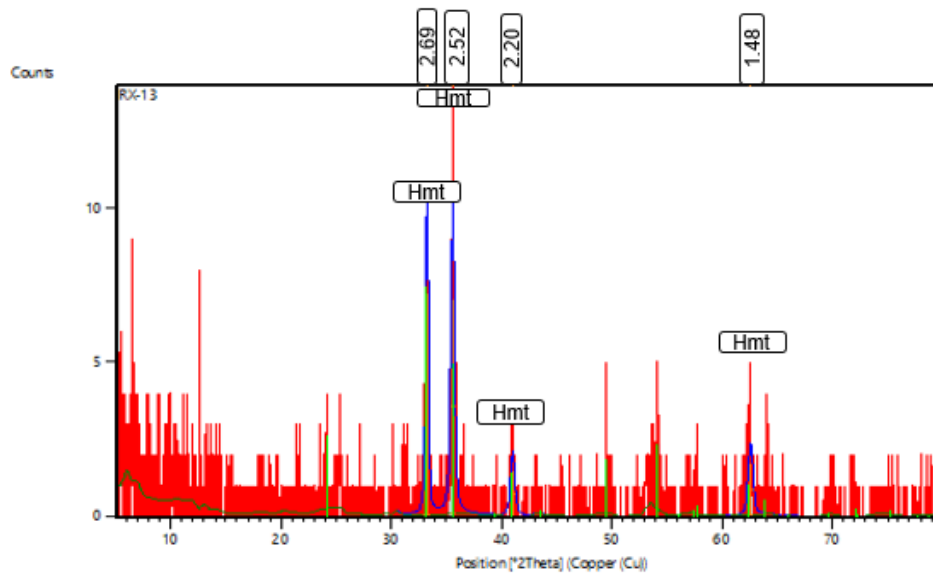


Figura 59. Difractograma de Rayos-X de la muestra RX₁₃. En la parte superior se exponen los valores difractométricos en angstrom. Hmt (hematita).

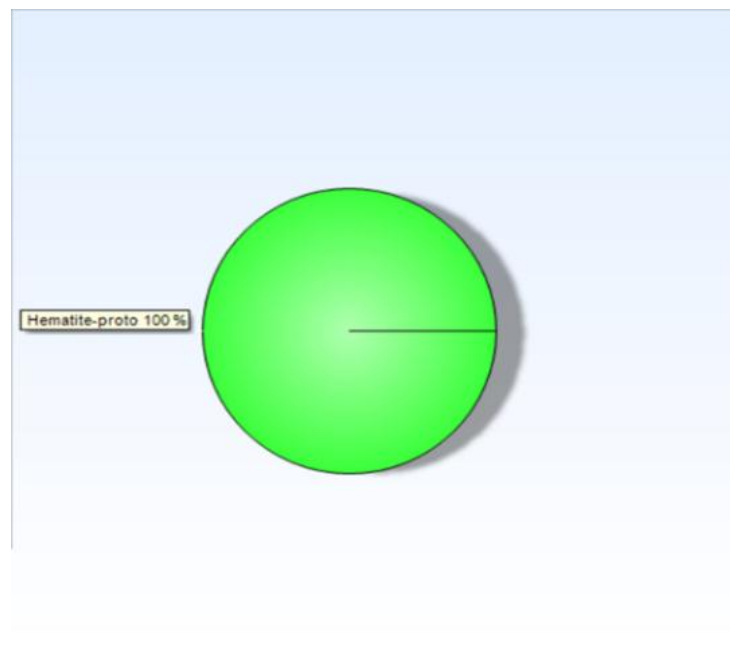


Figura 60. Composición mineralógica cuantitativa de la muestra RX₁₃, según la DRX.

3.3 Discusión de los resultados

El depósito del Saia se caracteriza por la presencia de minerales abundantes como los óxidos (hematita Fe_2O_3), (magnetita Fe_3O_4), también se pudo observar la presencia de un hidróxido (limonita $(\text{FeO}(\text{OH})\text{nH}_2\text{O})$ que es una especie similar a la goethita utilizada principalmente para referirse a óxidos de hierro naturalmente hidratados de identidad incierta, el difractograma la leyó como (goethita $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$) por ser más representativo, además fue encontrado un sulfuro (pirita FeS_2) y sílice (cuarzo SiO_2).

En el depósito del Cuíma fueron seleccionadas dos muestras representativas y se hizo el análisis de difracción de rayos x en las mismas donde los resultados obtenidos apuntan para una mineralización ferrífera bastante acentuada dado que las muestras de estos depósitos están compuestas por óxidos de hierro (hematita Fe_2O_3), las dos pertenecientes a la variedad terrosa, la segunda muestra además del óxido de hierro posee sílice cuarzo SiO_2 , se denominó hematita jaspoide por hacerse presente la variedad criptocristalina granular del cuarzo (jaspe) de color rojo por inclusiones del oligisto (hematita), a esta muestra igual se le puede denominar ocre rojo por pertenecer a la variedad terrosa roja de la hematita.

Los yacimientos de Cassinga que son considerados los mayores y más representativos de los minerales de hierro de Angola, se presentan minerales abundantes como óxido (hematita Fe_2O_3), la (magnetita Fe_3O_4), se encontraron además dos sulfuros la (pirita FeS_2) y la (calcopirita CuFeS_2), además se pudo observar un material silíceo el (cuarzo SiO_2). En esos mismos yacimientos fue identificado itabirito que es una importante roca de hierro, tiene su contenido de Fe entre 50% y 55%, es químicamente compuesto por sílice y hierro, con estructura bandeada alternadamente por silicatos (generalmente cuarzo) y óxidos de hierro como la hematita (magnetita).

En el Rio Luembe se hizo análisis de difracción de Rayos X en dos muestra pudiéndose identificar el óxido de hierro (hematita Fe_2O_3), también se pudo observar

un carbonato la (dolomita $(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$), además de ellos fue encontrada la sílice (cuarzo SiO_2). La presencia de minerales de hierro en esta zona está justificada por la presencia de la hematita que es un representativo óxido de hierro poseyendo 70% de Fe en su composición.

CONCLUSIONES

- En el depósito del Saia, la mineralización del hierro (Fe) está representada por hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4), también se observa en algunos casos alteraciones superficiales debido a la presencia de limonita ($\text{FeO (OH) } n\text{H}_2\text{O}$). Existe mineralización de sulfuros como la pirita (FeS_2) y calcopirita (CuFeS_2), además de sílice: cuarzo (SiO_2) asociados a los minerales de hierro en este depósito.
- En el depósito del Cuíma la mineralización del Fe es esencialmente hematita (Fe_2O_3), la cual se presenta con algunas variedades terrosas.
- En los yacimientos de Cassinga la mineralización del Fe está representada por óxidos de hierro (hematita y magnetita) y una mineralización sulfurosa de hierro y cobre (pirita y calcopirita) asociada a material silicio (cuarzo).
- En el Rio Luembe la mineralización de hierro (hematita), está asociada a componente carbonatado (dolomita y cuarzo).
- Los yacimientos de hierro de Angola, de acuerdo a las paragénesis minerales identificadas son del tipo metamorfogénicos; sin embargo Cassinga presenta sulfuros que se asocian a índices de alteraciones hidrotermales y está relacionado con trapps de altas temperaturas cerca de la superficie.

RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda profundizar en los aspectos petrográficos y geoquímicos para completar el estudio de la mineralización de hierro en Angola.
- ❖ Dar continuidad al estudio de los minerales de hierro presentes en las áreas de estudio que constituye un mineral valioso.

BIBLIOGRAFÍA

- Araújo, A.G & Guimaraes, F. 1992. Geologia de Angola: Notícia Explicativa da Carta Geológica de Angola a escala 1: 1000.000". Serviço Geológico de Angola, Luanda.
- Ariosa, J., 1977 Curso de yacimientos minerales metálicos, tipos genéticos. Editorial Pueblo y Educación, plaza de la revolución ciudad de la Habana. Pp'9-21
- Carvalho, H. & Alves, P (1993): The precambrian of SW Angola and NW Namibia. General Remarks. Correlation analysis. Economic geology. Em : Comunicações. Instituto de Investigação Tropical.
- Correia, H. (1976). O Grupo Chela e a Formação Leba como Novas Unidades Littostratigraficas Resultantes da Redefinição da "Formação da Chela" na Região do Planalto da Humpata (Sudoeste de Angola). Bol. Soc. Geol. Portugal, Vol. 20, pp 65-130.
- Da Cunha Gouveia J., y outros(1993). Riquezas minerais de Angola, instituto para a Cooperação Económica. Cooperação portuguesa.
- Formoso, et al., 1984. Comportamento de cinzas de misturas de carvões para PCI de alto-forno em testes de fusibilidade e de viscosidade : relação com a composição química e mineralógica.
- Ignacio Subias, Isabel Fanlo y Jose Manuel (2011) Geology and mineralogy of the Cateruca BIF deposit (Huila province, Angola).
- Inglés, R., et al., 2015. Informe de trabajo de metalogenia: características metalogenéticas de los minerales de Fe UAN).
- Manual_de_mineralogia_DANA_3ª_edicion. Pp'229-442
- Mendes 2012 .Aplicação dos sistemas de informação geográfica na produção de cartografia de risco de ravinas em Angola.

SMINORV, V. I., 1982: Geología de yacimientos minerales, p 34

Viera, F.R., 2014. cluster da água. Angola, uma estratégia colectiva, manual de boas práticas. s.l. s.n.

Warsaw, Poland 2009. Mineral resources of Angola, its importance for the socio-economic and sustainable development of the country. IGA(Instituto Geológico de Angola), international workshop on united nations Framework classification for fossil energy and mineral reserves and resources 2009(UNFC- 2009),21-22 June 2010.

http://www.geociencias.unam.mx/rmolina/Diplomado/yacimientos/yacimientos_1.html

<http://www.banrepcultural.org/museo-del-oro/sociedades/metalurgia-prehispanica/mineria-metalurgia-y-beneficio>

https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Yacimientosminerales.html

https://es.wikipedia.org/wiki/Cristalograf%C3%ADa_de_rayos_X

http://www.xtal.igfr.csic.es/Cristalografia/Yacimiento_mineral

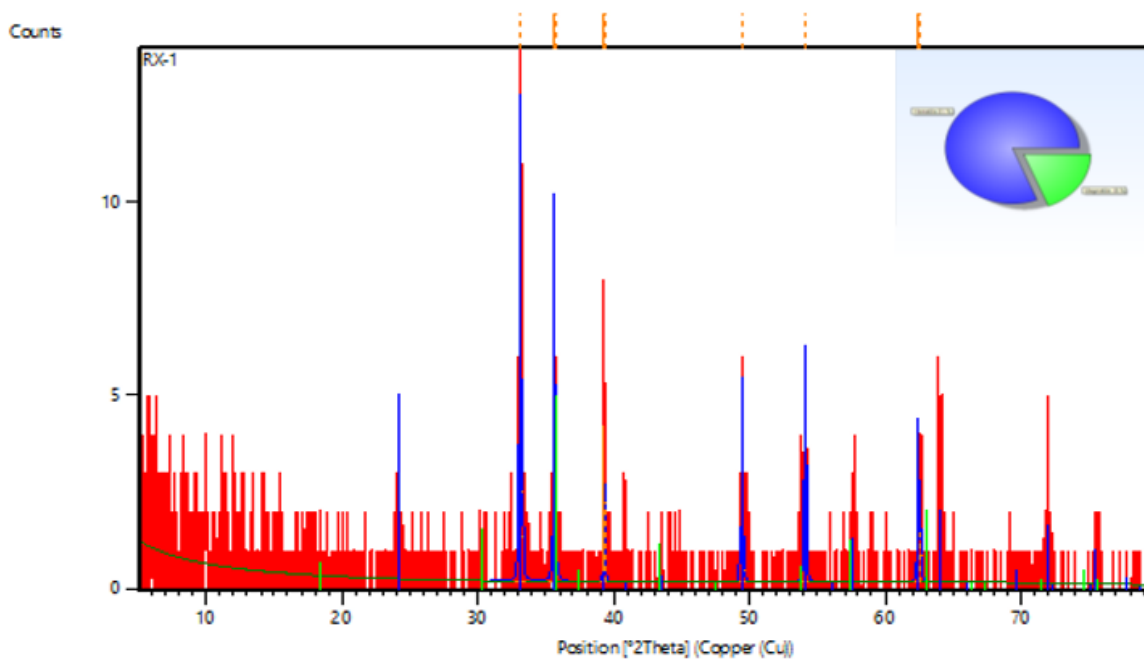
[https://pt.wikipedia.org/wiki/Itabirito_\(rocha\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Itabirito_(rocha))

<https://sapientia.ualg.pt/handle/10400.1/12364>.

ANEXOS

Datos difractométricos de los difractogramas de Rayos-X, empleados los depósitos de hierro de Angola.

Muestra RX₁



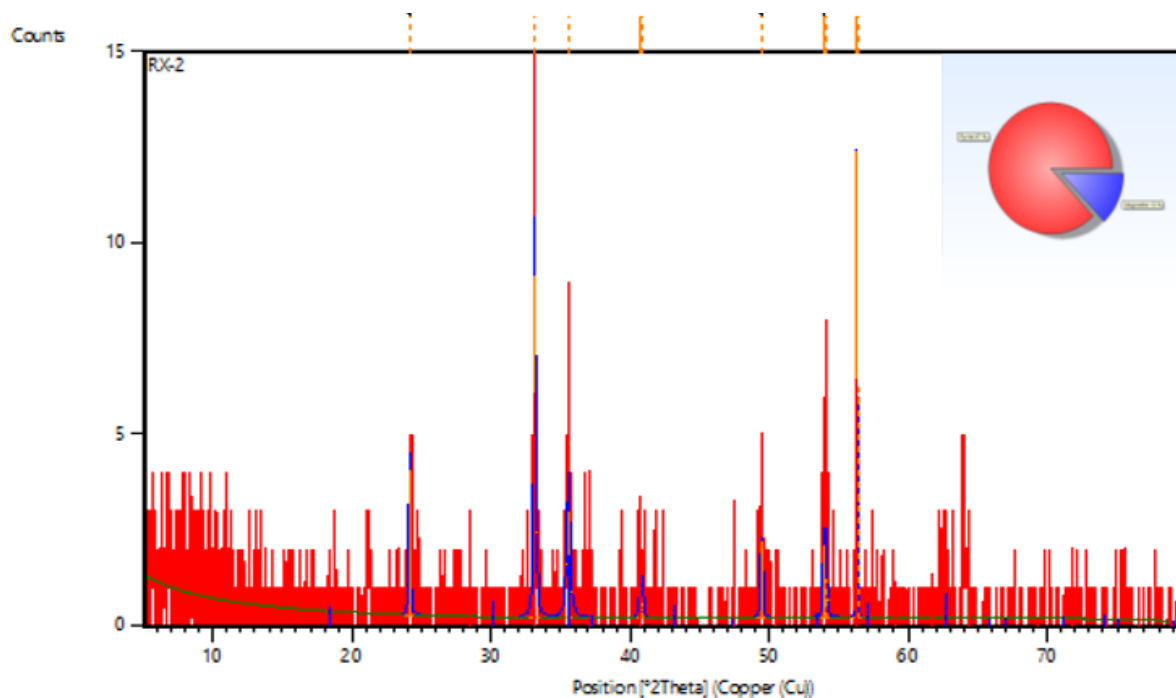
Anexo 1. Datos difractométricos de la muestra RX1

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
33.11(5)	5(3)	0.2(1)	2.70352	76.51
33.19(5)	2(3)	0.2(1)	2.70352	38.26
35.60(1)	6(2)	0.12(8)	2.51962	100.00
35.69(1)	3(2)	0.12(8)	2.51962	50.00
39.28(1)	4(1)	0.05(4)	2.29169	67.32
39.38(1)	2(1)	0.05(4)	2.29169	33.66
49.41(4)	1.2(4)	0.3(2)	1.84308	20.20
49.54(4)	0.6(4)	0.3(2)	1.84308	10.10
54.05(1)	6(1)	0.07(3)	1.69536	96.04
54.19(1)	3(1)	0.07(3)	1.69536	48.02
62.42(2)	3(1)	0.12(5)	1.48645	46.26

62.60(2) 1(1) 0.12(5) 1.48645 23.13

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-101-1241	41	Hematite	0.000	0.901	Fe ₁₂ O ₁₈
*	96-900-5843	4	Magnetite	0.000	0.345	Fe ₂₄ O ₃₂

Muestra RX₂

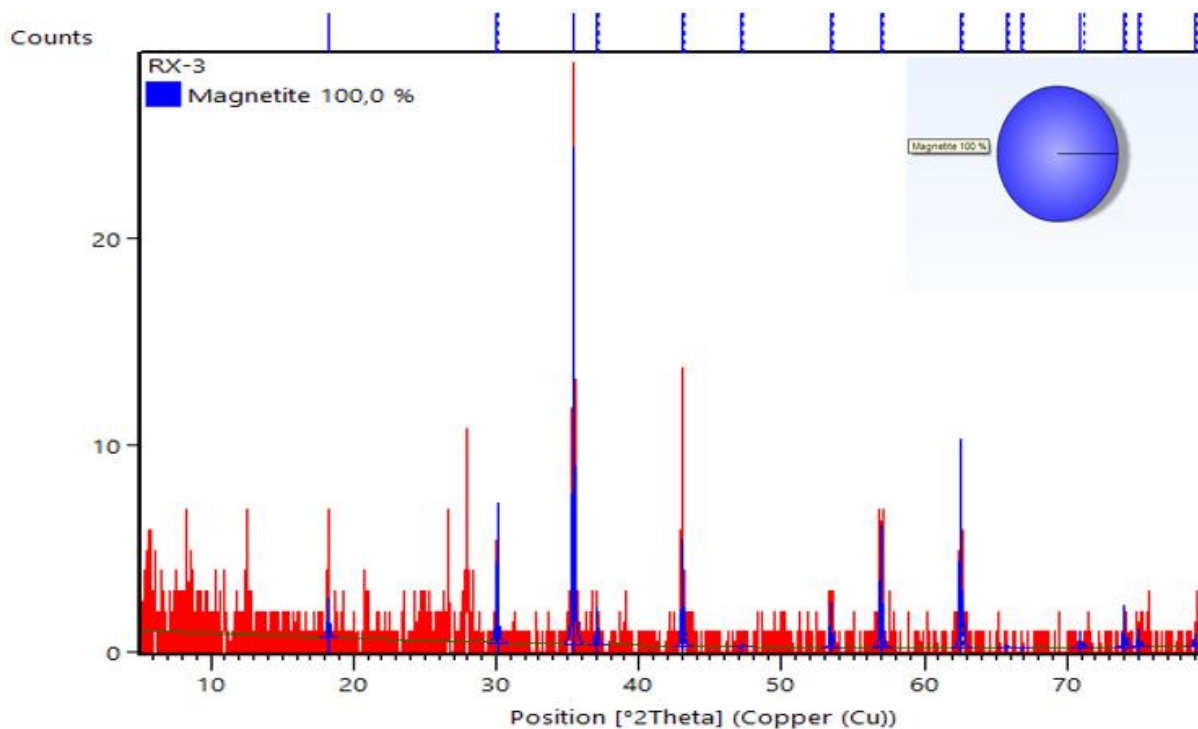


Anexo 2. Datos difractométricos de la muestra RX2

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
24.1437	2.24	0.4723	3.68625	19.77
33.1358	11.35	0.1968	2.70360	100.00
35.5659	4.52	0.3149	2.52425	39.84
40.7454	1.20	0.4723	2.21454	10.57
49.4310	1.94	0.4723	1.84385	17.11
54.0322	3.06	0.3936	1.69720	27.00
56.3020	4.62	0.2362	1.63404	40.73

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-900- 0140	30	Hematite	0.000	0.447	Fe12.00 O18.00
*	96-900- 0595	12	Pyrite	0.000	0.419	Fe4.00 S8.00

Muestra RX₃



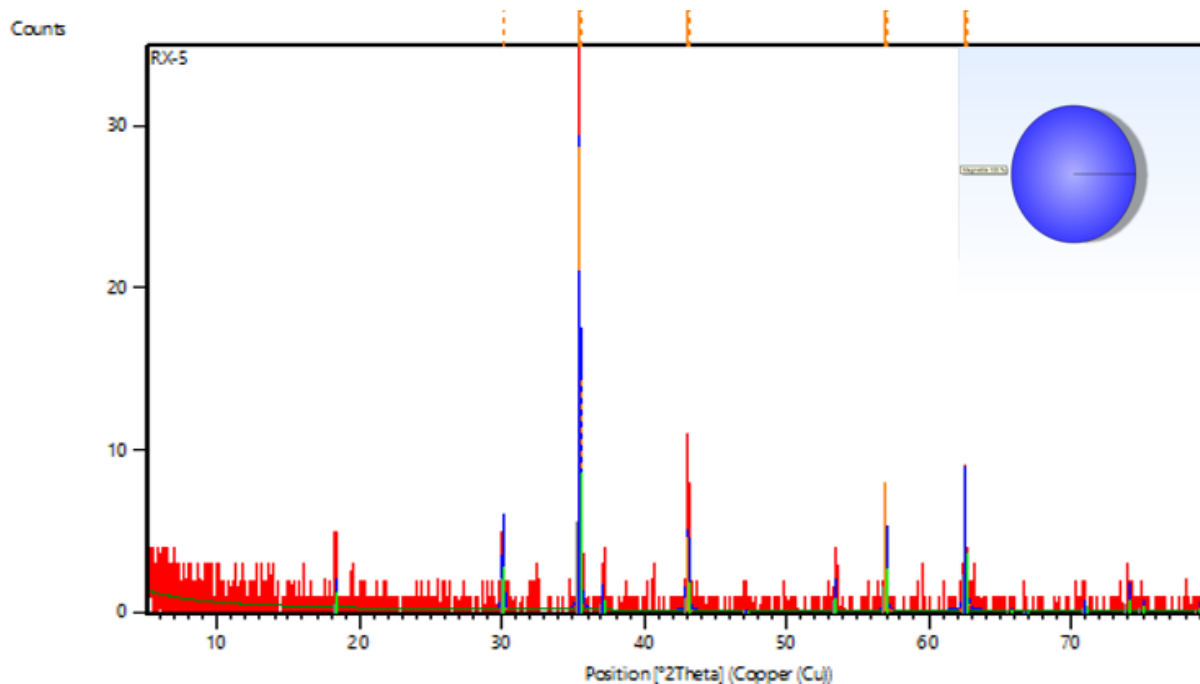
Anexo 3. Datos difractométricos de la muestra RX3

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
18.2520	1(2)	0.1434	4.85668	8.12
18.2978	0(1)	0.1434	4.85665	4.04
30.0487	3(4)	0.1434	2.97149	28.22
30.1252	2(2)	0.1434	2.97148	14.04
35.4005	11(10)	0.1434	2.53357	100.00
35.4914	6(6)	0.1434	2.53356	49.72
37.0324	1(2)	0.1434	2.42558	7.80
37.1279	0(1)	0.1434	2.42558	3.88
43.0318	2(6)	0.1434	2.10029	21.14
43.1441	1(3)	0.1434	2.10028	10.51
47.1189	0(1)	0.1434	1.92719	0.63
47.2432	0.0(3)	0.1434	1.92719	0.32
53.3941	1(3)	0.1434	1.71455	9.49
53.5374	1(2)	0.1434	1.71454	4.71
56.9206	1(1)	0.1434	1.61641	6.27
56.9206	3(5)	0.1434	1.61641	24.76
57.0751	1(3)	0.1434	1.61641	12.31
57.0751	0(1)	0.1434	1.61641	3.12
62.5086	5(6)	0.1434	1.48466	42.14

62.6816	2(4)	0.1434	1.48466	20.94
65.7260	0(1)	0.1434	1.41956	0.95
65.9102	0.1(5)	0.1434	1.41956	0.47
66.7801	0.000(1)	0.1434	1.39969	0.00
66.9680	0.0000(5)	0.1434	1.39969	0.00
70.9190	0(2)	0.1434	1.32781	3.46
71.1221	0(1)	0.1434	1.32781	1.72
73.9555	1(3)	0.1434	1.28062	8.63
74.1702	0(2)	0.1434	1.28062	4.29
74.9571	0(2)	0.1434	1.26597	3.72
75.1757	0(1)	0.1434	1.26597	1.85
78.9201	0(1)	0.1434	1.21204	2.72
79.1548	0(1)	0.1434	1.21204	1.36

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-900-0927	42	Magnetite	0.000	0.765	Fe _{24.00} O _{32.00}

Muestra RX₅

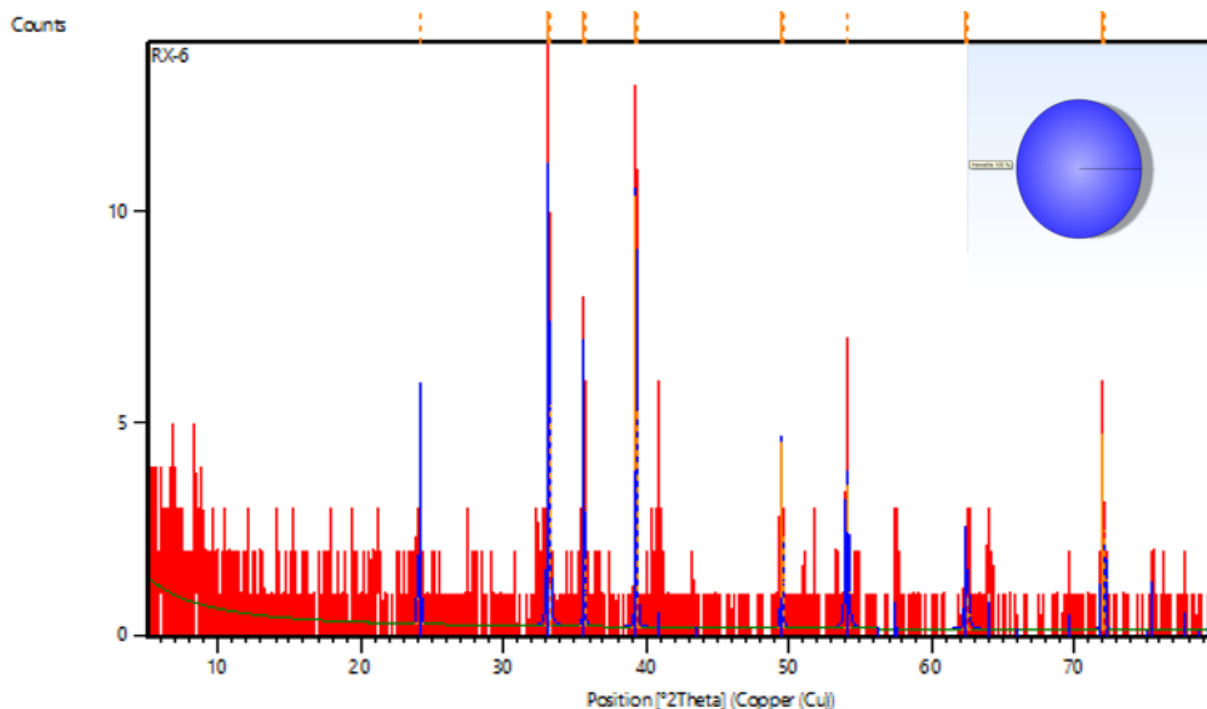


Anexo 4. Datos difractométricos de la muestra RX5

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.06(2)	3(1)	0.19(6)	2.97088	9.02
30.13(2)	1(1)	0.19(6)	2.97088	4.51
35.444(4)	29(4)	0.06(2)	2.53058	100.00
35.535(4)	14(4)	0.06(2)	2.53058	50.00
43.05(1)	5(1)	0.12(4)	2.09955	19.20
43.16(1)	3(1)	0.12(4)	2.09955	9.60
56.943(6)	8(2)	0.06(2)	1.61581	28.44
57.098(6)	4(2)	0.06(2)	1.61581	14.22
62.50(4)	1(1)	0.3(2)	1.48490	5.07
62.67(4)	1(1)	0.3(2)	1.48490	2.54

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-900- 2318	30	Magnetite	0.000	0.600	Fe ₂₄ O ₃₂

Muestra RX₆

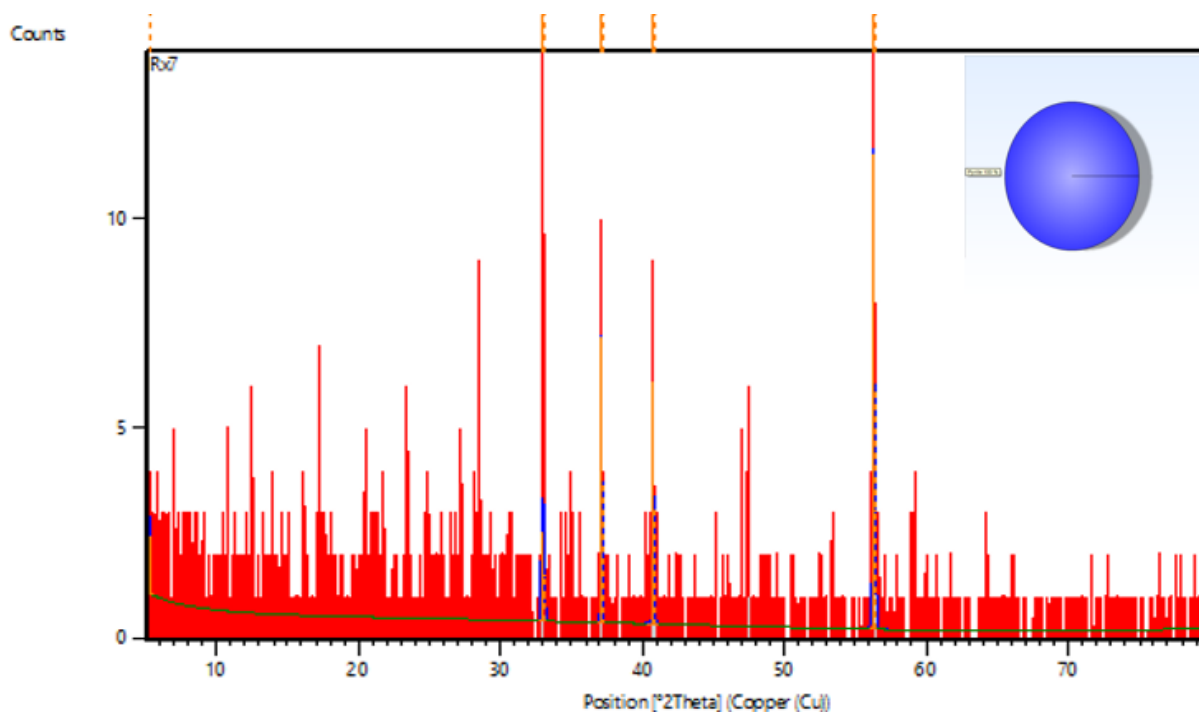


Anexo 5. Datos difractométricos de la muestra RX6

Pos.[°2Th.]	Height [cts]	FWHMLeft[°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
24.08(4)	1.2(4)	0.3(1)	3.69283	11.09
24.14(4)	0.6(4)	0.3(1)	3.69283	5.55
33.140(9)	10(2)	0.08(3)	2.70107	100.00
33.224(9)	5(2)	0.08(3)	2.70107	50.00
35.62(2)	3(1)	0.11(6)	2.51814	30.56
35.72(2)	2(1)	0.11(6)	2.51814	15.28
39.285(8)	10(1)	0.08(2)	2.29155	97.91
39.386(8)	5(1)	0.08(2)	2.29155	48.95
49.469(9)	4(1)	0.06(3)	1.84100	42.49
49.600(9)	2(1)	0.06(3)	1.84100	21.25
54.04(2)	3(1)	0.15(8)	1.69558	32.58
54.18(2)	2(1)	0.15(8)	1.69558	16.29
62.42(4)	1(1)	0.2(1)	1.48651	13.71
62.59(4)	1(1)	0.2(1)	1.48651	6.86
71.974(9)	5(2)	0.06(3)	1.31093	44.60
72.180(9)	2(2)	0.06(3)	1.31093	22.30

Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	96-101-1268	41	Hematite	0.000	0.758	Fe _{12.00} O _{18.00}

Muestra RX₇



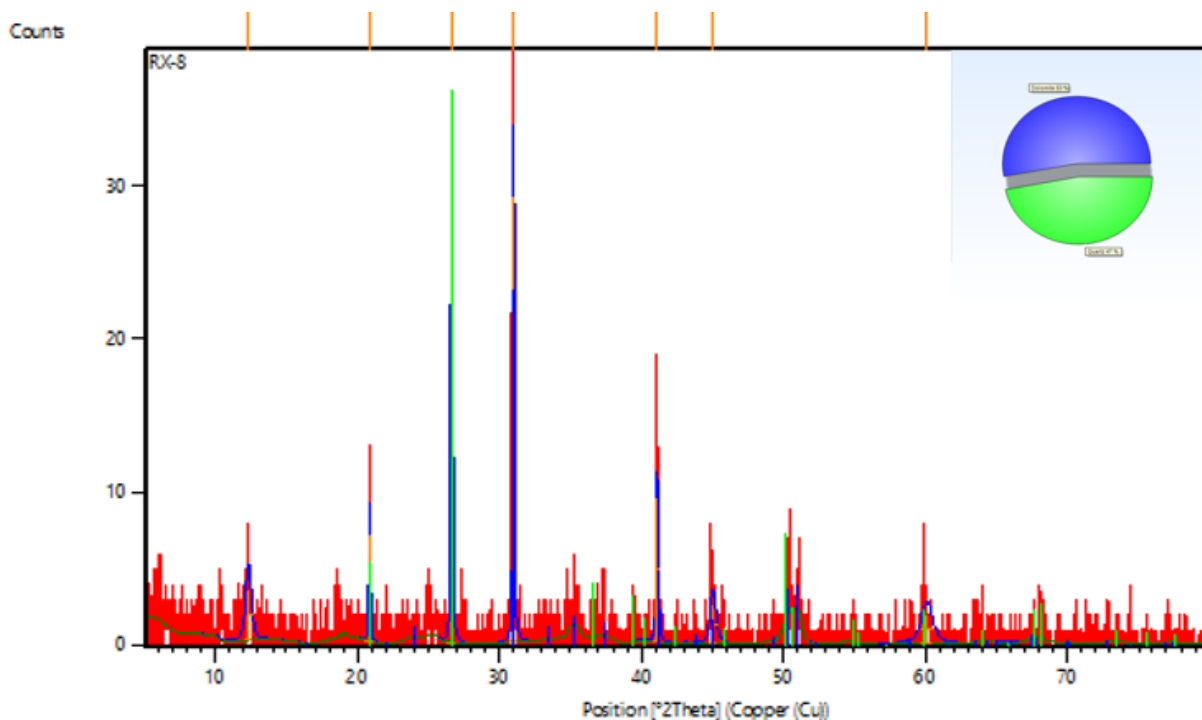
Anexo 6. Datos difractométricos de la muestra RX7

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.29(2)	1(2)	0.03(8)	16.69780	12.35
5.30(2)	1(2)	0.03(8)	16.69780	6.17
32.96(2)	2(1)	0.21(7)	2.71503	19.05
33.05(2)	1(1)	0.21(7)	2.71503	9.53
37.069(8)	7(2)	0.07(1)	2.42325	60.13

37.165(8)	3(2)	0.07(1)	2.42325	30.06
40.743(8)	6(1)	0.07(2)	2.21284	51.12
40.849(8)	3(1)	0.07(2)	2.21284	25.56
56.253(7)	11(2)	0.09(1)	1.63400	100.00
56.405(7)	6(2)	0.09(1)	1.63400	50.00

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-500- 0116	32	Pyrite	0.000	0.824	Fe4.00 S8.00

Muestra RX₈

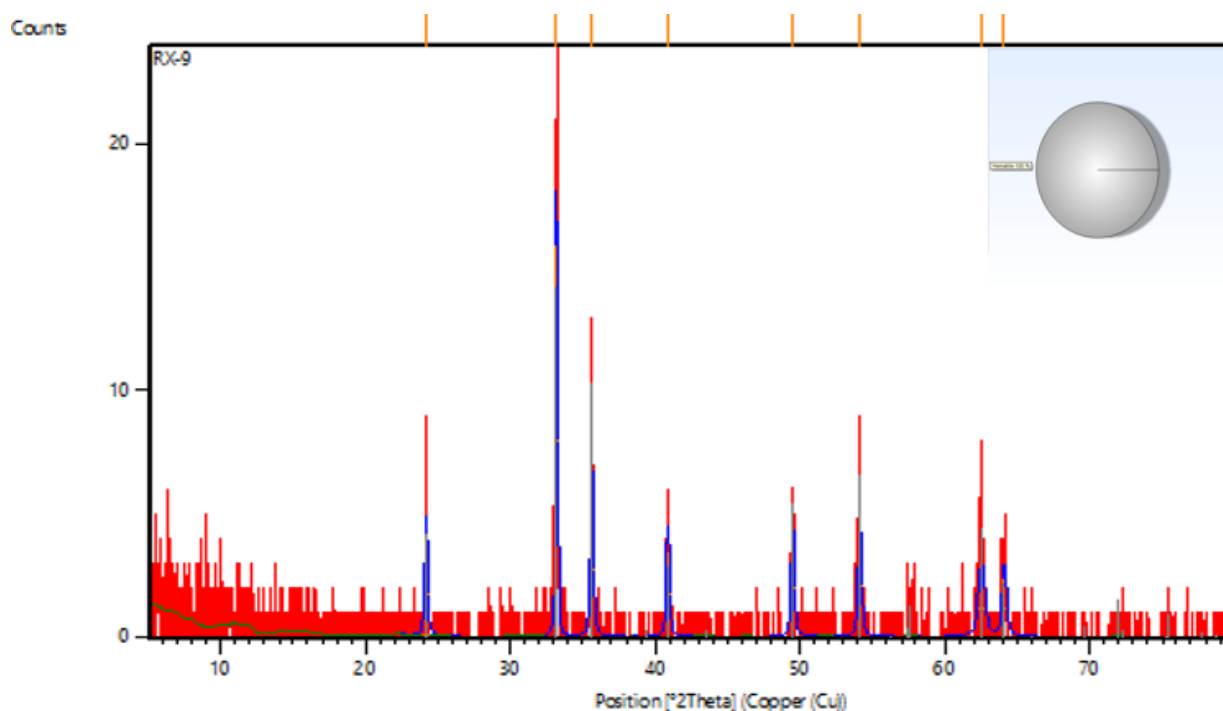


Anexo 7. Datos difractométricos de la muestra RX8

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.3305	3.36	0.4723	7.17845	11.55
20.8501	6.95	0.1181	4.26053	23.86
26.6273	26.81	0.1181	3.34780	92.00
30.9833	29.14	0.1181	2.88635	100.00
41.0979	9.55	0.1574	2.19635	32.78
45.0226	2.53	0.4723	2.01360	8.67
60.0782	1.84	0.9446	1.54005	6.30

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-900- 3522	44	Dolomite	0.000	0.591	Ca3.00 Mg3.00 C6.00 O18.00
*	96-900- 9667	27	Quartz	0.000	0.927	Si3.00 O6.00

Muestra RX₉



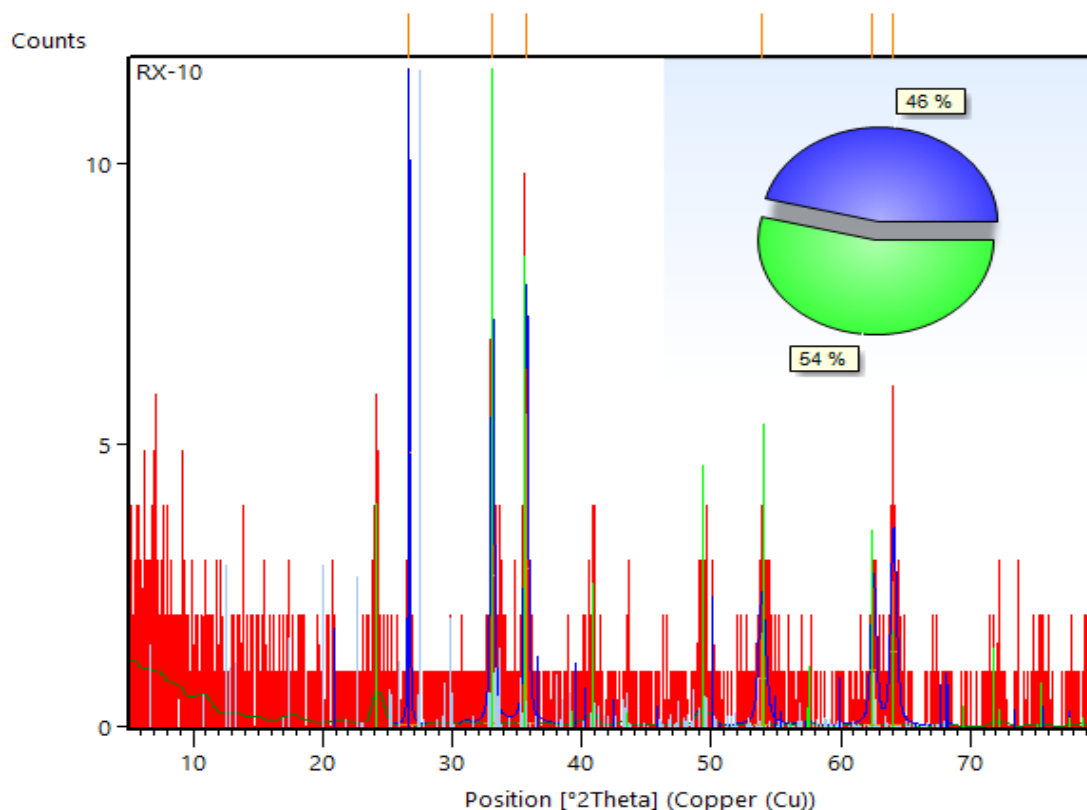
Anexo 8. Datos difractométricos de la muestra RX9

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
-----------------	-----------------	-------------------	------------------	---------------

24.1725	3.42	0.2362	3.68193	21.57
33.1632	15.84	0.1181	2.70143	100.00
35.6058	5.44	0.2362	2.52151	34.36
40.8473	3.45	0.2362	2.20925	21.78
49.4689	3.93	0.2362	1.84252	24.80
54.0991	4.12	0.2362	1.69526	25.99
62.4940	2.25	0.4723	1.48621	14.18
64.0756	2.35	0.3149	1.45328	14.84

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-901- 5965	43	Hematite	0.000	0.594	Fe12.00 O18.00

Muestra RX₁₀

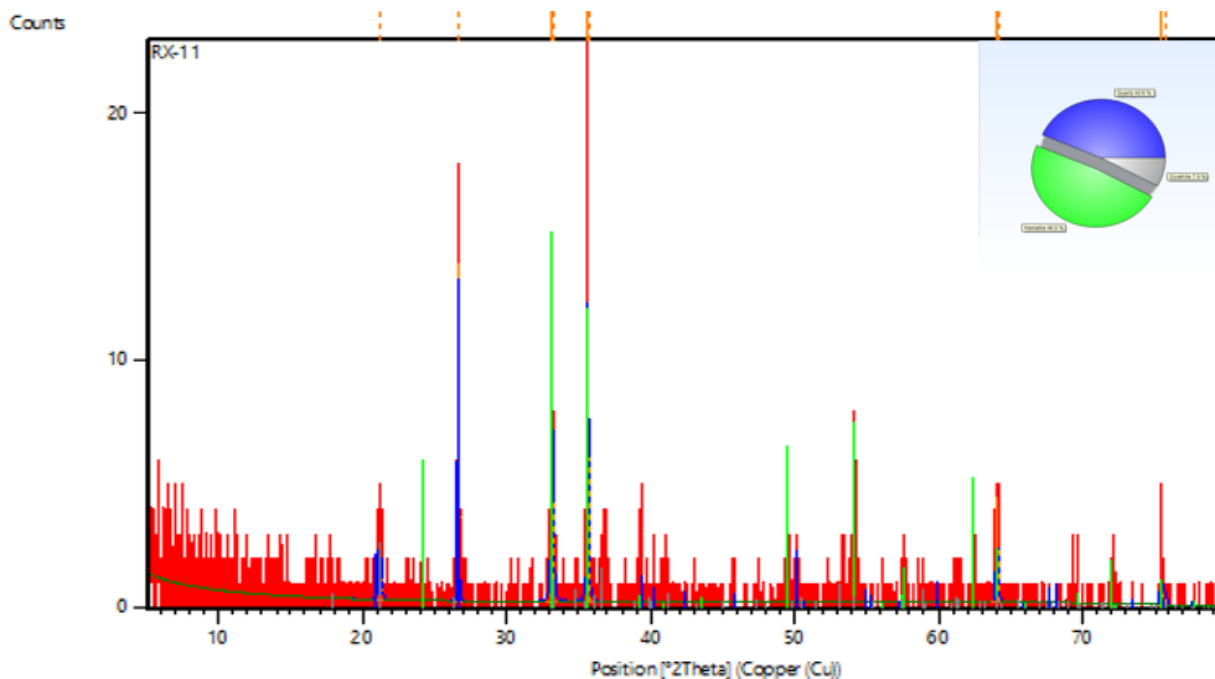


Anexo 9. Datos difractométricos de la muestra RX10

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
26,6490	9,84	0,1181	3,34512	100,00
33,0822	5,33	0,3149	2,70786	54,14
35,7013	5,62	0,3149	2,51499	57,15
53,8927	1,68	0,6298	1,70126	17,06
62,4687	1,99	0,4723	1,48675	20,27
64,0295	2,62	0,4723	1,45422	26,63

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-901-2601	8	Quartz	0,000	1,000	Si3.00 O6.00
*	96-900-0140	3	Hematite	0,000	1,236	Fe12.00 O18.00

Muestra RX₁₁



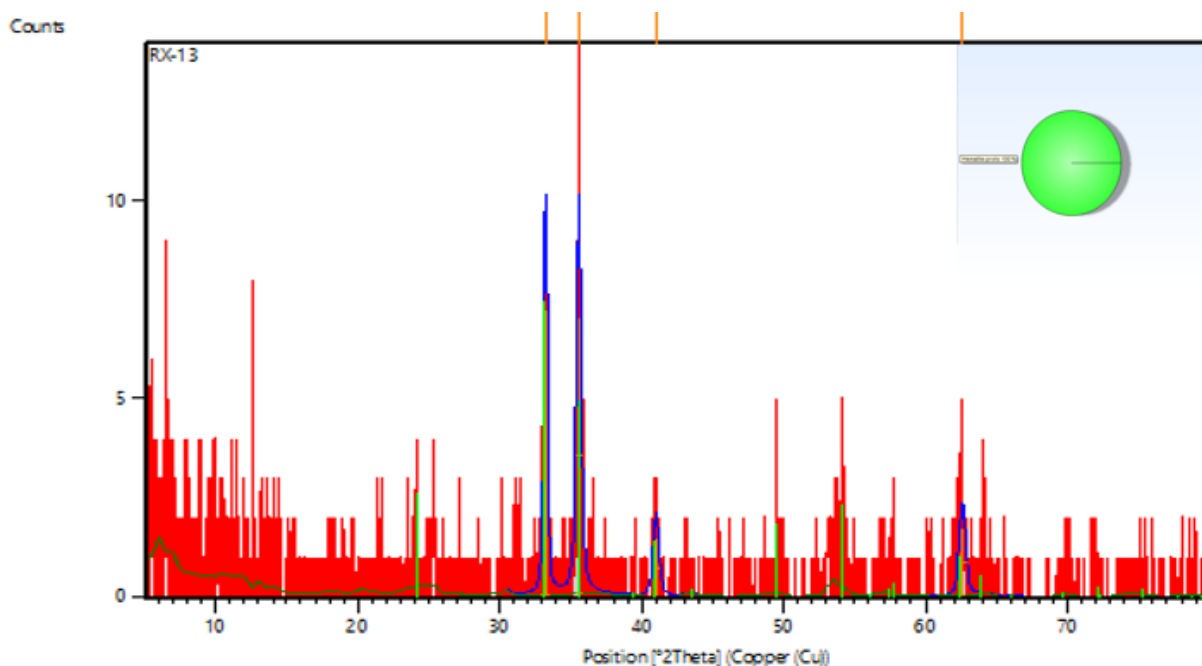
Anexo 10. Datos difractométricos de la muestra RX11

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
21.19(3)	1.6(5)	0.23(9)	4.19022	11.74
21.24(3)	0.8(5)	0.23(9)	4.19022	5.87
26.622(5)	14(2)	0.06(1)	3.34566	100.00
26.690(5)	7(2)	0.06(1)	3.34566	50.00
33.13(1)	9(2)	0.10(5)	2.70174	62.54
33.22(1)	4(2)	0.10(5)	2.70174	31.27

35.617(8)	12(2)	0.08(3)	2.51866	85.21
35.709(8)	6(2)	0.08(3)	2.51866	42.61
63.998(9)	4(1)	0.05(3)	1.45366	31.44
64.176(9)	2(1)	0.05(3)	1.45366	15.72
75.49(7)	1(1)	0.3(3)	1.25840	5.61
75.71(7)	0(1)	0.3(3)	1.25840	2.81

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-900- 9667	28	Quartz	0.000	0.568	Si3.00 O6.00
*	96-101- 1241	23	Hematite	0.000	0.652	Fe12.00 O18.00
*	96-100- 8767	0	Goethite	0.000	0.102	Fe4.00 O8.00 H2.00

Muestra RX₁₃



Anexo 11. Datos difractométricos de la muestra RX13

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
33.2069	7.21	0.2755	2.69798	100.00
35.5413	6.99	0.3936	2.52594	97.08
40.9868	1.46	0.4723	2.20205	20.32
62.5321	1.72	0.4723	1.48539	23.89

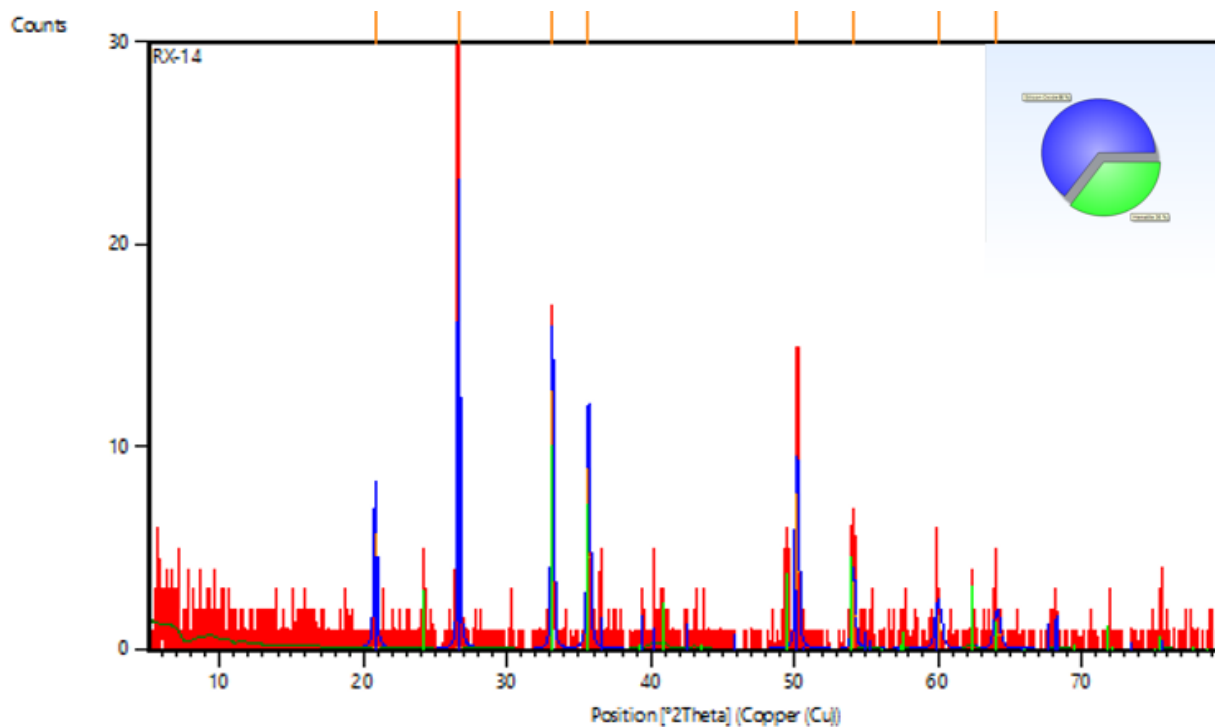
Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-900-	27	Hematite-	0.000	0.532	Fe _{11.40} H _{0.36}

2163

proto

O18.00

Muestra RX₁₄



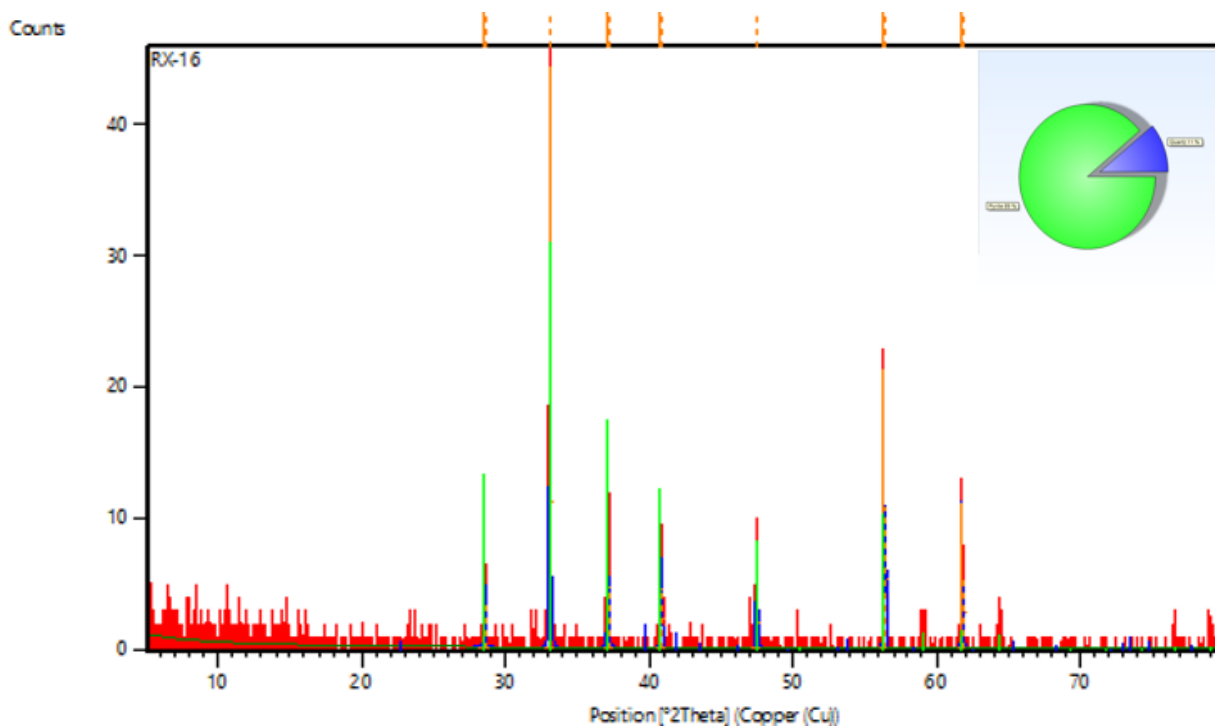
Anexo 12. Datos difractométricos de la muestra RX14

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.8265	5.68	0.2362	4.26529	32.37
26.6345	17.53	0.1574	3.34692	100.00
33.1389	12.86	0.1574	2.70336	73.34
35.6617	9.01	0.2362	2.51769	51.40
50.1580	7.73	0.2362	1.81882	44.07

54.0971	3.33	0.2362	1.69532	18.99
59.9831	1.76	0.4723	1.54227	10.02
64.0666	1.46	0.4723	1.45347	8.31

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-033- 1161	29	Silicon Oxide	0.000	0.695	Si O2
*	96-900- 0140	23	Hematite	0.000	0.337	Fe12.00 O18.00

Muestra RX₁₆



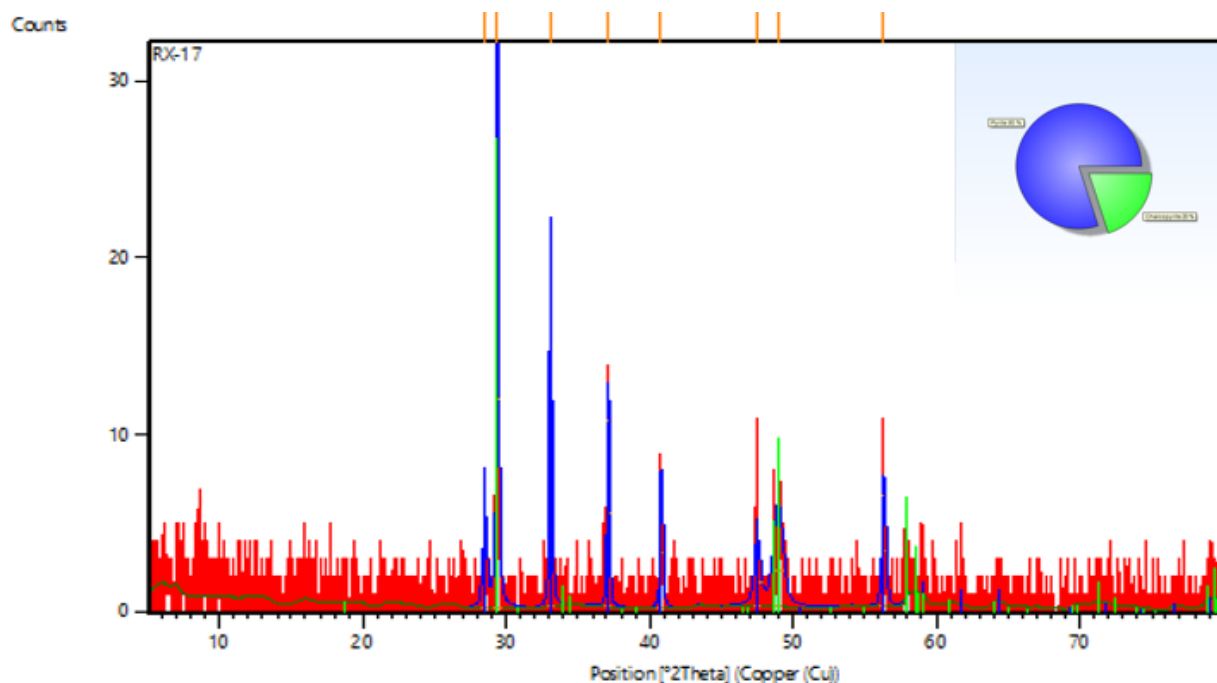
Anexo 13. Datos difractométricos de la muestra RX16

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
28.50(1)	7(2)	0.08(3)	3.12895	16.76
28.58(1)	4(2)	0.08(3)	3.12895	8.38
33.065(3)	44(5)	0.052(8)	2.70700	100.00
33.149(3)	22(5)	0.052(8)	2.70700	50.00
37.086(9)	9(2)	0.07(3)	2.42223	20.88
37.181(9)	5(2)	0.07(3)	2.42223	10.44
40.786(9)	9(2)	0.08(2)	2.21062	20.05
40.891(9)	4(2)	0.08(2)	2.21062	10.02

47.441(8)	8(1)	0.07(2)	1.91485	17.41
47.566(8)	4(1)	0.07(2)	1.91485	8.70
56.295(4)	21(2)	0.08(1)	1.63287	48.08
56.448(4)	11(2)	0.08(1)	1.63287	24.04
61.710(4)	11(2)	0.05(1)	1.50194	25.17
61.881(4)	6(2)	0.05(1)	1.50194	12.59

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-901- 2606	13	Quartz	0.000	0.149	Si3.00 O6.00
*	96-901- 3070	71	Pyrite	0.000	0.671	Fe4.00 S8.00

Muestra RX₁₇

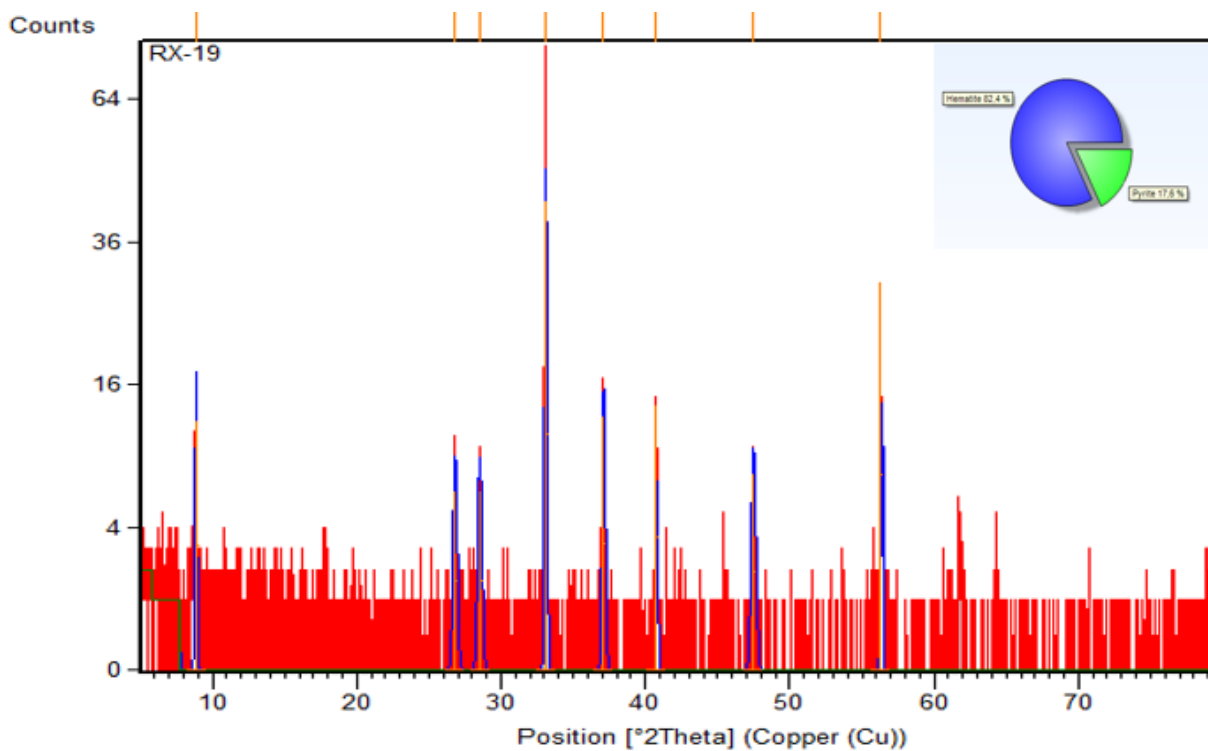


Anexo 14. Datos difractométricos de la muestra RX17

Pos. [2θ .]	Height [cts]	FWHM Left [2θ .]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
28.4982	3.78	0.3149	3.13213	15.93
29.3769	23.69	0.1968	3.04041	100.00
33.0746	17.66	0.1574	2.70847	74.54
37.0944	10.59	0.1574	2.42368	44.72
40.8100	6.34	0.1968	2.21118	26.77
47.4751	2.73	0.4723	1.91514	11.52
48.9408	4.01	0.7872	1.86116	16.91
56.3043	6.35	0.2362	1.63398	26.82

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-901- 3070	47	Pyrite	0.000	0.581	Fe ₄ .00 S ₈ .00
*	96-900- 7573	27	Chalcopyrite	0.000	0.827	Cu ₄ .00 Fe ₄ .00 S ₈ .00

Muestra RX₁₉



Anexo 15. Datos difractométricos de la muestra RX19

