

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**PROPUESTA PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE  
PROCESAMIENTO DE CASITERITA, PROVENIENTE DEL SECTOR LA  
ESPERANZA, ESTADO BOLÍVAR, VENEZUELA**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Br. Bogarín De Sousa José Joaquín  
Br. Solórzano Sulbarán David Orlando  
Para optar al Título  
Ingeniero de Minas

Caracas, noviembre de 2023.

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **PROPUESTA PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE CASITERITA, PROVENIENTE DEL SECTOR LA ESPERANZA, ESTADO BOLÍVAR, VENEZUELA**

Tutor académico: Profesora Katherine Silva

Co-Tutor: Profesor Lenin González

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Br. Bogarín De Sousa José Joaquín  
Br. Solórzano Sulbarán David Orlando  
Para optar al Título  
Ingeniero de Minas

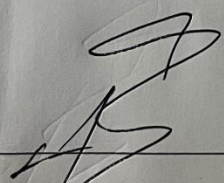
Caracas, noviembre de 2023.

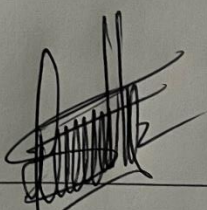
Caracas, 24 de noviembre de 2023

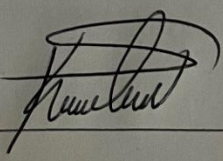
Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los **Br. José Joaquín Bogarín De Sousa** y **Br. David Orlando Solorzano Sulbarán**, titulado:

**“PROPUESTA PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE CASITERITA, PROVENIENTE DEL SECTOR LA ESPERANZA, ESTADO BOLÍVAR, VENEZUELA”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducentes al Título de Ingeniero de Minas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas de los autores, lo declaran **APROBADO**.

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Alejandro Labrador**  
(Jurado)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. José Gregorio Hernández**  
(Jurado)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Katherine Silva**  
(Jurado)

## DEDICATORIA

A Dios

A la Virgen del Valle

A mis padres, Carlos Bogarín y Flor De Sousa

A mi manita, María Celeste Bogarín

A mis abuelos, Joao, Antonio, Carmen Vidalina y María de Lourdes

A mi tío, Elías González

*José Joaquín*

## DEDICATORIA

A Dios y a la Santísima virgen María.

A mis padres, Apolinar Solórzano e Iraidá Sulbarán.

A hermanos, María Victoria y Esteban de Jesús.

A todos mis familiares.

*David Solórzano*

## AGRADECIMIENTOS

En principio, quiero agradecer a Dios y a la Virgen del Valle, por guiarme, iluminarme, fortalecerme, ayudarme y colmarme de sabiduría, para completar mis estudios de pregrado.

Agradezco a mis padres, por ser ese motor de lucha inquebrantable en mi vida, a ustedes que nunca dudaron ni un segundo de mis capacidades, por sus bendiciones, consejos, por acompañarme en cada aventura a lo largo de mi trayectoria en la Universidad. Mamá gracias por ir conmigo el primer día de clases, cuando la incertidumbre colmaba mi ser. Papá gracias por enseñarme la Universidad, cada pasillo, cada rincón, cuando las ansias por conocer lo desconocido era inminente, nunca olvidaré que mi primera vez en el comedor universitario fue contigo, momentos únicos.

A ti manita, te agradezco por tu apoyo incondicional, complicidad, por tu deseo de verme triunfar, por ser ese pilar fundamental que me sostuvo cuando más lo necesite y nunca dejarme caer. Me impulsaste a culminar mi Trabajo Especial de Grado, para ti, el mundo entero.

A ti, tío Elías, que me ayudaste, guiaste y aconsejaste, para ingresar a la Universidad, fuiste el cimiento de las bases donde construí quien soy hoy día, y esa estrella guía en la culminación de mis estudios. Siempre te recordaré.

A mi compañero, amigo y colega, David Solorzano, por permitirme la oportunidad de desarrollar en conjunto este Trabajo Especial de Grado, por el trabajo en equipo, por confiar en mis capacidades, gracias.

A nuestros tutores, quienes confiaron en nuestras destrezas, proporcionaron todas las herramientas necesarias para lograr los objetivos planteados y suministrarnos toda su asesoría magistral.

A todos mis profesores universitarios.

A mi novia, Madeleine, por su incondicionalidad, amor y entrega, saliendo de su zona de confort y acompañarme en la aventura, de principio a fin, de este Trabajo Especial de Grado, me ayudaste a conseguir el norte entre tanta adversidad, gracias por llegar a mi vida, Formosísima Sultana. A mis suegros, Mayra y José, gracias por su apoyo, consejos, por la confianza y creer en mí. También a mi cuñado, Huziel.

A Junín, mi cuñado, gracias por siempre creer que lo lograría, por tu lealtad, incondicionalidad y tus consejos de hermano.

A mis amigos de la Universidad.

Al personal que trabaja en los laboratorios utilizados.

A quienes de alguna u otra manera aportaron su granito de arena para la culminación de todos los requisitos académicos como Ingeniero de Minas.

Siempre estaré profundamente orgulloso de haber formado parte de la Universidad Central de Venezuela, lugar donde pernota la voluntad de cultivar el conocimiento como pilar fundamental de cada profesional, experiencia única e inigualable. Gracias UCV, la casa que vence la sombra.

***Me siento infinitamente agradecido, simplemente, gracias a todos***

***José Joaquín***

## AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen del Camino Neocatecumenal por ser mi fuente de fortaleza, guía y consuelo durante todo el proceso de desarrollo de este trabajo. Su amor y su protección han sido pilares fundamentales para culminar esta etapa con éxito.

A mis padres, Iraida y Apolinar, y a mis hermanos, María y Esteban, por ser mi pilar y mi sostén incondicional durante la realización de este trabajo. Su amor, comprensión y apoyo constante han sido mi mayor motivación y fuente de inspiración para alcanzar este logro académico. Me faltará vida para devolverles todo lo que han hecho por mí.

A mis queridos familiares: mi apreciada abuela Victoria, mis tíos Solibella, Reinaldo, Eduar, Gregorio, Gerardo, Ingrid; así como a mis queridos primos Jesús, María de los Ángeles, Paola, José Silverio y Carla. Su constante apoyo, palabras de ánimo y presencia incondicional fueron de ayuda en mi camino hacia la culminación de este trabajo especial de grado.

A mis mejores amigos Esther Báez, Samuel Muñoz, José Antonio Páez y Luis José Mejías, así como también a mis hermanos de la 2da Comunidad Neocatecumenal de la Parroquia San Carlos Borromeo de Caricuao, por su constante apoyo y amistad incondicional durante este proyecto a lo largo de mi vida.

A la Universidad Central de Venezuela y a la Facultad de Ingeniería por brindarme la invaluable oportunidad de formarme académicamente. El conocimiento adquirido y las experiencias vividas en esta institución han sido fundamentales en mi desarrollo personal y profesional. Estaré eternamente



agradecido por la calidad educativa recibida que me ha permitido llegar hasta este punto en mi camino.

A la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, así como a mis respetados profesores, por brindarme una formación completa tanto en lo profesional como en lo personal. La dedicación y el conocimiento impartido por ustedes han sido fundamentales en mi desarrollo académico y humano.

A mis tutores, Katherine Silva y Lenin González, por confiar en mí y brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto. Además, agradezco su sincera amistad, su corrección amorosa y firme que ha sido fundamental en mi crecimiento académico y personal. Estoy profundamente agradecido por su guía incondicional y apoyo durante todo este proceso.

A mis compañeros de trabajo del IADEMIN, Magda, Mafer, Lenin, Alejandra, Solange, Susana y Nayleth, por su colaboración, compañerismo y apoyo durante este trayecto laboral. Su dedicación y trabajo en equipo han sido fundamentales para el éxito de nuestros proyectos.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis queridos amigos, en especial a Andreina Oberto, Andreina Ramirez, Hemily, Gladys y Cesar Peña, por su inquebrantable amistad, cariño y apoyo en todas las etapas de mi vida. Su presencia y buenas energías han enriquecido mi camino y han hecho este viaje más significativo.

*A todo el que de una u otra manera haya contribuido en este trabajo y en mi vida, Siempre estaremos agradecidos.*

*David Solórzano*

**Bogarín De Sousa, José Joaquín**  
**Solórzano Sulbarán, David Orlando**

**PROPUESTA PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE  
PROCESAMIENTO DE CASITERITA, PROVENIENTE DEL SECTOR  
LA ESPERANZA, ESTADO BOLÍVAR, VENEZUELA**

**Tutora Académica:** Profesora Katherine Silva

Co-Tutor: Profesor Lenin González

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Minas. Año 2023. 123 p**

**PALABRAS CLAVES:** casiterita, concentración gravimétrica, diseño conceptual casiterita, estudio de factibilidad, estaño metálico, La Esperanza- municipio Cedeño-Bolívar (Estado), valor geoestratégico casiterita, separación magnética

**RESUMEN**

La casiterita tiene un notable valor geoestratégico como materia prima para el desarrollo de la industria metalmeccánica y tecnológica. Para esta investigación, su importancia radica, esencialmente, por ser la mena principal de la que se extrae el estaño metálico de forma económica, tomando en cuenta sus importantes propiedades, como la maleabilidad, la ductilidad y resistencia a la corrosión, que lo hacen adecuado para su uso en productos químicos, fabricación de aleaciones y soldaduras en el sector eléctrico, entre otros; generándose un aumento en su demanda comercial por su incremento en los usos finales. Razones por la cual, este estudio incluyó la caracterización geometalúrgica de la casiterita, la evaluación de un circuito de concentración, utilizando métodos gravimétricos y separación magnética, la elaboración de un diagrama de flujo conceptual y el diseño de una propuesta técnico-económica para la construcción y puesta en marcha de una planta de procesamiento de casiterita, proveniente del sector la Esperanza, municipio Cedeño, estado Bolívar. Cabe señalar que, los resultados obtenidos de los ensayos experimentales de laboratorio, fueron analizados como medida comparativa en los mercados internacionales de casiterita y metal de estaño y, bajo las consideraciones requeridas, mostraron que esta fase experimental fundamenta el diseño conceptual y el estudio de factibilidad y rentabilidad de este proyecto.

## INDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	2
EL PROBLEMA .....	2
1.1 Planteamiento del Problema .....	2
OBJETIVOS .....	3
1.2 Objetivo general .....	3
1.3 Objetivos específicos.....	3
JUSTIFICACIÓN .....	4
CAPÍTULO II .....	5
MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
2.1 Antecedentes de la investigación.....	5
2.2 Bases Teóricas .....	8
2.2.1 Geología Regional.....	8
Provincia geológica de Imataca .....	9
Municipio Cedeño .....	10
2.2.2 La casiterita, un mineral .....	10
Generalidades.....	10
El estaño en el mineral de casiterita .....	11
2.2.3 Potenciales depósitos de casiterita en el mundo y en Venezuela.....	12
2.2.4 La casiterita y los métodos gravimétricos de concentración.....	14
El método de concentración: aspectos generales .....	14
La concentración por gravedad .....	16
Métodos gravimétricos de concentración para la casiterita. ....	17
Equipos de concentración gravimétrica .....	18
□ JIG o Pulsadoras.....	18
□ Concentradores de sacudidas (Mesa Wilfley).....	19
Nuevas tecnologías en el procesamiento de la casiterita .....	20
2.2.5 Separación magnética.....	21
Utilidad y factores que influyen en la eficiencia en la separación de mineral de casiterita.....	22
2.2.6 La Geometalurgia.....	23

2.2.7 Balance de masas .....	24
2.2.8 Índices metalúrgicos.....	25
2.2.9 Circuito en el procesamiento de casiterita. ....	26
Descripción de una planta piloto.....	27
2.2.10 Análisis económico del proyecto .....	29
CAPÍTULO III.....	32
MARCO METODOLOGICO .....	32
3.1 Tipo de investigación .....	32
3.2 Diseño de la investigación.....	32
3.3 Unidad de estudio .....	32
3.4 Técnica e instrumento de recolección de datos .....	33
3.5 Metodología de trabajo.....	33
Condiciones iniciales de los equipos .....	34
Revisión bibliográfica de los parámetros operativos .....	35
Desarrollo experimental .....	35
Caracterización Geometalúrgica .....	36
Preparación mecánica de las muestras .....	36
Caracterización física de la muestra .....	36
Distribución granulométrica .....	36
Medición de la densidad relativa por picnómetro.....	37
Estimación del grado de liberación por Microscopia óptica.....	37
Caracterización química .....	37
Caracterización mineralógica mediante la técnica Difracción de Rayos X.....	37
Caracterización mineralógica mediante la técnica Fluorescencia de Rayos X de energía dispersa (FRX-ED).....	38
Ensayos de Concentración gravimétrica .....	38
Preparación de la pulpa .....	38
Ensayos de concentración en la Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver. ....	38
Ensayos de concentración en la Mesa Vibratoria tipo Wilfley .....	40
Ensayo de separación magnética .....	41
Simulación del circuito de concentración. ....	41

Estudio Económico .....	42
Depreciación de equipos .....	43
Método de las unidades producidas.....	44
CAPITULO IV .....	45
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	45
4.1 Condiciones iniciales de los equipos .....	45
Criba hidráulica (JIG) Marca Denver .....	45
Mesa vibratoria tipo Wilfley. ....	48
4.2 Revisión bibliográfica de los parámetros operativos.....	48
4.3 Resultados del desarrollo experimental.....	49
Caracterización Geometalúrgica .....	50
Caracterización física .....	50
Distribución granulométrica.....	50
Distribución granulométrica de la muestra M1-W001.....	50
Distribución granulométrica de la muestra M2-W002.....	51
Medición de la densidad relativa por picnómetro .....	53
Estimación del grado de liberación por Microscopia óptica .....	54
Caracterización química.....	57
Caracterización mineralógica mediante la técnica Difracción de Rayos X .....	57
Caracterización mineralógica mediante la técnica Fluorescencia de Rayos X de energía dispersa (FRX-ED). ....	70
Ensayos de Concentración Gravimétrica y Separación Magnética en los equipos	72
Ensayos de concentración en la Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver .....	72
Ensayos de concentración en la mesa de sacudidas tipo Wilfley .....	74
Ensayo de Separación Magnética.....	79
Índices metalúrgicos.....	79
Discusión de los resultados .....	82
CAPITULO V .....	86
PROPUESTA.....	86
5.1 Diseño conceptual .....	86
5.2 Análisis de factibilidad económica.....	88
Plan de inversión .....	88

Bases de Cálculo e Informaciones Generales. ....	88
Maquinaria. ....	88
Equipos.....	89
Mobiliario.....	89
Depreciación de maquinaria y equipos. ....	90
Ocupación de la Empresa.....	91
Presupuesto de ingresos. ....	93
Estados Financieros.....	95
Flujo de caja y capacidad de pago de la Empresa. ....	96
Indicadores de evaluación. ....	97
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
Conclusiones .....	99
Recomendaciones .....	101
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Provincias Geológicas del estado Bolívar. ....	9
Figura 2. Estructura y cristales del mineral Casiterita .....	11
Figura 5. Formación de la estratificación de las partículas en un ciclo completo de un Jig. ....	19
Figura 6. Principio de funcionamiento de la mesa vibratoria, diferentes modelos de mesas vibratorias. ....	20
Figura 8. Esquema de un equipo de separación magnética (Anaya, 2004), b) Separador magnético Frantz L-1 y C) Separador Magnet-lit,.....	22
Figura 10. Análisis económico de un proyecto minero. Fuente: Zambrano, J. (1994). ....	31
Figura 11. Esquema de la metodología del trabajo .....	34
Figura 12. Fotografía de un JIG Marca Denver 4" x 6", escala Laboratorio. ....	40
Figura 13. Fotografía de una Mesa concentradora de sacudida del laboratorio de termocronología del Departamento de geología- UCV. ....	40
Figura 14. Ventana de del programa MODSIN. ....	42
Figura 15. Clasificación de los métodos de depreciación. ....	43
Figura 16. Fotografía de una Criba hidráulica Marca Denver (JIG) del laboratorio de Termocronología del Departamento de Geología- UCV. ....	47
Figura 17. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la primera fase de corrida del en el JIG de la muestra M1-W0011 .....	54
Figura 18. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la segunda fase de corrida del en el JIG de la muestra M1-W0012 .....	55
Figura 19. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la primera fase de corrida del en el JIG de la muestra M2-W0023 .....	55
Figura 20. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la segunda fase de corrida del en el JIG de la muestra M2-W0021 .....	56

Figura 21. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la primera fase de corrida del en la mesa de sacudidas tipo Wilfley de la muestra M2-W002 .....	56
Figura 22. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la segunda fase de corrida del en la mesa de sacudidas tipo Wilfley de los mixtos de la muestra M1-W001 .	56
Figura 23. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en la muestra cabeza M2-W002.....	58
Figura 24. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la fase 1 del JIG para M1-W0012.....	59
Figura 25. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en P200 de M2-W002. ....	59
Figura 26. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el corte #30 - #200 de M1-W001 .....	60
Figura 27. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la Fase 2 del JIG para M1-W0013 .....	61
Figura 28. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en la muestra cabeza M1-W001.....	62
Figura 29. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la fase 1 de la mesa vibratoria para M2-W002 .....	63
Figura 30. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la Fase 1 del JIG para M1-W0013.....	64
Figura 31. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la Fase 2 del JIG para M2-W0021 .....	65
Figura 32. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el P200 para M1-W001 .....	66
Figura 33. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado del JIG de la fase 2 para M1-W0013.....	67
Figura 34. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado magnético de la mesa en la fase 1.....	68



Figura 35. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la mesa en la fase 1 para M1-W001.....	69
Figura 36. Separación gravimétrica en la mesa vibratoria Wilfley, Fase I, 4 grados de inclinación. ....	77
Figura 37. Concentrado secado M1-W001 y M2-W002, de la mesa vibratoria Wilfley, Fase I.....	77
Figura 38. Separación gravimétrica en la mesa vibratoria Wilfley, Fase II, 6 grados de inclinación.....	78
Figura 39. Productos: Concentrado, Mixto y Colas de M1-W001 y M2-W002 en la mesa vibratoria Wilfley, Fase II, 6 grados de inclinación.....	79
Figura 40. Diseño conceptual para concentrar mineral de Casiterita mediante el Software MODULAR SIMULATOR for MINERAL PROCESSING PLANTS MODSIMtm versión Student 3.6. ....	87

## INDICE DE TABLAS Y GRAFICOS

Tabla 1. Propiedades del mineral de Casiterita. Propiedades .....	10
Tabla 2. Diferentes métodos de concentración de minerales y algunos equipos utilizados. ....	15
Tabla 3. Algunos nuevos equipos avanzados de gravedad y su desempeño en la recuperación de partículas de casiterita.....	20
Tabla 4. Ventajas y desventajas de la separación magnética en la mineral casiterita. ....	23
Tabla 5. Parámetros establecidos en los equipos de concentración gravimétrica utilizados en la fase experimental del estudio.....	35
Tabla 6. Aspectos implicados en un estudio de costos de inversión y de operaciones.....	42
Tabla 7. Diagnóstico del estado físico de la Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver. ....	46
Tabla 8. Diagnóstico del estado físico de la Mesa vibratoria Wilfley. ....	48
Tabla 10. Parámetros operativos en la separación gravimétrica consultados en bibliografía. ....	49
Tabla 11. Distribución granulométrica muestra cabeza M1-W001. ....	50
Tabla 12. Distribución granulométrica muestra cabeza M2-W002. ....	51
Tabla 13. Medición de la densidad relativa por picnómetro.....	53
Tabla 14. Medición de la media aritmética y la desviación estándar de la densidad relativa por picnómetro. ....	54
Tabla 15. Análisis de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersa para muestras provenientes del sector la Esperanza, estado Bolívar. ....	71
Tabla 16. I corrida de concentración en la Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver	72
Tabla 17. II corrida de concentración en la Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver .....	73
Tabla 18. Concentración en mesa de sacudidas tipo Wilfley.....	75

Tabla 21. Parámetros de los equipos de concentración gravimétrica que variaron entre cada fase. ....	81
Tabla 22. Plan de Inversión.....	88
Tabla 23. Maquinarias y unidades. ....	88
Tabla 24. Equipos y unidades. ....	89
Tabla 25. Mobiliario y unidades. ....	89
Tabla 26. Depreciación Anual Activos Fijos. ....	90
Tabla 27. Capital de Trabajo.....	90
Tabla 28. Mano de obra directa.....	91
Tabla 29. Mano de obra indirecta. ....	92
Tabla 30. Presupuesto de ventas por tonelada. ....	93
Tabla 31. Presupuesto de Ingreso.....	93
Tabla 32. Estructura de costos ....	95
Tabla 33. Estado de Ganancias y Pérdidas proyectado.....	95
Tabla 34. Valor de la unidad tributaria. ....	96
Tabla 35. Flujo de caja proyectado de la empresa. ....	96
Tabla 36. Flujo de efectivo para el cálculo de los indicadores de evaluación. ....	97
Tabla 38. Indicadores de Evaluación. ....	98
Gráfico 1. Distribución granulométrica muestra cabeza M1-W001. ....	51
Grafica 2. Distribución granulométrica muestra cabeza M2-W002. ....	52

## INTRODUCCIÓN

La casiterita es un mineral pesado que contiene estaño y oxígeno, con alto valor en diversas industrias; entre las que se destacan: la producción de aleaciones de bronce, la industria alimenticia, la soldadura industrial y la industria química.

Esta investigación tiene como objetivo proponer un diseño conceptual para una planta de procesamiento de casiterita, proveniente del Municipio Cedeño, estado Bolívar; comenzando por contextualizar su importancia estratégica para el país y para la región sur del estado. Este estudio incluye la caracterización geometalúrgica de la casiterita, la evaluación de un circuito de concentración, utilizando métodos gravimétricos y separación magnética, la elaboración de un diagrama de flujo conceptual y el diseño de una propuesta técnico-económica para la construcción y puesta en marcha de la planta de procesamiento del referido mineral.

Consideramos que esta investigación tiene una relevancia significativa, ya que aporta conocimiento teórico-práctico en la delineación de un circuito de procesamiento de casiterita, dando respuesta a proyectos en beneficio de la explotación y procesamiento del mineral, considerado estratégico para el desarrollo del país. Además, amplía la línea de investigación en el área de concentración gravimétrica del Departamento de Minas, perteneciente a la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la UCV.

La investigación se estructura de la siguiente manera: Capítulo I, corresponde a las generalidades de la investigación, contenido del Planteamiento de Problema, los Objetivos y la Justificación. En el Capítulo II; se describen los Antecedentes y las Bases Teóricas que sustentan la investigación. El Capítulo III, corresponde al Marco Metodológico utilizado para cumplir con los objetivos planteados; está conformado por el Tipo y Diseño de la Investigación, Población y muestra, Instrumentos para la recolección de datos y análisis de datos. En el Capítulo IV se muestran los resultados obtenidos en la fase experimental. En el Capítulo V se delinea la propuesta de diseño conceptual de la planta de procesamiento de casiterita. En el Capítulo VI se exponen las conclusiones y recomendaciones; posteriormente, las referencias bibliográficas y hemerográficas utilizadas.

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

En Venezuela, no todos los recursos minerales calificados como estratégicos han logrado un desarrollo favorable en cuanto a los procesos de beneficio mineral, que incluye la cadena de valor que va desde la extracción de la materia prima hasta su comercialización, venta y entrega de los productos al cliente. Específicamente, la cadena de valor del mineral Casiterita se encuentra en un nivel inicial de desarrollo, además poco documentada técnicamente a nivel nacional. Su extracción actualmente se realiza de manera artesanal, y el procesamiento de beneficio también, lo que ocasiona un bajo aprovechamiento del recurso.

En este contexto, se pretende desde la academia, evaluar y diseñar, a nivel de laboratorio, una propuesta de diseño conceptual de planta de concentración a través de métodos gravimétricos y magnéticos que permita la recuperación eficiente del mineral, con base en estudios realizados en yacimientos de Casiterita a nivel mundial, y los resultados de la caracterización geometalúrgica.

## **OBJETIVOS**

### **1.2 Objetivo general**

Proponer un diseño conceptual para una planta de procesamiento de Casiterita, proveniente del sector la Esperanza, municipio Cedeño, Estado Bolívar, Venezuela.

### **1.3 Objetivos específicos**

- Caracterizar geometalúrgicamente la casiterita, proveniente del sector la Esperanza del municipio Cedeño del Estado Bolívar, Venezuela.
- Evaluar un circuito de concentración para la casiterita, mediante la combinación de equipos de concentración gravimétrica (Criba Hidráulica (JIG), la mesa vibratoria tipo Wilfley e imán de alta intensidad a nivel de laboratorio.
- Establecer un enfoque conceptual del procesamiento de la casiterita, proveniente del sector La Esperanza.
- Correlacionar los resultados obtenidos, con un diagrama propuesto con la ingeniería conceptual del procesamiento de la casiterita, obtenida en estudios anteriores.
- Diseñar una propuesta técnico-económica orientadas al estudio de factibilidad de construcción y puesta en marcha de planta de procesamiento de casiterita.

## JUSTIFICACIÓN

La casiterita en Venezuela es un mineral estratégico, establecido así en el decreto N.º 4598, publicado el 08 de octubre del 2021, en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, N.º 42230. Este mineral, considerado pesado por su densidad, resulta de la oxidación del estaño ( $\text{SnO}_2$ ), contiene aproximadamente un 78,6% de estaño y un 21,4 % de oxígeno. Posee un significativo valor para distintas industrias, como la de las aleaciones para la producción del bronce, la industria alimenticia, uso de soldaduras industriales, industria química, entre otras.

En Venezuela, existen potenciales depósitos de casiterita hacia la zona sur del país, específicamente en el estado Bolívar, de donde fueron extraídas las muestras sujetas a estudio.

En este contexto, la investigación desarrollada es de suma importancia, en tanto que:

- Aporta conocimiento teórico - práctico en la delineación de un circuito, usando métodos gravimétricos y de separación magnética para la recuperación del mineral casiterita.
- Da respuesta a proyectos para el aprovechamiento del mineral casiterita, considerado estratégico para el desarrollo del país, aportando elementos técnicos en la fase de beneficio dentro de la cadena de valor del mineral.
- Amplía la línea de investigación en el área de concentración gravimétrica, del Departamento de Minas perteneciente a la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la UCV.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.

En este capítulo se hace referencia a los antecedentes de la investigación, los cuales aportan información relevante con relación al mineral, objeto de estudio, así como a parámetros, variables o metodologías utilizadas, en la misma. Luego, se contemplan las bases teóricas, las cuales sustentan el estudio, necesarias para comprender los procedimientos aplicados.

#### 2.1 Antecedentes de la investigación

Según Palella y Martins (2012), resulta conveniente que el marco teórico contenga los antecedentes de la investigación, entendida como diferentes trabajos realizados por otros estudiosos sobre el mismo tema. Entre los antecedentes de investigación encontramos los siguientes estudios:

- Tovar (2019). *Diseño a nivel de laboratorio de un circuito de beneficio para recuperación de ilmenita en arenas de la zona de San Quintín, estado Yaracuy*. Trabajo especial de grado presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. En este trabajo, la investigadora caracterizó mineralógicamente las arenas de la zona, sujeto de estudio. De igual forma, definió los parámetros operacionales de los equipos de ensayos de concentración, estimó los porcentajes de recuperación y el grado de concentración para el cálculo de la eficiencia del proceso. Estas operaciones le permitieron el diseño, a nivel de laboratorio, del circuito de beneficio mineral. El tipo de investigación fue descriptivo, así como el diseño experimental. La técnica de recolección de datos utilizada fue la observación, acompañada de la hoja de registro como instrumento. Los resultados obtenidos, mediante la creación del circuito combinando equipos de separación gravimétrica y separación magnética, permitieron obtener un alto porcentaje de recuperación del mineral. Es de interés, para la presente investigación, la combinación de equipos que permitan el diseño de un circuito de beneficio del mineral.



- Quispe (2019). *Estudio del tratamiento y análisis en laboratorio de minerales de casiterita*. Trabajo especial de Grado ante la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

En este estudio, la investigadora buscó comprobar que el uso de la tecnología de adaptación mejora la recuperación de la casiterita. El logro de este objetivo implicó establecer, primero, la caracterización de la materia prima para el proceso de producción de casiterita. Segundo, la determinación del nivel de recuperación de estaño con la tecnología aplicada. Tercero: establecer la rentabilidad del proceso propuesto; y por último, evaluar la recuperación de casiterita a nivel de laboratorio. La metodología fue experimental. Los resultados arrojaron que la mayor producción resultó del incremento de la recuperación mediante flotación. Este estudio constituye un antecedente de la presente investigación, en tanto que se trabajó con el mineral de casiterita.

- Marañón (2019). *Establecimiento de los parámetros óptimos en la concentración gravimétrica con principio de separación en corrientes superficiales de agua, usando metodología de superficies de respuesta*. Trabajo especial de grado, presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

En esta investigación, se desarrolló un diseño experimental de superficie de respuesta con tres niveles, para modelar y optimizar tres parámetros de operaciones de la mesa de sacudidas, tipo *Wilfley*. Para realizar las pruebas se utilizaron tres materiales, a los cuales se les calculó la densidad y se les aplicó los parámetros operativos de la mesa de sacudida: 1) ángulo de inclinación, 2) número de sacudidas por minuto y 3) caudal de agua en la zona de alimentación de la mesa. Para optimizar estos parámetros, se realizó un total de 20 ensayos a cada mezcla, variando los valores de los parámetros según el diseño experimental de superficie de respuesta. Los resultados fueron analizados estadísticamente con el *software Minitab*, versión 18.1. Se demostró, para valores de inclinación entre 8 y 9 grados y una frecuencia de 300 a 450 sacudidas por minuto, una recuperación del 50 a 80% y una razón de enriquecimiento de 6 a 8. Este estudio aporta, a la presente investigación, los parámetros aplicados al momento de realizar el ensayo.

- Peña (2019) *Evaluación de los parámetros óptimos operacionales de funcionamiento de una criba hidráulica (JIG) a escala de laboratorio mediante una herramienta estadística*. Trabajo especial de grado presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

En este estudio se planteó, como objetivo general, evaluar los parámetros óptimos operacionales de funcionamiento del *JIG*, a escala de laboratorio, mediante herramientas estadísticas. Para el logro del objetivo, se efectuaron corridas en frío con material de polímero esférico con diferentes densidades, también se calibró con mezclas de casiterita y calcita. El desarrollo de la investigación requirió de la revisión bibliográfica sobre los parámetros operacionales. Mediante estos parámetros se fijaron los factores y niveles a estudiar, utilizando el diseño experimental. Los parámetros fueron: 1) el tiempo de ciclo (TC), 2) el caudal de la cámara (CC) y 3) la granulometría de alimentación (GA), a diferentes niveles. El estudio, arrojó como resultado, que los mejores tratamientos fueron las condiciones de 5 min de TC, 22 l/min de CC y GA (+1,4 -1,70) mm para una recuperación (R) de 96,5 %. Por otra parte, se explicó que la mejor razón de enriquecimiento (RE= 15,5), es de 5 min de TC, 22 l/min y GA de (+2 - 3,36) mm. La herramienta estadística demostró que, de los factores estudiados, la granulometría de alimentación presentó la mayor significancia estadística, durante la medición de las variables dependientes. La optimización del proceso, mediante el método gráfico, reportó que, para 3 min, 16 l/min y un tamaño de partícula de 1,7 mm, fue la condición óptima estadística, reportando una recuperación de 88,4 % y una razón de enriquecimiento de 13. El presente estudio aporta información relevante, en cuanto a que proporciona los parámetros para calibrar el equipo en la recuperación de estaño en casiterita.

- Montero (2012). *Proyecto de viabilidad de una planta de tratamiento para mineral de Estaño y Tántalo*. Trabajo presentado ante la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, España.

Este estudio se desarrolló con el propósito de definir la viabilidad de explotación de un yacimiento de estaño y tántalo, presente en la formación geológica de base pegmatita, ubicada al norte de España. La investigación implicó: 1) la recopilación de muestras específicas procedente de los trabajos de exploración del yacimiento; 2)

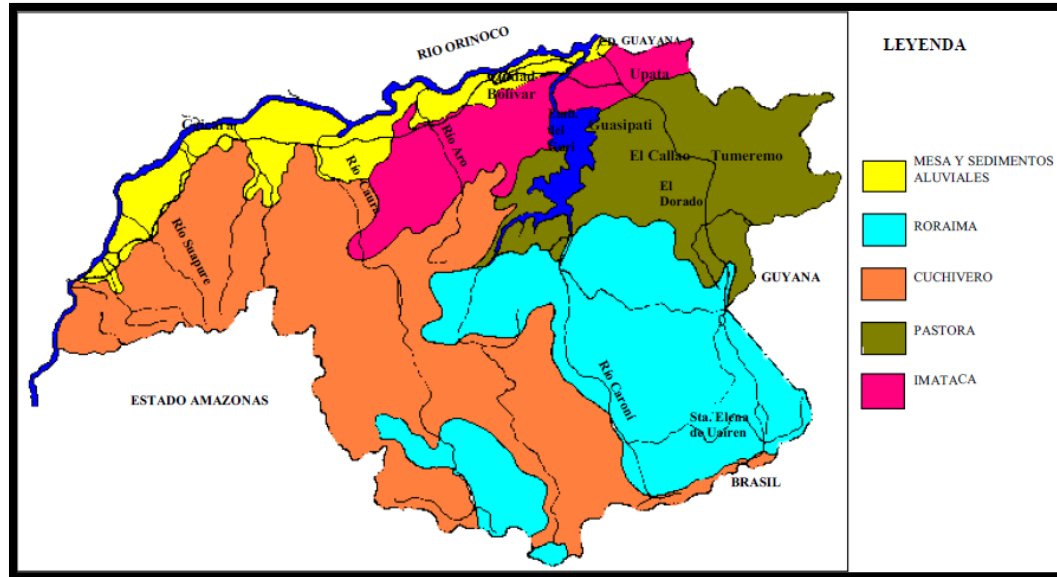
ensayos de caracterización y concentración realizados en laboratorio a partir de muestras representativas del mineral; 3) estudios en planta piloto; 4) la definición conceptual del esquema de tratamiento, 5) el establecimiento de la ingeniería básica de la planta industrial y 6) el estudio económico. La pesquisa permitió demostrar la rentabilidad del proyecto de la planta de tratamiento. Este estudio aporta, a nuestro trabajo, información específica en cuanto al procesamiento del mineral casiterita.

## **2.2 Bases Teóricas**

### ***2.2.1 Geología Regional***

El Escudo de Guayana se extiende al Sur del río Orinoco y ocupa un poco más del 50% de la superficie de Venezuela. Su existencia se remonta antes de la Era Paleozoica o Primaria, específicamente al Precámbrico, esto le asigna la connotación de ser uno de los bloques del continente de mayor antigüedad en la tierra. Según Carrera et al., (2011), esta formación geológica, está conformada por rocas arqueozóicas y proterozóicas, que han sido afectadas de diversa manera por el movimiento de las placas tectónicas.

El escudo de Guayana, según Menéndez (1968), está conformado por cuatro Provincias Estructurales: 1) Provincia de Imataca (3400 – 3600 ma), 2) Provincia de Pastora (2000 - 2700 ma), Provincia de Cuchivero (1700 – 2000 ma) y Provincia de Roraima (1300 – 1700 ma) (ver figura 1).



**Figura 1. Provincias Geológicas del estado Bolívar.**

Fuente: Mendoza, 2005. Mapa de Provincias Geológicas del Estado Bolívar

### ***Provincia geológica de Imataca***

La Provincia Geológica de Imataca, está situada en el extremo Norte de la Guayana venezolana. Se extiende en dirección noreste desde las cercanías del río Caura hasta el Delta del Orinoco y, en dirección noreste-sureste, emerge desde el curso del río Orinoco hasta la falla de Guri, por unos 550 km y 80 km, respectivamente (Carrera et al., 2011).

La Provincia Geológica de Imataca presenta seis o más dominios tectónicos, separados entre sí por grandes fallas tipo corrimientos. Según Menéndez (1994), (citado en Carrera et al., 2011), esta formación geológica está compuesta por gneises félsicos y máficos, formaciones bandeadas de hierro, dolomita, cuarcita, charnockitas, migmatitas, anfibolitas y demás rocas granitoideas, en cantidades muy subordinadas. Carrera et al., (2011), señalan que:

Litológicamente la Provincia Geológica de Imataca está formada por gneises graníticos y granulitas félsicas (60%-75%), anfibolitas y granulitas máficas, y hasta ultramáficas (15%-20%) y cantidades menores complementarias de formaciones bandeadas de hierro, dolomitas, charnockitas, anortositas y granitos intrusivos más jóvenes y remanentes erosiónales menos metamorfizados y más jóvenes cinturones de rocas verdes.

El metamorfismo registrado en estas rocas decrece desde la Mina de Hierro de El Pao, con granulitas de dos piroxenos en charnockitas, anortositas y granulitas máficas y hasta

ultramáficas (que sugieren temperaturas de hasta 750-850 °C y moderadas a elevadas presiones de 8 a 8,75 kbs, equivalentes a menos de 30 km de presión de rocas), hacia la zona de Guri, con anfibolitas y migmatitas, rocas graníticas, con granate-cordierita-sillimanita (que implican temperaturas de 650-700 °C y presiones de 4 a 7 kbs). Estas rocas de alto grado metamórfico se interpretan (Mendoza, 2005) como evolucionados primitivos cinturones de rocas verdes y complejos graníticos potásicos y sódicos, varias veces tectonizados y metamorfizados, hasta alcanzar las facies de la anfibolita y granulita. (p.4)

### ***Municipio Cedeño***

El municipio Cedeño está circunscrito en la Provincia Cuchivero-Amazonas. De acuerdo a Mendoza, et al., (2019), está conformada por rocas ígneas félsicas post-colisionales calcoalcalinas, riolíticas y graníticas de 1,95 a 1,75 Ga, con el Granito de Parguaza, de tipo rapakivi, de 1,50 a 1,40Ga. Mendoza (1972), indica que la posible fuente generadora de la casiterita son los diques pegmatíticos que intrusionan el Granito de Parguaza, en el “Área Metalogénica El Burro – Agua Mena”, (Mariño, 2023, p. 207).

### **2.2.2 La casiterita, un mineral**

#### ***Generalidades***

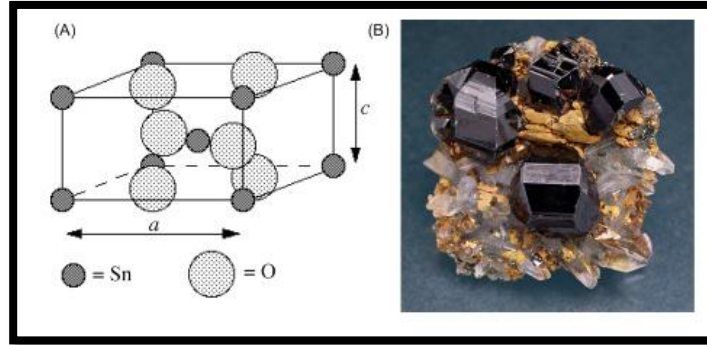
La etimología de la palabra casiterita, proviene de la palabra griega “*kassiteros*”, que significa estaño (Dana – Hurlbut, 1959). La casiterita es considerada un mineral pesado, dado que su nivel de densidad va de 6,8 a 7,1 g/cm<sup>3</sup>. Resulta de la oxidación del estaño (SnO<sub>2</sub>) y tiene una composición de aproximadamente un 78,6 % de estaño y un 21,4% de oxígeno.

La casiterita (ver figura 2) es un constituyente primario de las rocas ígneas pegmatitas, aunque también se puede encontrar en filones hidrotermales y sedimentos fluviales. Constituye un sistema cristalino tetragonal; bipiramidal o ditetragonal. En la tabla 1, se presentan sus propiedades físicas:

**Tabla 1. Propiedades del mineral de Casiterita. Propiedades**

Químicas		Físicas						
<i>Composición Química</i>	<i>Sistema Cristalino</i>	<i>Color</i>	<i>Brillo</i>	<i>Raya</i>	<i>Hábito</i>	<i>Dureza (Escala de Mohs)</i>	<i>Fractura</i>	<i>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</i>
SnO <sub>2</sub>	Tetragonal 4/m2/m2/m	Pardo – negro	No metálico	Blanco – pardo	-	6 - 7	Irregular	6,8 – 7,1

Fuente: Dana – Hurlbut (1959)



**Figura 2. Estructura y cristales del mineral Casiterita**

Fuente: Bowles, J, 2021, Cassiterite. (A) The structure of cassiterite. b) Crystals of cassiterite embedded in quartz crystals. Encyclopedia of Geology. ScienceDirect. <https://scihub.se/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00185-5>

La casiterita es tetragonal (grupo espacial  $P4_2/mnm$ ); esta estructura tiene átomos de estaño en las esquinas y el centro de la celda unitaria (Fig. 2A), con dimensiones de celda a 4.73, c 3.18 Å. Los átomos de oxígeno se encuentran en el mismo plano basal que los átomos de estaño; así cada átomo de estaño está rodeado por seis átomos de oxígeno en las esquinas, de un casi regular octaedro.

Los cristales de casiterita suelen tener la forma de prismas cortos con las caras (100) y (110) bien desarrolladas (Fig. 2B). El color es, generalmente, marrón rojizo a casi negro con un brillo adamantino. Las casiteritas claras amarillentas o de color miel se clasifican como piedras preciosas. (Bowles, 2021, p. 7)

#### ***El estaño en el mineral de casiterita***

La palabra estaño proviene del latín *stannum*. Es un elemento químico que fue descubierto en la era prehistórica, alrededor del 2000 ac. Se utilizaba en aleaciones con el cobre para producir bronce, dando así origen a la denominada Edad de Bronce (*CienciaDeSofa, 2022*).

El estaño tiene por símbolo Sn, número atómico 50 y una masa atómica de 118,71 g/mol, pertenece al grupo número 14 y el período 5 de la Tabla Periódica (Webmineral, s.f.). Dicho elemento es relativamente escaso en la tierra, unas 30 veces menos abundante que el cobre (Cu) y 10 veces menos abundante que el plomo (Pb). Son escasos los lugares en los que el estaño está lo suficientemente concentrado entre las rocas como para extraerlo y que resulte rentable.

En algunas rocas, que se formaron en unas condiciones químicas muy específicas, es posible encontrar estaño metálico. Existen, aproximadamente, 107 minerales que contienen, en su fórmula química, la presencia del estaño en diversas proporciones porcentuales. En el mineral de casiterita es donde se ha logrado extraer mayor cantidad de estaño para su explotación y comercialización (Redd GBR,2020)

#### ***Características***

- De color gris o blanco
- Maleable
- A temperatura ambiente se oxida de forma superficial

#### ***Usos***

Los usos del estaño son múltiples, entre los más conocidos se encuentran:

- Como protector del hierro, del acero y de diversos metales usados en la fabricación de latas de conserva,
- para disminuir la fragilidad del vidrio,
- para fungicidas, tintes, dentífricos y pigmentos,
- para producir bronce, que constituye una aleación de estaño y cobre,
- para la soldadura blanda, aleado con plomo,
- como material de aporte en soldadura blanda con cautín, bien puro o aleado,
- en la industria de la cerámica, para la fabricación de los esmaltes cerámicos, entre otros.

#### ***2.2.3 Potenciales depósitos de casiterita en el mundo y en Venezuela***

Existen dos clases de depósitos de casiterita. Los más productivos se forman en procesos geológicos de deposición, como las intrusiones graníticas, en las que la casiterita aparece introducida en rocas duras tales como cuarzos o pegmatitas. El segundo tipo de depósitos, es el resultado de la sedimentación fluvial en la que los nódulos de casiterita, por su propio peso, se asientan en los lechos de los ríos por efectos mecánicos.

La mayor parte de los depósitos de casiterita en el mundo proviene de la región de Yunnan China, así como de los depósitos aluviales de Tailandia, Indonesia y Malasia. En Europa, se han encontrado depósitos en Gran Bretaña, España y en la región de Sajonia – Bohemia. En España, la casiterita está muy esparcida por toda Galicia; los principales

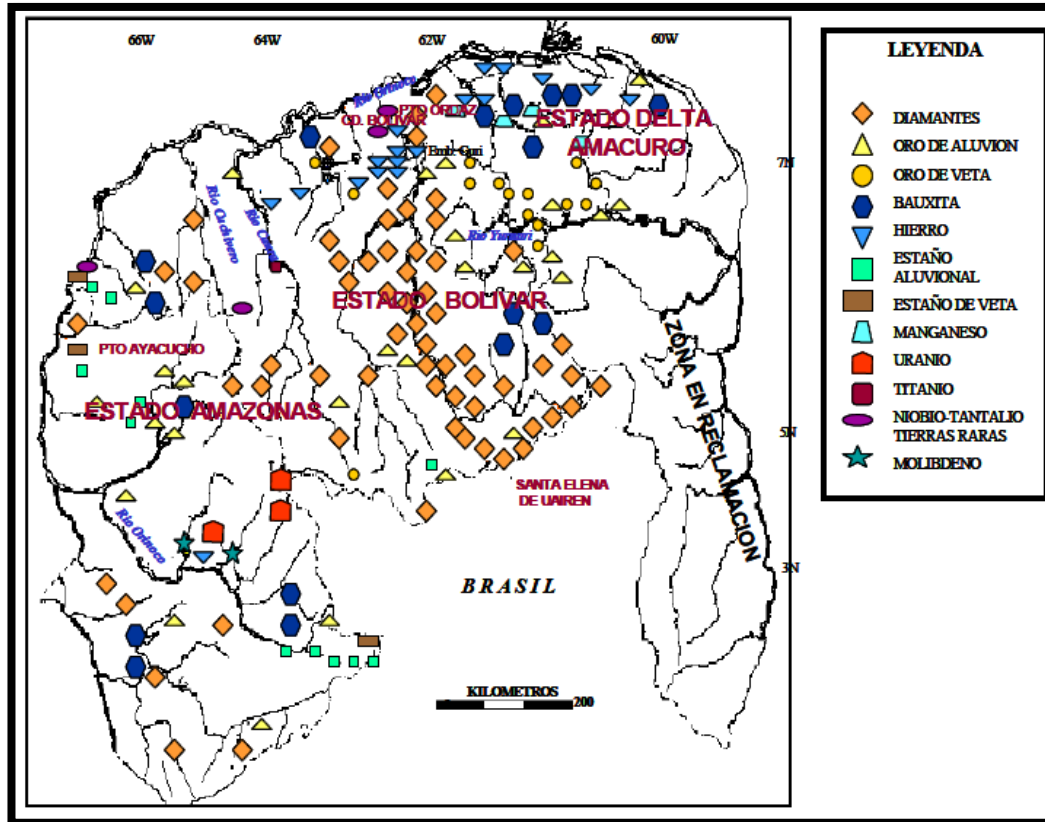
ejemplares proceden de la provincia de Orense, donde aparece en cristales octaédricos sencillos y en maclas de tipo codo.

En el contexto latinoamericano, importantes concentraciones de este mineral se encuentran en Bolivia, Brasil, Perú, Argentina y República Dominicana.

En Venezuela, la casiterita se reserva y declara como elemento estratégico para su exploración, explotación, beneficio-transformación y comercialización, mediante el decreto N.º 4598, publicado en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N.º 42230, de fecha 8 de octubre de 2021. Sus depósitos se ubican hacia la región sur del país, específicamente en el estado Bolívar (Ver figura 3), en el que se encuentran grandes concentraciones de este mineral en depósitos aluviales (Ministerio del Poder Popular de Desarrollo Minero Ecológico, abril 6 de 2022). Sin embargo, estudios realizados, desde 1965 hasta el 2016, demuestran que no se posee una cuantificación estimada de dichas reservas. Se estima que Venezuela debería colocarse entre las tres primeras reservas de casiterita en el mundo (Valero, 2018).

En el estado Bolívar, específicamente en la zona del Parguaza y Agua Mena, entre los Pijiguaos y Puerto Ayacucho, del estado Amazonas, a lo largo de zonas de cizallas y fallas N-NW (Pérez y otros, 1.985. Citado en Mendoza 2005), está presente el mineral. En el Alto Paragua, estudios realizados, reportaron casiterita en riolitas muy silicificadas de la Formación Caicara del Grupo Cuchivero. En esta zona la casiterita va acompañada de barita, apatito, pirita cuprífera, en granos diseminados de tobas riolíticas.





Figura

### 3. Localización de minerales diversos en el escudo de Guayana

Fuente: Mendoza, 2005. Mapa de localización de ocurrencias de minerales en Guayana

#### 2.2.4 La casiterita y los métodos gravimétricos de concentración

##### *El método de concentración: aspectos generales*

La operación en la cual se eleva el tenor de una mena o mineral, se denomina concentración. Este proceso se realiza mediante el uso de equipos de separación, que permiten diferenciar la ganga del estéril. Los métodos de concentración que permiten implementar la separación de los minerales, mediante el uso de diversos equipos, se muestran en la tabla 2:

**Tabla 2. Diferentes métodos de concentración de minerales y algunos equipos utilizados.**

<b>Método (denominación)</b>	<b>Propiedades que utiliza en la separación</b>	<b>Principales equipos utilizados</b>
1. Concentración gravitacional	Diferencia de velocidad de sedimentación de los minerales	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sedimentador,</li> <li>▪ Hidrociclón,</li> <li>▪ Jig,</li> <li>▪ Canalón,</li> <li>▪ Canaletas,</li> <li>▪ Mesa vibratoria,</li> <li>▪ Espiral,</li> <li>▪ Conos de separación,</li> <li>▪ Centrifugas.</li> </ul>
2. Concentración Magnética	Susceptibilidad magnética	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Separador magnético de tambor</li> <li>▪ Rodillos magnéticos</li> <li>▪ Separador magnético tipo “carrusel”</li> </ul>
3. Concentración eléctrica	Conductividad eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Separador eléctrico de alta intensidad</li> </ul>
4. Flotación espumante	Hidrofobicidad y/o Hidrofilidad del mineral	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Celdas de flotación y columnas de flotación</li> </ul>
5. Floculación selectiva	Adsorción específica de un polímero y formación de flóculo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sedimentador</li> </ul>
6. Coagulación	Adsorción específica de iones inorgánicos y formación una coagulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sedimentador</li> </ul>

Fuente: Bustamante, Gaviria y Restrepo (2008).

El objetivo esencial de la concentración, como operación unitaria, es elevar el tenor del mineral de interés en una corriente que se denomina Concentrado (ver figura 4). El tenor, según Bustamante et al., (2008), “se asocia al porcentaje (...) de mineral útil respecto a la masa mineral extraída” (p.3)

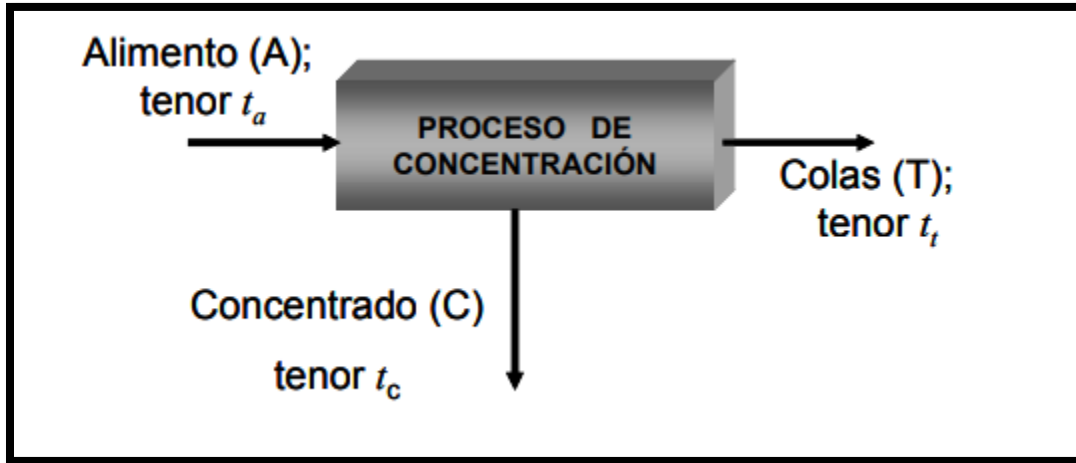


Figura 4. Esquema general de separación en un concentrador

Fuente: Bustamante, Gaviria y Restrepo 2007

### ***La concentración por gravedad***

La concentración por gravedad es uno de los métodos más utilizados. Actualmente se usa para tratar una variedad de materiales que van desde los minerales metálicos (oro, galena, casiterita, cromita, pirita, blenda, entre otros) hasta los carbones. Este método, aunque no puede lograr la precisión de separación que se puede lograr con el método de la flotación, es el que implica menos costos de operación.

La concentración gravimétrica se puede combinar con métodos de flotación, siempre y cuando éste se haga en etapas anteriores.

El método gravimétrico, es un método utilizado en las plantas de beneficio de minerales para la separación de las partículas ligeras y pesadas. Es una de las características de los dispositivos que operan por concentración de gravedad, donde se espera que las partículas se mantengan ligeramente apartadas, de manera que puedan moverse unas con relación a las otras, para que así puedan separarse en capas de minerales. El movimiento de las partículas que se encuentran dentro del fluido se ve afectado por su densidad y por su tamaño.

En la separación gravimétrica hay que darle especial relevancia al control granulométrico, a través de intervalos relativamente estrechos de tamaños de partícula, para reducir el efecto del tamaño y alcanzar que la separación de las mismas dependa, en gran medida, de su densidad.

El “criterio de concentración”, de acuerdo con Taggart A. (1966), se utiliza como valor de referencia para estimar la facilidad o dificultad que puede esperarse, al separar minerales por el método de concentración por gravedad.

El criterio de concentración se calcula con la siguiente fórmula:

$$CC = \frac{\lambda p - \lambda f}{\lambda l - \lambda f} \quad (\text{Taggart A, 1966}). \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$CC$  = criterio de concentración.

$\lambda p$  = densidad del mineral pesado.

$\lambda l$  = densidad del mineral liviano.

$\lambda f$  = densidad del fluido, comúnmente el agua.

De acuerdo con la revisión realizada por Peláez (1981); si  $CC$  es mayor a 2,5 se puede separar ambos componentes, útil y ganga, con facilidad prácticamente a cualquier tamaño. Si  $CC$  es 1,75 la concentración será posible solamente para tamaños de liberación superiores a las mallas 65 (0,2 mm) o malla 100 (0,15 mm). Si  $n$  es 1,50, solo podrán separarse partículas que sean superiores a la malla 10 (1,65 mm), valores de  $n$  entre 1,50–1,25 solo partículas superiores a la malla 8 (2,38 mm). Inferiores a 1,25, la separación es imposible.

### ***Métodos gravimétricos de concentración para la casiterita.***

Diversos equipos gravimétricos son utilizados en la concentración de minerales como la casiterita, para así obtener la recuperación.

En la etapa de concentración primaria de la casiterita, se utilizan unidades como JIG, espirales y mesas. El concentrado final se puede lograr utilizando concentradores de gravedad, mejorados o celdas de flotación. Estos concentradores de gravedad mejorados, utilizan fuerzas centrífugas u otras fuerzas adicionales para aumentar la eficiencia de separación. El tamaño de las partículas juega un papel importante en la concentración por gravedad (Burt, 1988, citado en Angadi et al., (2015); la eficiencia de separación es muy alta para partículas gruesas, mientras que disminuye, considerablemente, para tamaños finos.

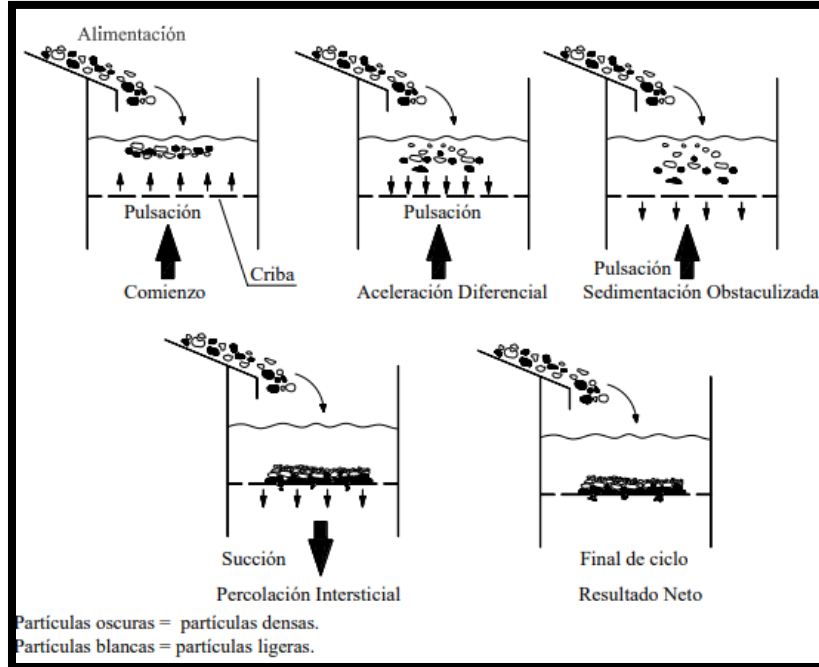
En un circuito típico de concentración por gravedad, se recupera alrededor del 50-60% de casiterita (Lepetic, 1987, citado en Angadi et al, 2015); sin embargo, se pierden valores significativos en las partículas más finas que quedan de la concentración gravimétrica. La aplicación de la flotación y el desarrollo de colectores selectivos, han hecho

posible la recuperación de las partículas más finas que quedan en las colas, lo que ha resultado en una mejora de los valores de recuperación general de la planta, a más del 80 %.

#### ***Equipos de concentración gravimétrica***

- ***JIG o Pulsadoras.*** Los JIG o concentradores de impulsos, constituyen cribas, tamices o rejillas sumergidas en un fluido, que le imprime movimiento vertical a las partículas, de tal manera que, por efecto de la diferencia en su densidad, experimentan aceleración diferencial. Por tanto, las partículas más densas se depositan en el fondo, mientras que las más livianas se colocan en la parte superior. Este tipo de equipos son altamente eficientes, principalmente para concentrar partículas con tamaños entre 0,5 y 200mm.

El mecanismo de la separación por impulsos se encarga, primero de separar las partículas de la rejilla y crear una cama abierta durante el ascenso del conjunto fluido – partículas. En este momento se aprecia una desaceleración por efecto de la gravedad que actúa sobre cada uno de los componentes del conjunto. Al alcanzar una velocidad cero, comienza el descenso, lo que proporciona una velocidad selectiva de acuerdo a la densidad del mineral. Esto último hace que el mineral, más denso y con mayor tamaño, sea capaz de vencer la fuerza de empuje que le imprime el flujo contracorriente. En la figura 5 se puede ver el ciclo de estratificación en un JIG.

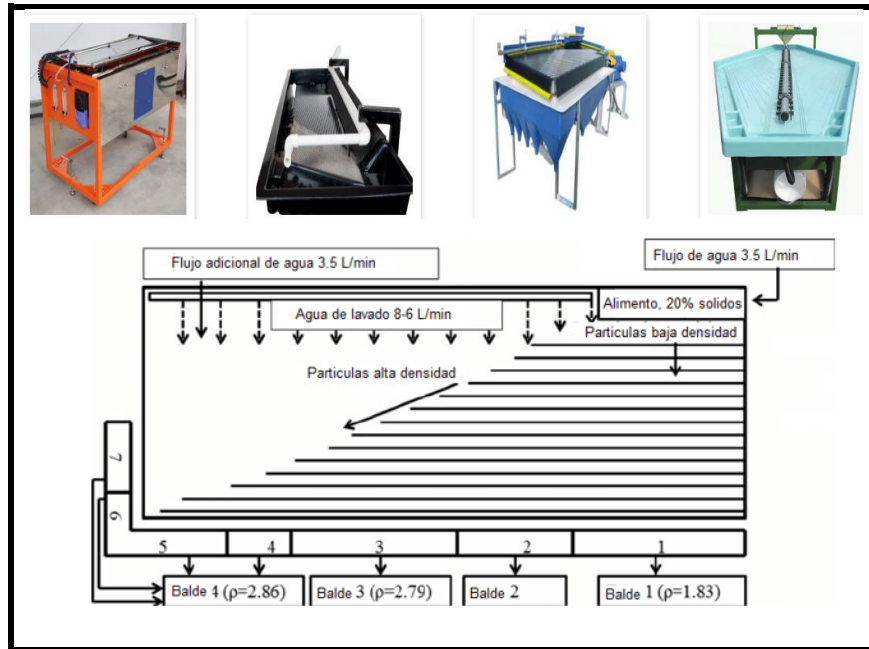


**Figura 5. Formación de la estratificación de las partículas en un ciclo completo de un Jig.**

Fuente: [https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5555/mod\\_resource/content/1/Tema\\_8\\_Concentracion\\_por\\_Gravedad\\_I\\_Pulsadoras.pdf](https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5555/mod_resource/content/1/Tema_8_Concentracion_por_Gravedad_I_Pulsadoras.pdf)

- **Concentradores de sacudidas (Mesa Wilfley).** Este equipo se utiliza para separar partículas de menor tamaño que las separadas en los concentradores por impulsos. La separación de especies se genera gracias a la diferencia de velocidad que experimenta cada partícula de acuerdo a su tamaño y densidad, cuando fluye sobre la capa del líquido que actúa como medio de separación (Ver Figura 6).

En la mesa de sacudida, cuando el líquido fluye sobre la superficie plana e inclinada de la mesa, la capa interior del líquido posee una velocidad inferior que la capa del líquido que se encuentra en la parte superior, esto es producto de la fricción que se genera entre la superficie de la mesa y la capa inferior del líquido.



**Figura 6. Principio de funcionamiento de la mesa vibratoria, diferentes modelos de mesas vibratorias.**

Fuente: <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/mesa-wilfley-concentradora-gravimetrica/>.

### *Nuevas tecnologías en el procesamiento de la casiterita*

La separación por gravedad se consideró, durante bastante tiempo, el método más efectivo para la recuperación de casiterita; sin embargo, este método resulta ineficiente en la recuperación de las partículas más finas del mineral. En estudios realizados en China LI; Yang, Tian, Wu Y Qin (2023), reportaron que alrededor del 30 % de la casiterita procesada se pierde en las colas en forma de partículas finas, lo que provoca un desperdicio de recursos. Ante tal evidencia, los investigadores chinos propusieron y desarrollaron algunos procesos innovadores que se materializaron en el desarrollo de equipos de gravedad avanzados, los cuales permitieron una mayor recuperación del mineral. A continuación, se muestra en la Tabla 3, avances obtenidos mediante la aplicación de nuevos equipos en la recuperación de las partículas de casiterita:

**Tabla 3. Algunos nuevos equipos avanzados de gravedad y su desempeño en la recuperación de partículas de casiterita.**

Advanced equipment	Tamaño de alimentación/ $\mu\text{m}$	Concentrarse grado Sn/%	Concentrarse Recuperación Sn/%	Enriquecimiento relación	Capacidad $/(\text{t}\cdot\text{d}^{-1})$

Concentrador centrifugado de nuevo tipo	74–19	0.38	73.88	3.34	85
Separador centrifugado de chorro continuo tipo SL	<10	5.37	57.96	10.33	10.32
Colgar y vibrar del concentrador de cono	19–10	8.14	88.82	9.01	19.99
Concentrador de mesa de arena fina de nuevo tipo Yun Tin YXB	37–19	28.02	19.23	35.92	15 – 22
Procesador en espiral de nuevo tipo	74–30	10.30	18.12	22.19	38,4
Separador de disco vibratorio	74–37	6.61	83.23	12.47	10.52

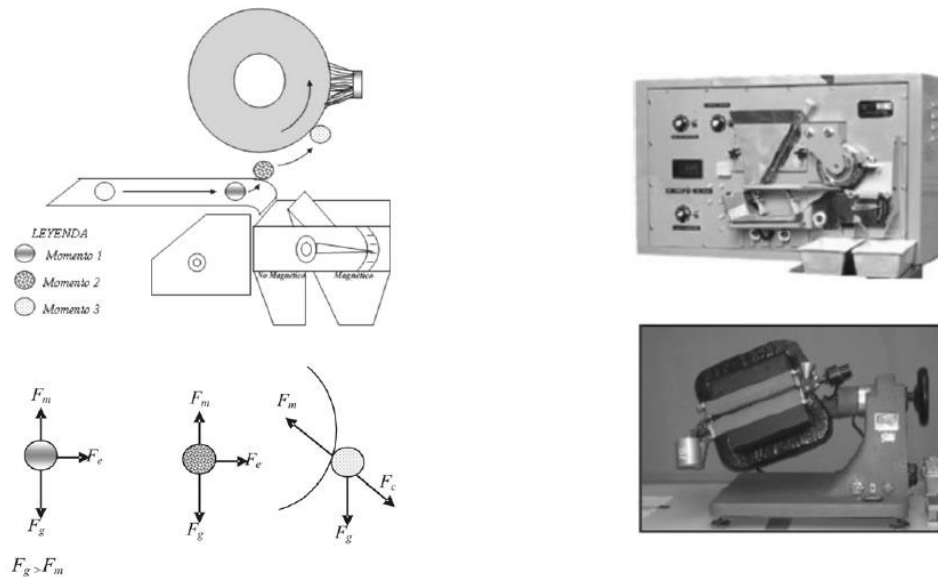
Fuente: Li Ch, Yang C, Tian Z, Wu Ch Y Qin W (27 de febrero de 2023). Cassiterite beneficiation in China

La tabla anterior nos muestra los avances y logros tanto en el equipo de separación de gravedad como de las técnicas de flotación de casiterita en China. El nuevo concentrador de gravedad refleja eficiencia en la recuperación de partículas finas de casiterita.

### **2.2.5 Separación magnética**

Martínez (2012), en un artículo de investigación publicado en la Universidad Politécnica de Cartagena, titulado: “Apuntes de tecnología Mineralógica. Separación Magnética y Electrostatica”, hace referencia a los separadores magnéticos (Ver figura 8), como equipos que aprovechan la diferencia que los minerales presentan respecto a sus propiedades magnéticas. Este equipo, se emplea para separar los minerales y obtener diferentes productos clasificados según su importancia comercial y uso industrial. De esta forma, el equipo podrá emplearse para separar un producto magnético de alto valor de otro considerado como ganga, que sería eliminado como estéril, como sería el caso de separar la magnetita del cuarzo; o bien, separar un mineral magnético de otros minerales no magnéticos, por ejemplo, obtener wolframita o magnetita a partir de minerales de estaño (casiterita).





**Figura 8. Esquema de un equipo de separación magnética (Anaya, 2004), b) Separador magnético Frantz L-1 y c) Separador Magnet-lit,**

### ***Utilidad y factores que influyen en la eficiencia en la separación de mineral de casiterita***

Para mejorar la eficiencia de la separación magnética en mineral de casiterita, se puede aplicar varias veces el procedimiento. Esto mejora significativamente la eficiencia de la separación. Por otro lado, también el ajuste de la inducción del campo magnético y la etapa de separación magnética, al final de un método dado de pulido de minerales, hace más eficiente el proceso. Asimismo, la configuración de los separadores magnéticos de manera adecuada, teniendo en cuenta factores como la susceptibilidad magnética, el tamaño de partículas, la tasa de flujo, la viscosidad y el gradiente del campo magnético, ayudan.

Además de la inducción del campo magnético, existen otros factores que influyen en la eficiencia de la separación magnética para la mineral casiterita, entre los que se encuentran:

- La capacidad de regulación de la intensidad del campo magnético, según el tipo de minerales.
- El tipo de lecho y la distribución del material en los sistemas de separación hidráulica y magnética.
- El tipo de separador magnético utilizado, ya que los separadores de campo magnético medio se utilizan, generalmente, para separar minerales magnéticos fuertes, oxidados localmente.

- La influencia colectiva del tamaño de partículas, susceptibilidad magnética, tasa de flujo, viscosidad y gradiente del campo magnético.

Teniendo en cuenta estos factores, se pueden implementar estrategias para mejorar la eficiencia de la separación magnética de casiterita y aumentar la pureza del producto final.

**Tabla 4. Ventajas y desventajas de la separación magnética en la mineral casiterita.**

Ventajas	Desventajas
Es un método no destructivo que no requiere el uso de productos químicos	Solo se puede utilizar para separar minerales magnéticos de minerales no magnéticos
Es un proceso rápido y eficiente que puede separar grandes cantidades de minerales en poco tiempo	La eficacia del método depende de la susceptibilidad magnética de los minerales, lo que puede variar según la composición mineralógica
Es un método de separación selectivo que puede separar minerales magnéticos de minerales no magnéticos	La separación magnética puede no ser efectiva en la eliminación de impurezas finas o partículas de tamaño muy pequeño
Es un método de bajo costo y fácil de implementar	La separación magnética puede requerir equipos especializados y costosos para su implementación

Fuente. Elaborado por los autores.

### 2.2.6 La Geometalurgia

Según Castro, Dávila, Torres y Aramburú (2022) “La Geometalurgia se define como el estudio de la génesis de los minerales respecto al desempeño de su procesamiento metalúrgico” (p. 211). Constituye una técnica que integra la minería, metalurgia y geología, la cual posibilita la inclusión de resultados de pruebas metalúrgicas junto con datos analíticos y geológicos tradicionales en el modelado del recurso minero.

Según el portal ProActivo (21 de junio de 2018), expertos internacionales de la compañía SGS, empresa líder mundial en pruebas, inspecciones y certificaciones en el sector minero, destacan los beneficios que esta técnica le ofrece al mercado minero. Entre los beneficios señalados por los expertos se encuentran:

- **Optimiza procesos:** La Geometalurgia ayuda a pronosticar la recuperación de minerales antes de que inicie el proceso de explotación y extracción.
- **Contribuye a reducir el impacto ambiental:** Proporciona información que contribuye a reducir el impacto ambiental negativo de la minería, al posibilitar la

identificación de las áreas dentro de un depósito, que no son económicamente posibles de procesar.

- **Aumenta la rentabilidad:** Las plantas mineras que aplican la Geometalurgia con las últimas innovaciones tecnológicas, incrementan la recuperación del mineral.
- **Reconoce los minerales:** La Geometalurgia permite identificar los minerales con los que se cuenta para que se lleve a cabo un adecuado proceso de comercialización.
- **Reduce la incertidumbre.** La Geometalurgia reduce, significativamente, el impacto de incertidumbre espacial en el planeamiento de la mina, debido a que documenta la variabilidad en un depósito mineral.

Se ha utilizado una combinación de tecnologías analíticas y de procesamiento de minerales para desarrollar un diagrama de flujo para el beneficio de minerales *skarn* complejos. Tenemos, por ejemplo, la planta piloto instalada y operada por UVR-FIA GmbH en Freiberg, se diseñó para probar la viabilidad del diagrama de flujo y obtener una mejor comprensión de cada operación de una sola unidad y su interacción.

La evaluación de los diferentes métodos, mediante la comparación de las composiciones elementales, medidas o retro calculadas, para una amplia gama de productos, que pueden utilizarse posteriormente para obtener un balance de masa para la planta piloto, es un enfoque típicamente utilizado en la Geometalurgia. Al obtener una comprensión detallada de la composición mineralógica del yacimiento y cómo se comporta durante el procesamiento, es posible diseñar un proceso de extracción y procesamiento más eficiente y sostenible. En este caso, la combinación de tecnologías analíticas y de procesamiento de minerales, ha permitido desarrollar un diagrama de flujo, comercialmente viable para el beneficio de minerales *skarn* complejos.

### **2.2.7 Balance de masas**

Se define como una contabilidad que registra las entradas y salidas de masa, en un proceso o una parte específica del mismo. Básicamente, se basa en la ley de conservación de la masa, que establece que "la masa no se crea ni se destruye". Realizar un balance de masa, es de vital importancia para calcular el tamaño de los equipos necesarios en un proceso, así como para evaluar sus costos. Además, los cálculos de balance de masa son generalmente un

requisito previo para realizar otros cálculos relacionados. Las habilidades adquiridas, al hacer balances de masa, también pueden aplicarse a otros tipos de balances, con facilidad.

### 2.2.8 Índices metalúrgicos

Bustamante et al., (2018), señala que “los índices metalúrgicos son números adimensionales que precisan la calidad de la separación efectuada en una o varias etapas de concentración, y además proporcionan información para el escalamiento en el dimensionamiento de equipos y/o plantas de concentración” (p. 7).

El cálculo de los índices requiere del balance de masa en el proceso de separación. Si este proceso no se realiza, se pueden generar datos inconsistentes, que pueden desviar la toma de decisiones y el análisis de los circuitos de concentración. Entre los índices metalúrgicos se encuentran:

- **Balances de masa en un concentrador en estado estacionario:** El balance de masa representa que la alimentación (A) es igual al concentrado (C) más las colas (T) en un tiempo definido.

$$A = C + T \quad \text{Ecuación 2}$$

- **Clasificación de los índices metalúrgicos.** Estos índices proporcionan información sobre la calidad de los productos obtenidos. Así tenemos:

**a. Índices que relacionan calidad:** estos índices brindan información sobre la calidad de los productos obtenidos

**a.1 Índice de Recuperación:** este índice se define como la relación que existe entre el peso de material útil que hay en un concentrado con respecto al peso del mismo mineral que está presente en la alimentación.

$$R = \frac{\text{Peso de mineral de interés en concentrado}}{\text{Peso de mineral de interés en alimento}} \quad \text{Ecuación 3}$$

**a.2 Razón de enriquecimiento (Re):** se define como la relación que existe entre el tenor de mineral útil en el concentrado respecto al tenor del mismo mineral en la alimentación.

$$R_e = \frac{t_c}{t_a} \quad \text{Ecuación 4}$$

**a.3 Índice de Selectividad (I.S.):** este índice compara la calidad de separación entre dos especies (A) y (B), que se desean separar en el proceso de concentración.

$$I.S. = \frac{t_a(A)*t_t(B)}{t_a(B)*t_t(A)} \quad \text{Ecuación 5}$$

**b. Índices que relacionan capacidad:** estos índices proporcionan la información necesaria para el escalamiento, dimensionamiento y selección de equipos de concentración.

**b.1 Razón de concentración:** este índice se define como la relación entre el flujo másico en el concentrado respecto al flujo másico de sólidos en la alimentación.

$$Rc = \frac{A}{C} \quad \text{Ecuación 6}$$

**b.2 Eficiencia de la separación:** este índice combina la información obtenida en los anteriores índices.

$$E = \frac{R-V}{1-V_{IDEAL}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se utilizaron los diferentes parámetros antes mencionados, a fin de garantizar el uso pleno de los indicadores para el estudio del mineral de casiterita; por un lado, el balance de masa para no generar inconsistencia en los valores obtenidos durante el análisis. Así mismo, los índices metalúrgicos, los cuales se dividen en dos grandes grupos, los índices que relacionan calidad, como lo son: índice de recuperación y razón de enriquecimiento e índice de selectividad, los cuales nos permitieron conocer la calidad del mineral de casiterita procesado. Y, por otro lado, los índices que relacionan capacidad: razón de concentración y la eficiencia de la separación, aportó la información para el escalamiento, dimensionamiento y selección de los equipos que se utilizaron en el circuito del mineral casiterita, estudiado.

### **2.2.9 Circuito en el procesamiento de casiterita.**

En el procesamiento de la casiterita es necesario realizar un circuito de tratamiento del mineral, que permita la separación de la mena del estéril. Diseñar un circuito implica colocar una serie de equipos organizados en secuencia o en paralelo, que permitan articular e interconectar todas las fases del tratamiento del mineral, de manera de hacer eficiente el proceso de recuperación.

El circuito establecido en una planta piloto, diseñada para el procesamiento de casiterita, contempla dos grandes partes. La primera parte se puede describir como no continua, que incluye los equipos que se encargan de la fragmentación y clasificación del material. En esta parte los equipos no necesitan trabajar de manera continua, ya que lo que se busca es reducir el flujo másico general del mineral. La segunda parte, comprende equipos organizados de manera secuencial, que permitan continuar los procesos de trituración y clasificación, pero ya con el fin de maximizar la recuperación del mineral.

### ***Descripción de una planta piloto***

En la Figura 9, se muestra el diagrama de flujo de la planta piloto de Tellerhäuser Breitenbrunn, Alemania. En esta planta, el circuito inicia cuando el mineral crudo se alimenta a un tanque (1), en el que se mezcla con un producto de molienda (6). Posteriormente, el material es clasificado en tamaños desde 300  $\mu\text{m}$  hasta 1500  $\mu\text{m}$ , la fracción más gruesa (3) pasa a un separador en espiral y se divide en dos partes, la parte gruesa (4), que vuelve a un molino de bolas y la parte fina (5) va directamente a las colas.

La fracción más pequeña del material clasificado (2), pasa por un separador magnético de baja intensidad para reducir el contenido de óxidos de hierro, y tener un subproducto rico en mineral de hierro (8). Posteriormente, se usa un hidrociclón para ajustar la densidad de la pulpa (7), que será utilizada en las celdas de flotación para sulfuros, por tanto, el overflow del hidrociclón (9) es reportado en las colas.

Cuando el material se encuentra en la unidad de flotación de sulfuro, se obtiene (10) un concentrado rico en zinc, indio y cobre, y en la cola de la flotación (11) serán transportadas a un tornillo (13) en donde las partículas gruesas ( $> 70 \mu\text{m}$ ) son llevadas a una mesa vibratoria, mientras que las partículas finas servirán para la flotación de casiterita (14), haciendo uso de un hidrociclón (12), flotando así las partículas más finas de casiterita (15).

La pulpa que es transportada a la (13) mesa vibratoria, produce cuatro concentrados, el primero (16) de estos será el concentrado con un alto porcentaje de estaño (Sn), el segundo un concentrado intermedio (17), el tercero (19), las colas y el ultimo, que vuelve al molino de bolas (18) y vuelto a pasar por el tornillo.

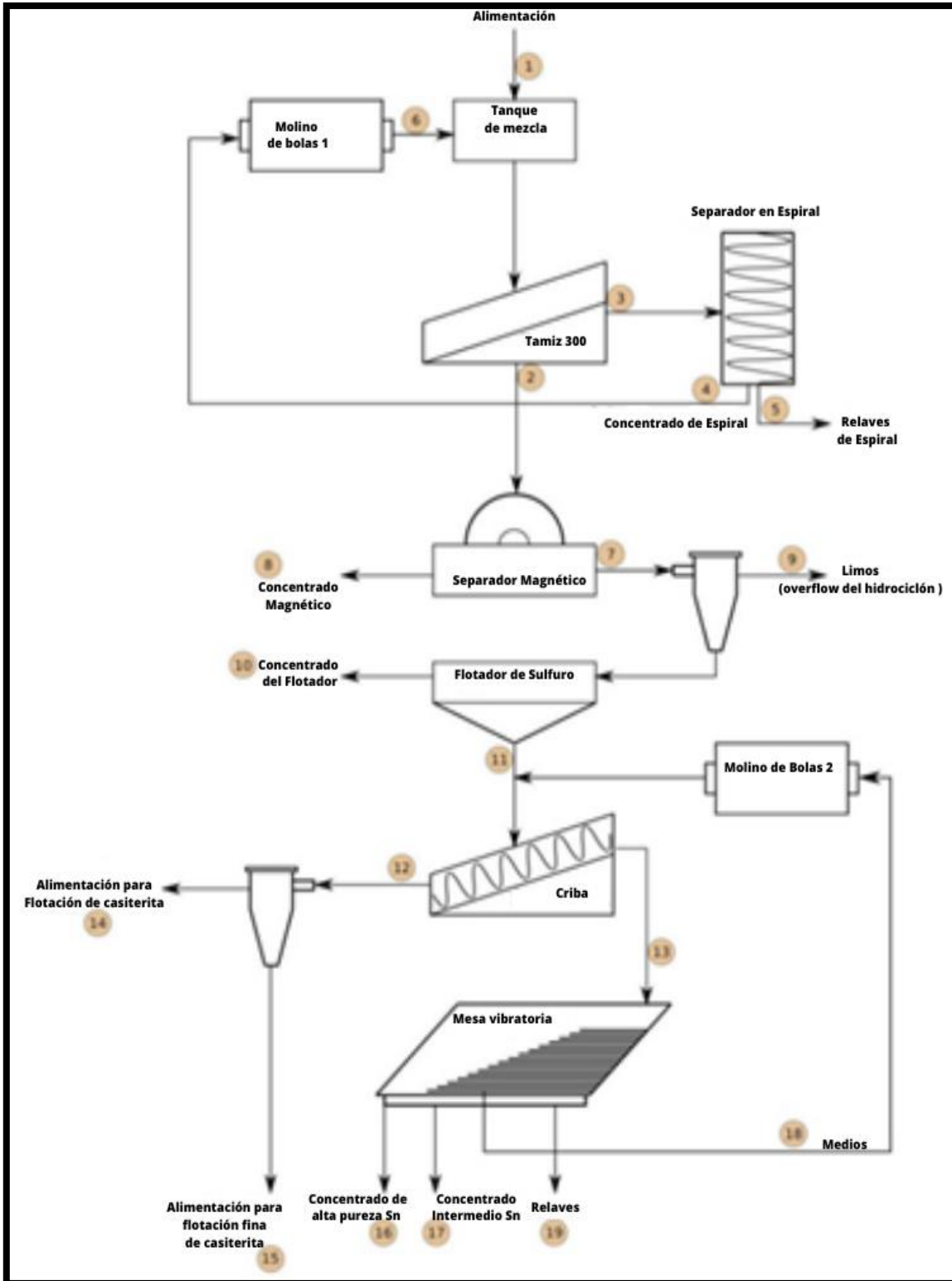


Figura 9. Diagrama de flujo del circuito diseñado para la recuperación de casiterita en la planta piloto de Tellerhäuser Breitenbrunn, Alemania.

Fuente: Schachl “et al”. (2019). Pilot Plant for the Processing of a Complex Tin Ore: A Contribution towards Geometallurgy in Beneficiation. Traducido.

### **2.2.10 Análisis económico del proyecto**

Como parte de la factibilidad financiera de un proyecto minero, es necesario realizar un análisis económico, contentivo de los siguientes aspectos (ver figura 10):

- **Determinación del cash Flow:** para el cálculo de los flujos de caja anuales (entradas y salidas de caja del proyecto minero), se establecieron los siguientes parámetros: ventas proyectadas, costos variables (materia prima), nómina (mano de obra directa), inventarios, gastos de operación (SSO, INCE, política habitacional, paro forzoso, impuestos y patentes), comunicaciones, artículos de oficina, repuestos y equipos, energía eléctrica, combustible, seguridad industrial, seguros mercantiles; así como, la depreciación de los equipos utilizados en las operaciones.
- **Determinación de la rentabilidad:** el cálculo de la rentabilidad, a partir de los flujos de fondos anuales, se realiza mediante uno o varios de los criterios de análisis de rentabilidad ya conocidos (V.A.N., T.I.R, PAYBACK, BREAKEVEN). Otro criterio considerado, en el análisis de rentabilidad, es la razón beneficio/costo (B/C), el cual hace referencia a la relación entre los beneficios y los costos o egresos de un proyecto. Su cálculo se basa en la relación entre el valor actual de las entradas de efectivo futuras y el valor actual del desembolso original.
- **Análisis del riesgo:** el análisis del riesgo financiero tiene por objeto el de estimar, cuantitativa o al menos cualitativamente, la probabilidad de que dichas expectativas no lleguen a materializarse en la realidad. El payback o periodo de retorno de la inversión es, aparte de un índice de rentabilidad, un excelente estimador del riesgo derivado de la incertidumbre a medio y largo plazo, muy utilizado en minería.
- **Estudio jurídico-financiero:** esto incluye un estudio-propuesta del método de financiación de las inversiones, basado en propuestas preliminares de bancos e instituciones financieras. Se consideran los siguientes aspectos: tipo de personalidad jurídica de la empresa; plan de financiación y programa de pago de intereses y deuda; tipos de cambio de divisas y su evolución en el tiempo; régimen fiscal aplicable y beneficios fiscales; por último, política de dividendos.



- Informe final de viabilidad: este informe tiene funciones principales como la presentación ordenada, exhaustiva y detallada de todos los aspectos y hechos comprobados y documentales; la presentación de un esquema de explotación con el detalle y la documentación que demuestre la fiabilidad en la estimación de costes y resultados; la presentación de datos y hechos que permitan a la propiedad y a terceros interesados (bancos, socios, entre otros) constatar la rentabilidad de la inversión en el proyecto, si éste se lleva a cabo en la forma propuesta en el estudio de viabilidad; por último, la estructuración de la información en forma inteligible para la propiedad y adecuada para su presentación a posibles socios o fuentes de financiación.

Estos aspectos, contemplados en el análisis económico del proyecto minero, se realizaron de forma progresiva, a fin de garantizar la ejecución más óptima en la propuesta para el diseño conceptual de la planta de procesamiento de casiterita. Adicional a esto, los cálculos necesarios, fueron realizados aplicando las siguientes formulas:

Cash Flow = beneficios netos + amortizaciones + provisiones

TIR: 
$$VAN = -I_0 + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0$$

I: Inversión inicial

$C_n$ : Flujo de caja o cash Flow

r: TIR

N: número total de periodos

n: año en el que se van obteniendo los beneficios de cada periodo

Payback (PB):  $PB = I / C_n$

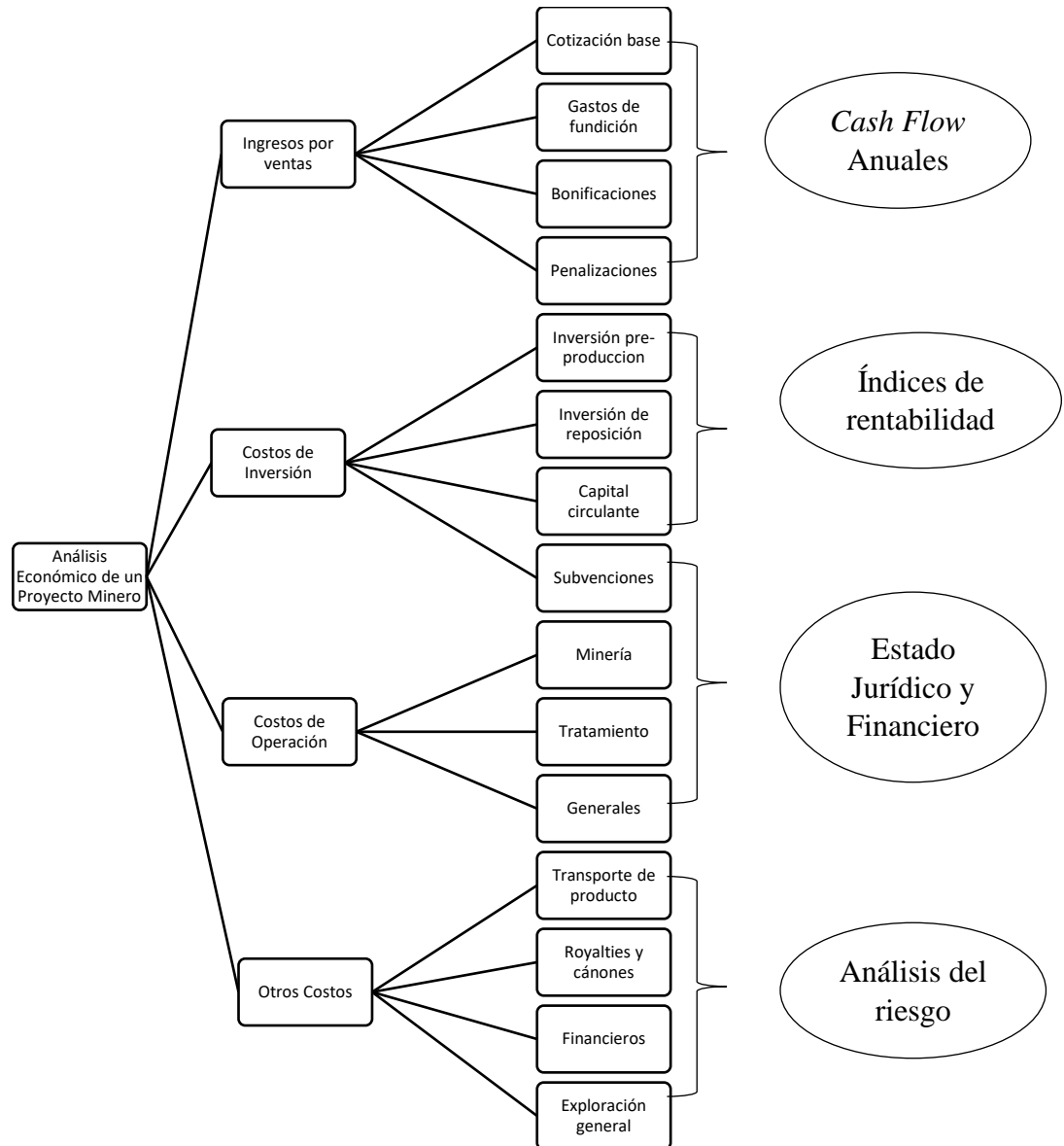
$$B/C = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{V_i}{(1+i)^n}}{\sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+i)^n}}$$

Razón Beneficio Costo (B/C):

**B/C**= Relación Beneficio / Costo

$V_i$ = Valor de la producción (beneficio bruto)

$C_i$ = Egresos ( $i = 0, 2, 3, 4, \dots, n$ ) /  $i$ = Tasa de descuento



**Figura 10. Análisis económico de un proyecto minero. Fuente: Zambrano, J. (1994).**  
Fuente: "Evaluación Financiera de Proyectos Mineros" Universidad de Bolivia Tomas Fría.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLOGICO

#### **3.1 Tipo de investigación**

El tipo de investigación es descriptiva. De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), en los estudios descriptivos se buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretende medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren (p.92).

En el caso de la investigación que nos ocupa, el estudio describe el proceso de concentración gravimétrica que se produce al combinar equipos concentradores de impulsos (JIG), concentradores de movimiento (mesa tipo Wilfley). El objetivo es medir el porcentaje de recuperación y la razón de enriquecimiento, en el proceso de concentración gravimétrica del estaño en casiterita.

#### **3.2 Diseño de la investigación**

Esta investigación es experimental, ya que se efectuó un estudio en el que se manipularon, intencionalmente, una o más variables independientes, en diferentes niveles; tales como: número y tipo de equipos de concentración gravimétrica, porcentaje de recuperación y razón de enriquecimiento, en el proceso de concentración gravimétrica del estaño en casiterita.

#### **3.3 Unidad de estudio**

La unidad de estudio se refiere al contexto, al ser o entidad poseedores de la característica, evento, cualidad o variable, que se desea estudiar. Una unidad de estudio puede ser una persona, un objeto, un grupo, una extensión geográfica, una institución (Hurtado, 2010). Para esta investigación, la unidad de estudio estuvo conformada por el mineral de casiterita, de la provincia geológica Imataca, del sector la Esperanza del municipio Cedeño

del Estado Bolívar, Venezuela; presente en la pegmatita, y los equipos que permiten la concentración gravimétrica.

La investigación se centró en el diseño de un circuito de concentración gravimétrica y magnética, mediante la combinación de equipos concentradores de impulsos, movimiento y flujo por gravedad (espiral), a fin de determinar su incidencia en el proceso de recuperación y la razón de enriquecimiento de la casiterita.

Los equipos utilizados en la investigación, están ubicados en los siguientes laboratorios: 1) Laboratorio de Beneficio Mineral del Departamento de Minas de la Universidad Central de Venezuela; 2) Laboratorio de Geología y Geoquímica *Oscar Machado Zuluaga* de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela y, 3) Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales: CIDEMEX

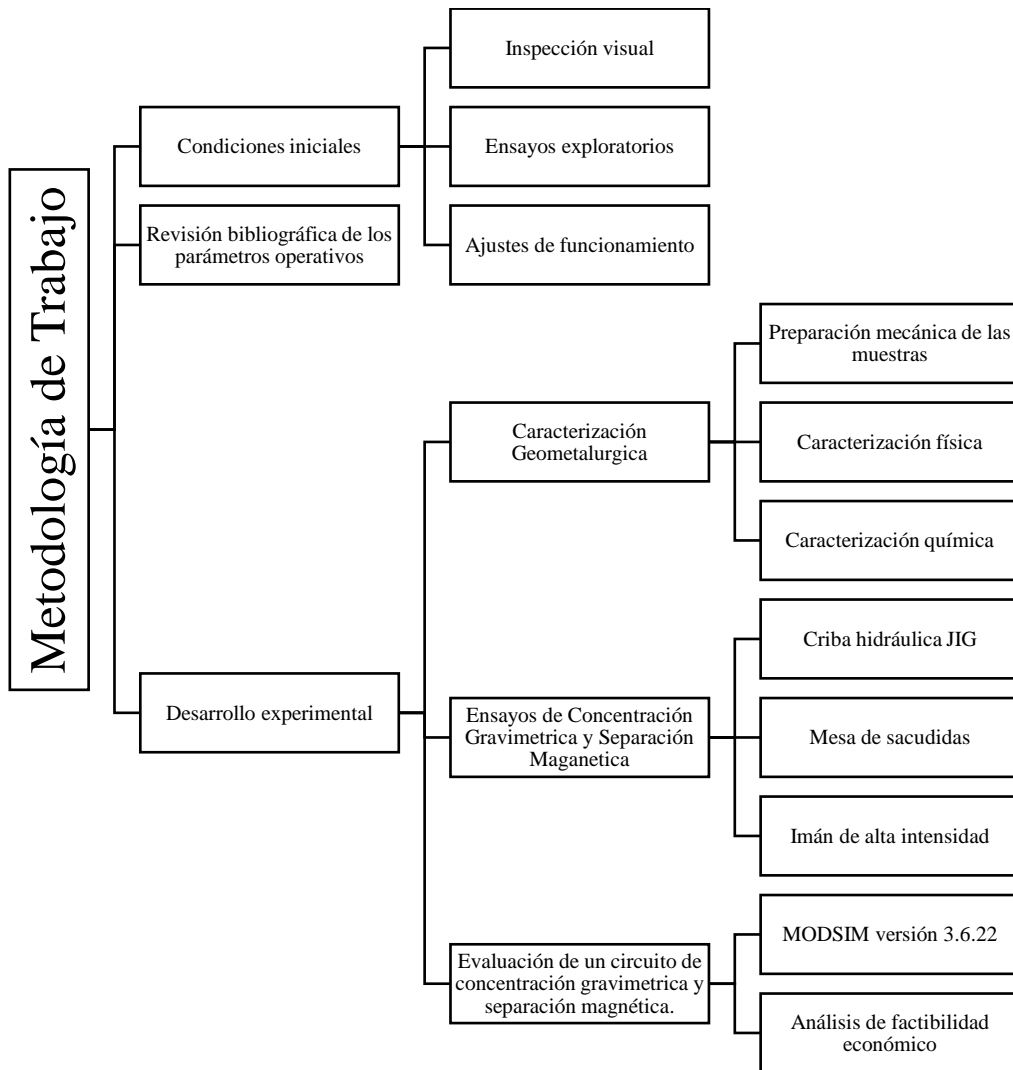
### **3.4 Técnica e instrumento de recolección de datos**

La técnica utilizada en esta investigación fue la observación; primer paso del método científico. El instrumento, una hoja de registro, elaborada a partir de los parámetros operacionales de los equipos utilizados durante la fase experimental. Este instrumento permitió registrar los resultados obtenidos.

### **3.5 Metodología de trabajo.**

La metodología, según Hurtado (2010), constituye el modo o la manera de proceder para alcanzar un objetivo, y establece una serie de pasos o etapas que guían la acción del investigador. A continuación, se muestra un diagrama del esquema de la metodología de trabajo realizado, para la elaboración del diseño experimental, a nivel de laboratorio, de un circuito de beneficio para la recuperación de estaño en casiterita. (Ver Figura 11).

**Figura 11. Esquema de la metodología del trabajo**



Fuente: Elaborado por los autores.

### ***Condiciones iniciales de los equipos***

En función al fundamento de cada uno de los equipos implicados, en la separación de los materiales por efecto de la gravedad, se hizo necesario realizar un diagnóstico inicial de los equipos, a fin de determinar la operatividad de cada uno de ellos. Estas revisiones se hicieron para corregir y mejorar los componentes de los equipos a utilizados en los ensayos de concentración. Del mismo modo, se realizaron ensayos exploratorios para comprobar el funcionamiento de los mismos, así como el comportamiento del material y hacer los ajustes necesarios.

Para todos los equipos se revisó la bomba, el sistema de alimentación de agua y el sistema de alimentación de material. De manera específica, para la Criba Hidráulica JIG Marca Denver, a escala de laboratorio, se inspeccionó el lecho artificial o fondo de granza. Para la mesa de sacudida Wilfey, se revisó el motor, el mecanismo de movimiento de la superficie de la mesa, la correa de transmisión y el nivel de aceite del mecanismo. Para el espiral, tipo Humphreys, se verificó la base en donde se encuentra el espiral, las mangueras y las espiras.

### ***Revisión bibliográfica de los parámetros operativos***

Se realizó una revisión en la bibliografía especializada, para determinar los parámetros operativos utilizados en los ensayos. A continuación, se muestra, en la Tabla número 5, los parámetros establecidos según el equipo, así como la fuente de investigación de donde fueron extraídos.

**Tabla 5. Parámetros establecidos en los equipos de concentración gravimétrica utilizados en la fase experimental del estudio**

<b>Equipo</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Autor</b>
Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de ciclo (TC),</li> <li>• Caudal de la cámara (CC),</li> <li>• Velocidad de alimentación de granulometría de alimentación (GA)</li> </ul>	Peña, C (2019) Evaluación de los parámetros óptimos operacionales de funcionamiento de una Criba Hidráulica (Jig) a escala de laboratorio mediante una herramienta estadística
Mesa vibratoria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ángulo de inclinación</li> <li>• Número de sacudidas por minuto</li> <li>• Caudal de agua</li> </ul>	Marañón, J. (2019) Establecimiento de los parámetros óptimos en la concentración gravimétrica con principio de separación en corrientes superficiales de agua, usando metodología de superficies de respuesta
Separador magnético	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensidad</li> </ul>	

Fuente: Elaborada por los autores.

### ***Desarrollo experimental***

A continuación, se describe la metodología experimental que fue desarrollada en este estudio:

### ***Caracterización Geometalúrgica***

La caracterización geometalúrgica implica la preparación mecánica de la muestra y su caracterización física y química.

#### ***Preparación mecánica de las muestras***

Se recibió una (01) muestra cabeza, que obedece a una roca pegmatítica, proveniente del Municipio Cedeño del Estado Bolívar, como objeto de estudio para esta investigación. Esta muestra, se encontraba dividida en dos (02) submuestras, que se identificaron como M1-W001 y M2-W002. Posterior a esto, se procedió a pesarlas en la balanza, dando como resulta 1054,50 gramos (g) para M1-W001 y 1100,60 gramos (g) para M2-W002. Entre las muestras existió una particularidad distintiva en el color. La M1-W001, se caracterizó por tener colores como el blanco, el negro y el gris en tonalidades más brillantes; mientras que la M2-W002, presentó los mismos colores combinados con un rojizo, en tonalidades más opacas.

Las muestras M1-W001 y M2-W002 fueron objeto, cada una, de un proceso de trituración en tres fases:

- **Fase I:** Trituración Primaria. En esta fase, las muestras, objeto de estudio, pasaron por una trituradora de mandíbula, que posibilitó la reducción del material, de 14,5cm hasta 3 cm.
- **Fase II:** Trituración secundaria: El material, resultado de la trituración primaria, pasó a una trituradora de mandíbula de menor abertura, reduciendo el material hasta 1,5 cm.
- **Fase III:** Trituración Terciaria. El material resultante de la segunda fase, que no alcanzó la granulometría deseada (entre malla 12 y 16), fue objeto de una nueva trituración, a través de una trituradora de rodillo, dando como resultado la fragmentación del material a su mínima expresión de 1 mm.

#### ***Caracterización física de la muestra***

Para la caracterización física de la muestra, se procedió a efectuar la distribución granulométrica y a la medición de la densidad relativa.

##### ***Distribución granulométrica***

Con el producto, la trituración secundaria se efectuó un cuarteo mecánico, mediante el método de roleo y cuarteo, así, posteriormente, se realizó una distribución granulométrica de cada una de las muestras para determinar los parámetros físicos en función a los equipos

de concentración utilizados. Para la distribución granulométrica se utilizó la serie de tamices de la norma ASTM E – 11/95 N: 4, 5, 8, 12, 16, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 170 y 200 mallas, definiendo el grado de liberación de los minerales asociados a la roca pegmatítica.

#### ***Medición de la densidad relativa por picnómetro***

Determinar la densidad relativa de la muestra requirió la selección de tres (3) picnómetros, los cuales permitieron procesar una muestra de 300 g de material, de 0.075 mm de tamaño, resultante del cuarteo mecánico.

Se realizaron cuatro (4) mediciones en cada uno de estos instrumentos. Se midió y se registró la masa en gramos en: Picnómetro vacío, picnómetro con mineral, picnómetro con mineral y agua, picnómetro con agua. Estas mediciones fueron hechas en una balanza (Modelo Precisa 310C-3010D). Se procedió al cálculo de la densidad relativa, obteniendo así la media aritmética y su desviación estándar.

#### ***Estimación del grado de liberación por Microscopia óptica***

La microscopia óptica permite obtener información cualitativa y cuantitativa de cada grano mineral, identificar los minerales presentes en la mena y el tamaño de partícula liberada. En este sentido, este método permitió evidenciar el grado de liberación de los minerales, de manera específica, la casiterita.

#### ***Caracterización química***

La caracterización química de la muestra se desarrolló mediante las técnicas de fluorescencia y distracción de rayos X. Estos métodos se aplicaron después haber realizado la concentración gravimétrica de la muestra M1-W001 y M2-W002, en cada uno de los equipos. La metodología desarrollada en la aplicación de las técnicas, se llevó a cabo siguiendo la misma secuencia establecida en el estudio realizado por González, Pérez, Vargas et al., (2018)

La preparación de las muestras, se realizó mediante un cuarteo manual, y la reducción del tamaño de las partículas haciendo uso de un mortero cerámico. El mineral pulverizado fue pasado a través del tamiz de N 200 ( $\varnothing = 0,074$  mm).

#### ***Caracterización mineralógica mediante la técnica Difracción de Rayos X***

La caracterización mineralógica se efectuó mediante la técnica Difracción de Rayos X (DRX), utilizando un Difractómetro de Rayos X, marca PHILLIPS, modelo PW3830,



aplicando radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ), operado a 45 kV y 40 mA, utilizando un detector de centelleo en una geometría Bragg-Brentano. El intervalo del ángulo de barrido, empleado para cada muestra, fue de 0 a  $75^\circ$  con un paso de barrido de  $0,016^\circ$  y 80 segundos por paso en un modo continuo.

#### ***Caracterización mineralógica mediante la técnica Fluorescencia de Rayos X de energía dispersa (FRX-ED)***

La determinación de los elementos mayoritarios se realizó mediante la técnica FRX-ED, en un Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X por Dispersión de Energía, marca Philips, modelo Minipal 2 PW4025/00. Para realizar los análisis, se prepararon 24 patrones de composiciones variables a partir de óxidos sintéticos puros de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{WO}_3$  y  $\text{ZrO}_2$ ; los cuales se utilizaron en la calibración estándar del Espectrómetro de FRX-ED.

#### ***Ensayos de Concentración gravimétrica***

Para dar respuesta al segundo objetivo, dirigido a evaluar un circuito de concentración para la casiterita, mediante la combinación de equipos de concentración gravimétrica a nivel de laboratorio, se indican las operaciones a las que fueron sometidas las muestras para separar la ganga de las partículas de interés. En estas operaciones se contemplaron los siguientes equipos: la Criba Hidráulica (JIG), Marca Denver, la Mesa Vibratoria tipo Wilfley, el espiral Humphrey, y un imán de alta intensidad, que cumplió la misma función del separador magnético. Se descartó el espiral Humphrey, por insuficiencia en la cantidad de la muestra seleccionada. Este equipo requiere, como mínimo, 30 kilos de material para su alimentación, necesarios para reproducir tres (3) ensayos con 10 kilos de muestra cada uno. Este requerimiento imposibilitó el uso del equipo, ya que la utilización del material disminuyó la muestra a menos de la cantidad requerida para este equipo.

A continuación, se describe la metodología utilizada:

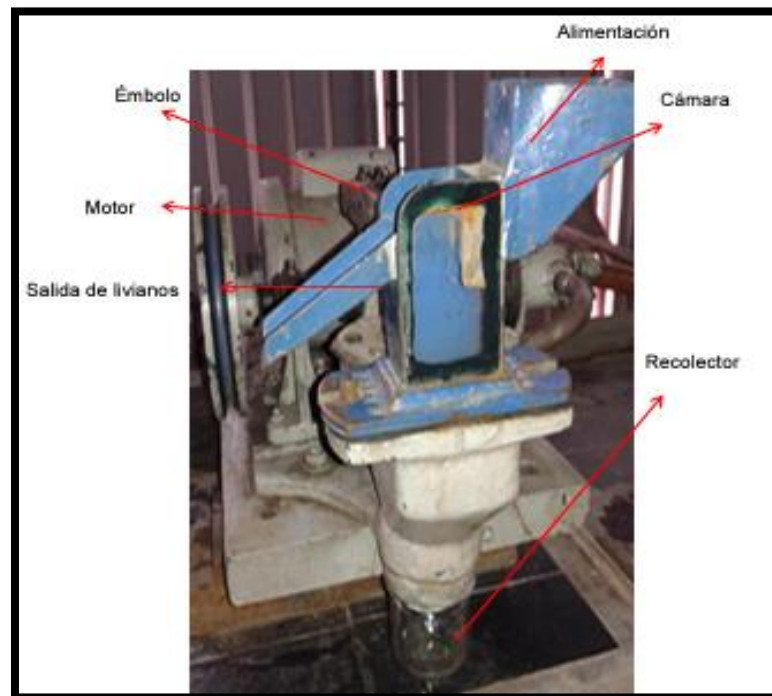
#### ***Preparación de la pulpa***

Se utilizó un alimentador marca Eriez Magnetics Hi-vi Vibratory Equipments modelo 15A, perteneciente a la serie 26, para la preparación y alimentación de la pulpa hacia la Criba Hidráulica (JIG), Marca Denver y la Mesa Vibratoria tipo Wilfley.

#### ***Ensayos de concentración en la Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver.***

Con este equipo se procedió de la siguiente manera:

- Se tamizaron 10 Kg de las muestras M1-W001 y M2-W002, con los tamices 12 y 16. El material retenido en el tamiz N.º 16 fue el utilizado para hacer la concentración gravimétrica.
- El material retenido en el tamiz N.º 16, se dividió en tres (3) porciones, para garantizar la reproducibilidad del ensayo.
- Para el procesamiento de la muestra, se tomaron en cuenta los parámetros establecidos para este equipo: tiempo de ciclo (TC), caudal de la cámara (CC), y la velocidad de alimentación (GA). Se hicieron dos (2) corridas en la criba hidráulica, que simulan dos (2) JIG en serie (ver figura 12). A cada muestra procesada en la criba, en cada corrida, se le reprodujo el ensayo tres (3) veces, variando entre un ensayo y otro el tiempo del ciclo y el caudal. En el primer ensayo, el tiempo fue determinado y un caudal de 17 litros por minuto (l/min). En el segundo ensayo, se aumentó el tiempo del ciclo y se disminuyó el caudal. El resultado de cada corrida tuvo como productos un concentrado, un mixto y unas colas, que fueron secadas a una temperatura T, para posteriormente pesar cada producto.
- Al finalizar las corridas en este equipo, se realizó un balance de masa metálico.



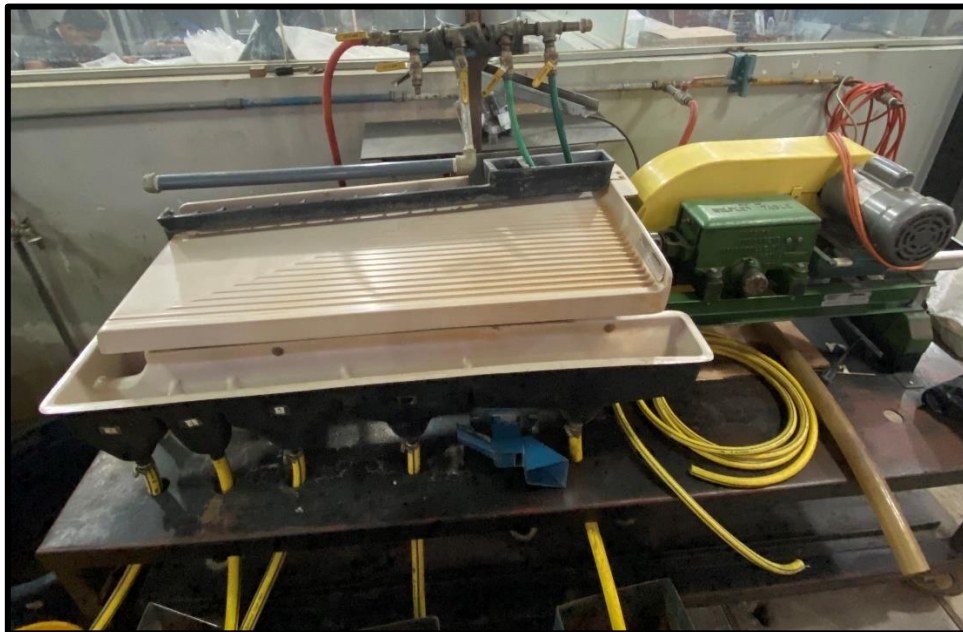
**Figura 12. Fotografía de un JIG Marca Denver 4" x 6", escala Laboratorio.**

Fuente: Peña, C 2019. *Fotografía de criba hidráulica JIG marca Denver a escala de laboratorio ubicada en el laboratorio de beneficio mineral GMG-FI-UCV.*

***Ensayos de concentración en la Mesa Vibratoria tipo Wilfley***

Los ensayos realizados en este equipo, siguieron la siguiente metodología:

- Se tamizaron 8 Kg de las muestras M1-W001 y M2-W002, con los tamices 30 y 200. El material retenido en el corte de los tamices N.º 30 y N.º 200, fue el utilizado para hacer la concentración gravimétrica en este equipo.
- Para procesar la muestra, se ajustó el equipo a 8° de inclinación, tal como lo propone Marañón (2019) en su estudio. De igual forma, se utilizaron también los parámetros: caudal de agua y ángulo de inclinación.
- A cada muestra procesada en la mesa en cada corrida, se le reprodujo el ensayo tres (3) veces, variando entre un ensayo y otro el ángulo de inclinación. Durante la primera corrida de la muestra, se colocó como ángulo de inclinación de la mesa 8°. En la segunda corrida, se ajustó el parámetro a 4°, y en la tercera, a 6°. El resultado de cada corrida tuvo como productos un concentrado, un mixto y unas colas, que fueron secadas y pesadas (Ver figura 13).



**Figura 13. Fotografía de una Mesa concentradora de sacudida del laboratorio de termocronología del Departamento de geología- UCV.**

Fuente: Elaboración propia.

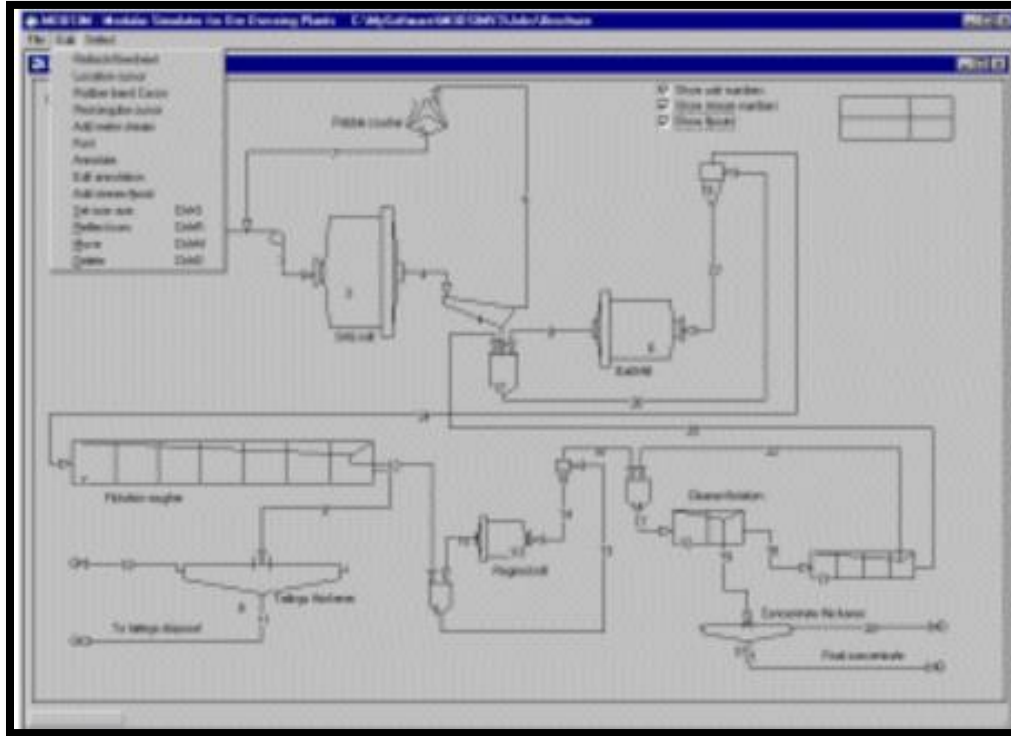
### ***Ensayo de separación magnética***

El ensayo de separación magnética se realiza con un imán de alta intensidad, que se aplica sobre los resultados obtenidos de la concentración gravimétrica. El resultado de la concentración gravimétrica es sometido al campo magnético del imán, para conseguir la concentración en dos partes: la fracción magnética y la fracción paramagnética, para ello, se procedió a lo siguiente:

1. La muestra, en su empaque correspondiente, se colocó en una superficie plana.
2. El imán de mano se pasó por encima del empaque, a una distancia de 1 cm por 40 repeticiones (el número de repeticiones depende de la cantidad de fracción magnética que posea la muestra).
3. Mediante este proceso, se obtuvo una fracción paramagnética y una fracción magnética.

### ***Simulación del circuito de concentración.***

Se utilizó el programa *MODULAR SIMULATOR for MINERAL PROCESSING PLANTS MODSIM<sup>m</sup> versión Student 3.6*. Este programa de simulación sirvió para calcular un circuito a proponer, y así poder compararlo con los datos obtenidos en laboratorio y poder realizar los ajustes. Se utilizaron valores obtenidos de información, tanto bibliográfica como de la obtenida directamente en mediciones que se realizaron en el laboratorio. En la figura 14, se muestra una de las ventanas de trabajo del programa.



**Figura 14. Ventana de del programa MODSIM.**  
 Fuente: <http://www.mineraltech.com/MODSIM/>.

***Estudio Económico.***

Este estudio económico involucra los costos de inversión y de operación a nivel de estimaciones. Lo que permitió evaluar, a nivel de ingeniería conceptual, los siguientes aspectos que se muestra en la Tabla 6:

**Tabla 6. Aspectos implicados en un estudio de costos de inversión y de operaciones**

<b>Inversión (CAPEX).</b>	<b>Selección de equipos y accesorios Inversión en equipos y accesorios Infraestructura</b>
<b>Costos Operativos (OPEX).</b>	Energía eléctrica* Seguros Mercantiles* Mano de obra* SSO* INCE* Política habitacional* Paro forzoso* Depreciación de equipos** Gastos generales
<b>Ingresos por ventas del Producto.</b>	Importes facturados por venta del Mineral

<b>Viabilidad económica del proyecto.</b>	TIR Análisis de sensibilidad VAN Payback Breakeven Razón costo beneficio
---	---

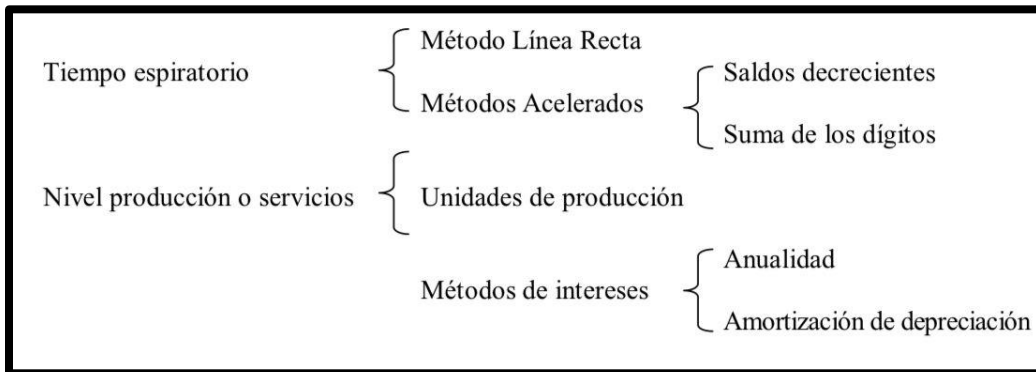
Fuente: Elaborada por los autores

\* La base de los cálculos de estos ítems fue tomada de los entes competentes, como lo son: Corpoelec, Instituto Venezolano de los Seguros Sociales, Banco Nacional de Vivienda y Habitación, Ministerio del Poder Popular para el Proceso Social del Trabajo, Colegio de Ingenieros de Venezuela, Ley Orgánica del Trabajo.

\*\* Hardness de la casiterita esta entre seis (6) y siete (7) según la escala de Mohs, y la abrasividad es una propiedad que refleja el efecto abrasivo de las rocas y minerales al contacto con otros materiales, siendo este mineral asociado a una roca pegmatita, cobra particular importancia la depreciación de los equipos debido a que esta propiedad de la casiterita, influye directamente en la vida útil de los materiales y eficiencia en el procesado de minerales y equipos de trabajo. Por lo tanto, de acuerdo a lo enunciado en el Modelo de Depreciación según el Servicio Prestado, se realizaron los cálculos de la depreciación de los equipos.

### ***Depreciación de equipos***

Los métodos de depreciación están clasificados de la siguiente manera, según (Meigs, B & Mosich, A, 1978)



**Figura 15. Clasificación de los métodos de depreciación.**

Fuente: Meigs B.; Mosich A. Intermediate Accounting, 4ta. ed (Mc Graw Hill: EUA 1978), p.523.

### ***Método de las unidades producidas***

Distribuye el costo de la inversión menos su valor de desecho, si lo tiene, a través de las unidades productivas de servicio. Las unidades pueden ser horas, kilómetros, golpes, etc. Este método distribuye el gasto por depreciación de una manera equitativa ya que el costo de depreciación es el mismo para cada unidad producida.

La fórmula para calcular la depreciación por unidad de producción es:

$$\text{Costo de depreciación unitario} = \frac{\text{Costo} - \text{Valor de desecho}}{\text{Unidades estimadas producción durante la vida útil}}$$

La depreciación anual se obtiene multiplicando el costo de depreciación unitario por las unidades producidas en el año.

Este método se aplica sobre todo cuando se tiene un sistema de costeo directo, ya que la depreciación varía en forma directa a las unidades producidas o en inversiones sujetas a agotamiento.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

Este capítulo presenta la descripción y análisis de los resultados obtenidos, durante la fase experimental desarrollada en el, 1) laboratorio de Beneficio Mineral del Departamento de Minas de la Universidad Central de Venezuela; 2) laboratorio de Geología y Geoquímica *Oscar Machado Zuluaga* de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela y, 3) laboratorio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales: CIDEMEX. La información presentada, permite dar respuesta a los objetivos específicos que sustentan la propuesta para el diseño conceptual de una planta de procesamiento de casiterita, proveniente del sector la Esperanza, estado Bolívar, Venezuela.

El desarrollo de la fase experimental del estudio, requirió el establecimiento de las condiciones iniciales de los equipos, así como la revisión bibliográfica para determinar los parámetros operativos. En este contexto se muestran, primero, los dos aspectos señalados anteriormente, para luego presentar los resultados obtenidos, propiamente de la fase experimental.

#### **4.1 Condiciones iniciales de los equipos**

La revisión de las condiciones iniciales se corresponde con la etapa exploratoria y diagnóstica de los equipos a utilizar en los laboratorios. Esta etapa consistió en colocar los equipos en condiciones operativas óptimas, para el uso en los análisis de concentración gravimétrica. Esta fase previa a la experimentación requirió:

- El reajuste/ajuste de parámetros operativos de los equipos
- La revisión del funcionamiento mecánico
- El diagnóstico estructural de los equipos

A continuación, se detalla la revisión que requirió cada equipo:

##### ***Criba hidráulica (JIG) Marca Denver***

La criba hidráulica (JIG) (ver figura 15), requirió de ensayos exploratorios para medir los parámetros operativos fijos del equipo: velocidad de alimentación, caudal de agua, tiempo de ciclo, fondo de granza (número de esferas).



Durante los ensayos exploratorios se observó que el caudal no satisfacía los valores óptimos enunciados en Peña (2019): caudal de cámara 22 l/min (ver la Tabla 10). Esta situación estuvo motivada por las condiciones hídricas del laboratorio y a una obstrucción en la parte central de la criba hidráulica entre el embolo y el tanque de alimentación. Ante este hecho se hizo necesario instalar una bomba autosedante de ½ HP, para elevar el caudal de entrada, obteniendo como valor máximo 17 l/min. De igual manera se requirió, para colocar en condiciones óptimas al equipo, el desarme del mismo, la limpieza del óxido que obstruía el canal por donde fluye el agua de entrada y el cambio del niple que conecta la manguera de alimentación con la criba hidráulica (JIG). A su vez, se instaló un manómetro para regular las presiones y alcanzar el caudal de agua requerido. Se anexa tabla 7, con el diagnóstico medido en porcentaje y la Figura 15, que muestra una fotografía del equipo diagnosticado.

**Tabla 7. Diagnóstico del estado físico de la Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver.**

<b>Motor</b>	<b>Mangueras</b>	<b>Émbolo</b>	<b>Cámara</b>	<b>Recolector</b>	<b>Salida de Livianos</b>	<b>Tanque de Alimentación</b>
<b>100%</b>	80%	100%	100%	80%	100%	60%

Fuente: Elaborada por los autores



**Figura 16. Fotografía de una Criba hidráulica Marca Denver (JIG) del laboratorio de Termocronología del Departamento de Geología- UCV.**  
Fuente: Elaboración propia.

### ***Mesa vibratoria tipo Wilfley.***

Este equipo requirió:

- Diagnóstico del estado físico del equipo.
- Revisión del funcionamiento mecánico.
- Ajuste de parámetros operativos del equipo.

Se realizaron ensayos exploratorios para medir los parámetros operativos fijos del equipo, tales como: velocidad de alimentación, caudal de agua, sacudidas por minuto, grado de inclinación. Durante los ensayos exploratorios se observó que el grado de inclinación (8°), como valor óptimo enunciado en Maraón (2019) (ver la Tabla 10), marcaba una tendencia de separación, donde el material pesado migraba a la salida de livianos de la mesa, obteniendo colas enriquecidas de material pesado. Por ello, se recurrió a entrevistas y consultas a personal que opera en el estado Bolívar, en plantas de beneficio mineral de casiterita. Las personas consultadas indicaron el ajuste del grado de inclinación (4°), en función a las operaciones diarias que llevan a cabo. De acuerdo al funcionamiento mecánico, se realizó el mantenimiento del aceite que lubrica el eje central de la mesa (resorte ensamblado). Se anexa tabla 8, con el diagnóstico medido en porcentaje.

**Tabla 8. Diagnóstico del estado físico de la Mesa vibratoria Wilfley.**

<b>Motor</b>	<b>Mangueras</b>	<b>Eje central (Resorte ensamblado)</b>	<b>Tabla y Rifles</b>	<b>Recolectores</b>	<b>Caja de distribución</b>	<b>Tubería de lavado</b>
<b>100%</b>	100%	100%	100%	100%	100%	90%

Fuente: Elaborada por los autores

#### **4.2 Revisión bibliográfica de los parámetros operativos**

La definición de los parámetros idóneos, que determinan la óptima operatividad de los equipos de concentración gravimétrica, antes de realizar cualquier procedimiento, es de suma importancia. Su conocimiento y manejo permiten disminuir o eliminar los errores, reducir la realización de ensayos exploratorios y, por consiguiente, acortar los tiempos empleados en laboratorio. En este contexto, para el presente estudio se realizó una revisión bibliográfica en investigaciones previas, que permitió delimitar los parámetros óptimos para los distintos equipos de concentración gravimétrica, requeridos en esta investigación.

Con la definición de los parámetros idóneos de los equipos de concentración gravimétrica, antes de realizar cualquier procedimiento, se logra disminuir o eliminar los errores, reduce los tiempos empleados en laboratorio, ya que, se disminuye la realización de ensayos exploratorios. Además, permite obtener el mayor porcentaje de Recuperación y Razón de Enriquecimiento. En la tabla 10 se presentan los parámetros seleccionados:

**Tabla 10. Parámetros operativos en la separación gravimétrica consultados en bibliografía.**

<b>Equipo</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Autor</b>
Criba hidráulica (JIG) Marca Denver	Tiempo de ciclo (TC)	5 min	Peña, C. (2019)
	Caudal de la cámara (CC)	22 l/min	
	Granulometría de Alimentación (GA)	(+1,4 – 1,70) mm	
Mesa de sacudida tipo Wilfley	Ángulo de inclinación	8° y 9°	Marañón, J. (2019)
	Número de sacudidas por minuto	(300 – 450) RPM	
	Caudal de agua	15,45 l/min	
	Ángulo de inclinación	8°	Tovar, A. (2019)
	Caudal de agua	15 l/min	
Espiral Humphreys	Sólidos en pulpa	10 % y 20%	Condoretty, R. (2003)
	Caudal de agua	(32 – 45) l/min	
	Razón de alimentación	27 kg/min	

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 Resultados del desarrollo experimental

A continuación, se describen los resultados obtenidos en la fase experimental:

## *Caracterización Geometalúrgica*

### *Caracterización física*

#### *Distribución granulométrica*

El análisis granulométrico definió la medición gradual de las partículas, que conforman las dos muestras M1-W001 y M2-W002, pertenecientes a la geología del sector la Esperanza, estado Bolívar. En la Tabla 11 se muestran las mediciones obtenidas:

#### *Distribución granulométrica de la muestra M1-W001*

**Tabla 11. Distribución granulométrica muestra cabeza M1-W001.**

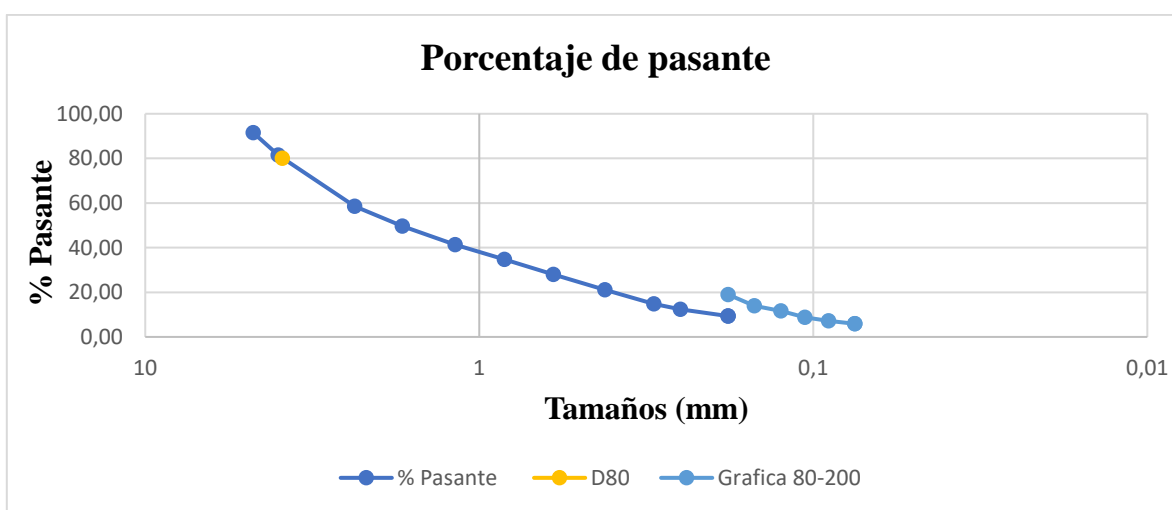
<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso Retenido (g)</b>	<b>Retenido (%)</b>	<b>Retenido % Acum</b>	<b>% Pasante</b>
<b>4</b>	4,75	89,40	8,48	8,48	91,52
<b>5</b>	4,00	106,20	10,07	18,55	81,45
<b>8</b>	2,36	241,40	22,89	41,44	58,56
<b>12</b>	1,70	94,50	8,96	50,40	49,60
<b>16</b>	1,18	87,70	8,32	58,72	41,28
<b>20</b>	0,84	69,70	6,61	65,33	34,67
<b>30</b>	0,60	70,10	6,65	71,98	28,02
<b>40</b>	0,42	72,40	6,87	78,84	21,16
<b>50</b>	0,30	67,30	6,38	85,23	14,77
<b>60</b>	0,25	24,90	2,36	87,59	12,41
<b>80</b>	0,18	32,30	3,06	90,65	9,35
<b>Fondo</b>	0	95,70	9,08	99,72	0,28
			99,72		

Fuente: Elaborado por los autores

En la tabla 11 se observa que en el tamiz 8, el peso retenido es de 241,40 g; en términos de porcentaje corresponde a un 22,89 % de masa retenida con respecto a toda la muestra, siendo este el mayor valor de retención con relación al resto de los tamices. La retención en los tamices N.º 12, 16, 20, 30, 40 y 50, no tuvo una variación significativa, sin embargo, está reflejado que la mayoría del material esta retenida hacia los tamices N.º 4, 5 y 8, indicando que en esta muestra la granulometría predominante varía de grava fina a arena gruesa. Hubo una pérdida de 0,28% con relación al peso total (1054,5 g), pudiéndose

relacionar a la manipulación del material. Cabe destacar que, al observar los retenidos de cada malla, la coloración negra fue predominante en los tamices N.º 16, 20, 30, 40, 50 y 60, principalmente, sin embargo, es importancia señalar que hasta el tamiz N.º 150 se percibe esa coloración oscura. Esta coloración negra es característica de los minerales pesados, tales como minerales de casiterita y granate. El gráfico 1, muestra que la curva granulométrica “M1-W001”, está en función del Porcentaje pasante vs Abertura de los tamices (mm). Además, se aprecia que el d80 está por debajo del tamiz N.º 5 y por encima del tamiz N.º 8, también se refleja que hay presencia de arenas finas.

**Gráfico 1. Distribución granulométrica muestra cabeza M1-W001.**



Fuente: Elaborada por los autores

### ***Distribución granulométrica de la muestra M2-W002***

En la tabla 12, se muestran las mediciones obtenidas de la muestra M2-W002:

**Tabla 12. Distribución granulométrica muestra cabeza M2-W002.**

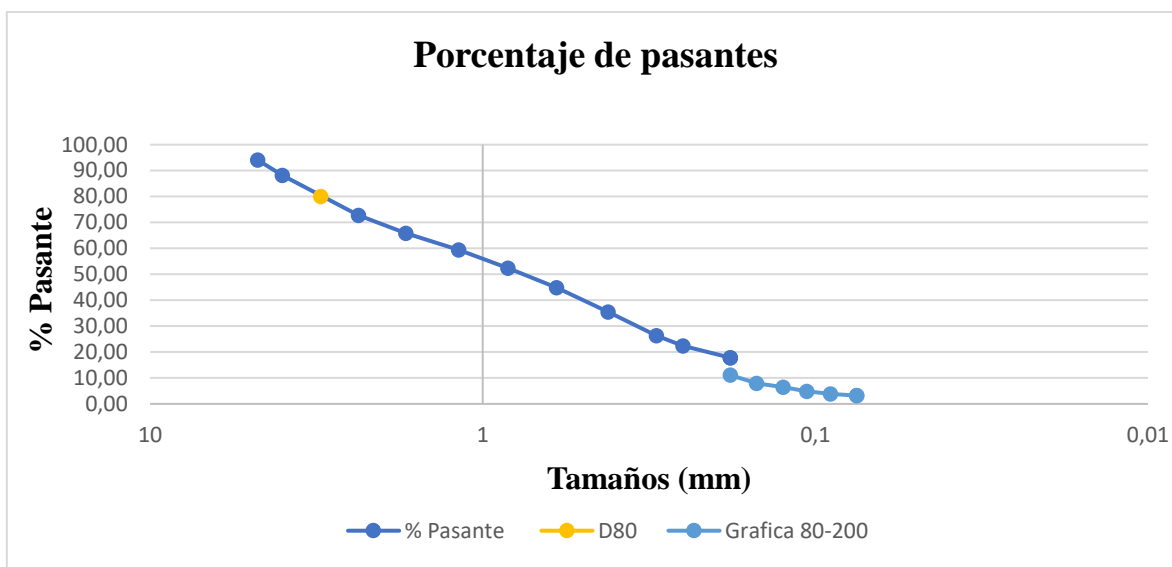
<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso Retenido (g)</b>	<b>Retenido (%)</b>	<b>Retenido % Acum</b>	<b>% Pasante</b>
<b>4</b>	4,75	64,90	5,90	5,90	94,10
<b>5</b>	4,00	65,70	5,97	11,87	88,13
<b>8</b>	2,36	169,80	15,43	27,29	72,71
<b>12</b>	1,70	75,60	6,87	34,16	65,84

<b>16</b>	1,18	70,60	6,41	40,58	59,42
<b>20</b>	0,84	78,10	7,10	47,67	52,33
<b>30</b>	0,60	82,50	7,50	55,17	44,83
<b>40</b>	0,42	103,40	9,39	64,56	35,44
<b>50</b>	0,30	100,50	9,13	73,70	26,30
<b>60</b>	0,25	43,70	3,97	77,67	22,33
<b>80</b>	0,18	49,70	4,52	82,18	17,82
<b>Fondo</b>	0	191,70	17,42	99,60	0,40
			99,60		

Fuente: Elaborada por los autores

Como se puede observar, en la tabla anterior, en el fondo el peso retenido es de 191,70 g, en términos de porcentaje corresponde a un 17,42 % de masa retenida con respecto a toda la muestra, siendo este el mayor valor de retención con relación al resto de los tamices. La retención en los tamices N.º 12, 16, 20, 30, 40 y 50 no tuvo una variación significativa, sin embargo, está reflejado que la mayoría del material esta retenida hacia los tamices N.º 4, 5, 8, 12, 16, 20 y 30, indicando que en esta muestra la granulometría predominante varía de arena gruesa a media. Hubo una pérdida de 0,40% con relación al peso total (1100,6 g), pudiéndose relacionar a la manipulación del material. Cabe destacar, al observar los retenidos de tamiz, que la coloración negra fue predominante en los tamices N.º 30, 40, 50 y 60, principalmente; sin embargo, es importante señalar que, hasta el tamiz N.º 150 se percibe esa coloración oscura. Esta coloración negra es característica de los minerales pesados, tales como minerales de casiterita y granate almandino. El grafico 2, muestra que la curva granulométrica “M2-W002”, está en función del Porcentaje pasante vs Abertura de los tamices (mm). Además, se aprecia que el d80 está por debajo del tamiz N.º 5 y sobre el tamiz N.º 8, también se refleja que hay presencia de arenas finas.

**Grafica 2. Distribución granulométrica muestra cabeza M2-W002.**



Fuente: Elaborada por los autores

### *Medición de la densidad relativa por picnómetro*

La medición de la densidad relativa por picnómetro, es una técnica utilizada para determinar la densidad de un líquido o sólido. Consiste en tomar una muestra del material y pesarla, utilizando un picnómetro, que es un recipiente de volumen conocido y precisamente calibrado (ver tabla 13). Se realizó esta medición tres (03) veces para, posteriormente, calcular la media aritmética y la desviación estándar en cada muestra (ver tabla 14).

**Tabla 13. Medición de la densidad relativa por picnómetro.**

	<b>Número de Picnómetro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	<b>M1-W001</b>	Picnómetro (g)	14,60	13,70
Picnómetro con mineral (g)		15,10	14,40	31,50
Picnómetro con mineral y agua (g)		39,70	39,10	54,60
Picnómetro con agua (g)		39,40	38,80	53,50
<b>M2-W002</b>	Número de Picnómetro	1	2	3
	Picnómetro (g)	14,80	14,20	29,90
	Picnómetro con mineral (g)	15,70	15,10	31,70
	Picnómetro con mineral y agua (g)	40	39,40	54,90
	Picnómetro con agua (g)	39,40	38,80	53,50

Fuente: Elaborada por los autores



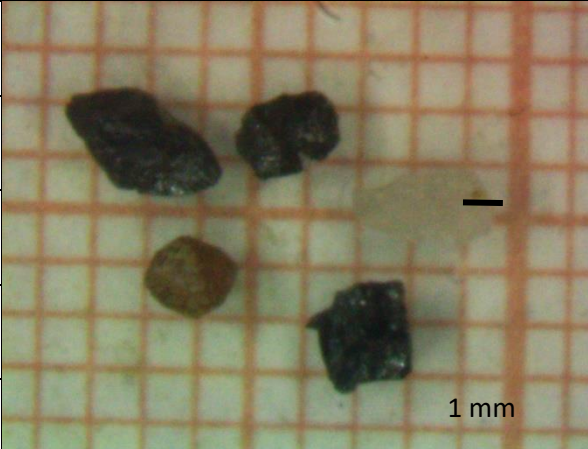
**Tabla 14. Medición de la media aritmética y la desviación estándar de la densidad relativa por picnómetro.**

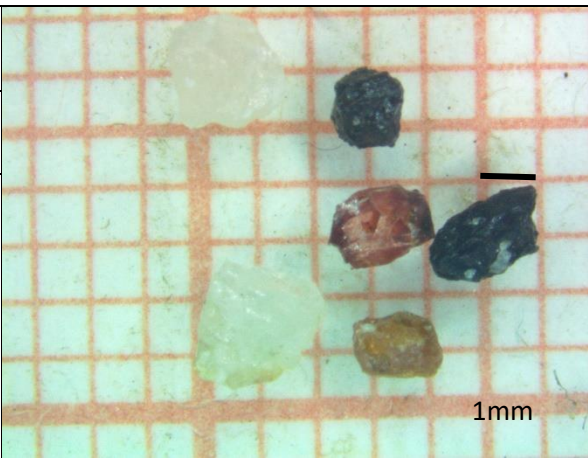
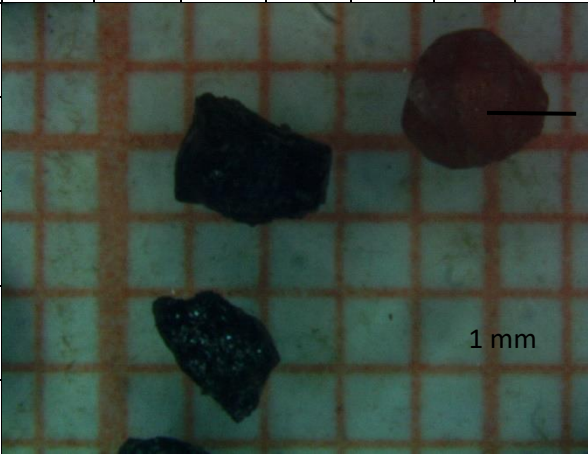
<b>M1-W001</b>	<b>Media Aritmética</b>	<b>Desviación Estándar</b>
	2,27	0,46
<b>M2-W002</b>	<b>Media Aritmética</b>	<b>Desviación Estándar</b>
	3,50	0,87

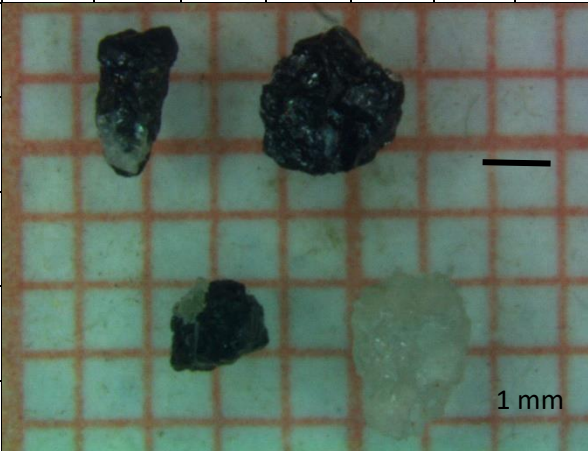
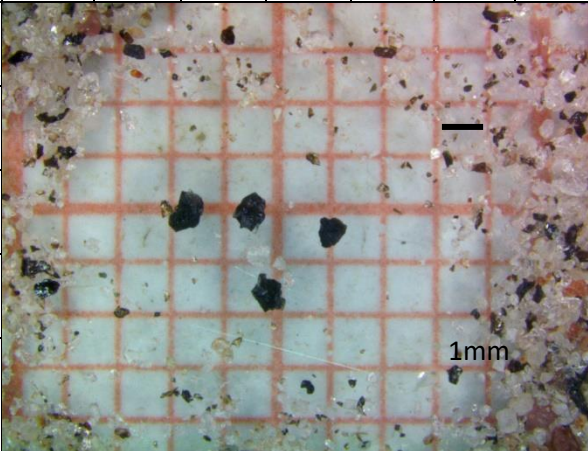
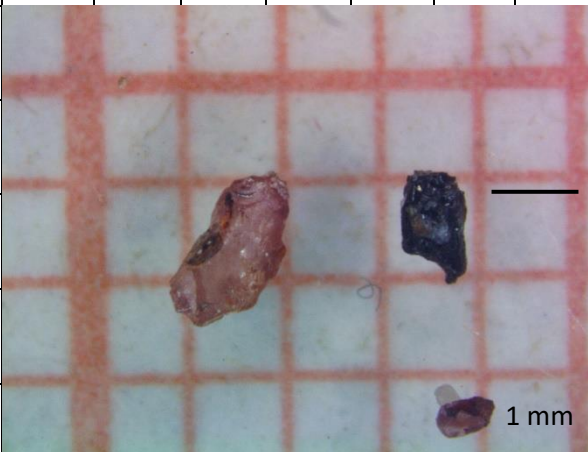
Fuente: Elaborada por los autores

***Estimación del grado de liberación por Microscopía óptica***

Se realizó una descripción detallada de las muestras, utilizando el microscopio óptico petrográfico, ubicado en el laboratorio CIDEMEX, de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Esto se hizo después de que las muestras fueron concentradas en la Criba hidráulica, Marca Denver (JIG), y en la mesa de sacudidas tipo Wilfley. El objetivo era identificar la presencia del mineral de casiterita y otros minerales, asociados a la roca pegmatita en cada muestra. A continuación, las figuras 17, 18, 19, 20, 21 y 22, exponen fotomicrografías de partículas liberadas de las muestras analizadas, en las distintas fases de corrida en el JIG, con su respectivo comentario.

	A	B	C	D	E	F	G	<p>Comentario: Se puede apreciar en el recuadro 2B-C, 2D y 4E partículas liberadas del mineral casiterita con un tamaño aproximado de 4 mm.</p> <p><b>Figura 17. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la primera fase de corrida del en el JIG de la muestra M1-W0011</b></p>
1								
2								
3								
4								
5								
	A	B	C	D	E	F	G	<p>Comentario: Se aprecia en el recuadro 1-2E, 1-2F con un tamaño aproximado a 1 mm y la posición 3F con tamaño de 4 mm</p>
1								
2								

3								partículas liberadas del mineral casiterita en conjunto con minerales asociados como granate almandino, cuarzo y plagioclasa.
4								<b>Figura 18. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la segunda fase de corrida del en el JIG de la muestra M1-W0012</b>
5								
	A	B	C	D	E	F	G	
1								
2								Comentario: En la posición 2C-D y 4-5C 4B se observan unas partículas liberadas del mineral casiterita, con un tamaño aproximado de 2 mm.
3								<b>Figura 19. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la primera fase de corrida del en el JIG de la muestra M2-W0023</b>
4								
5								

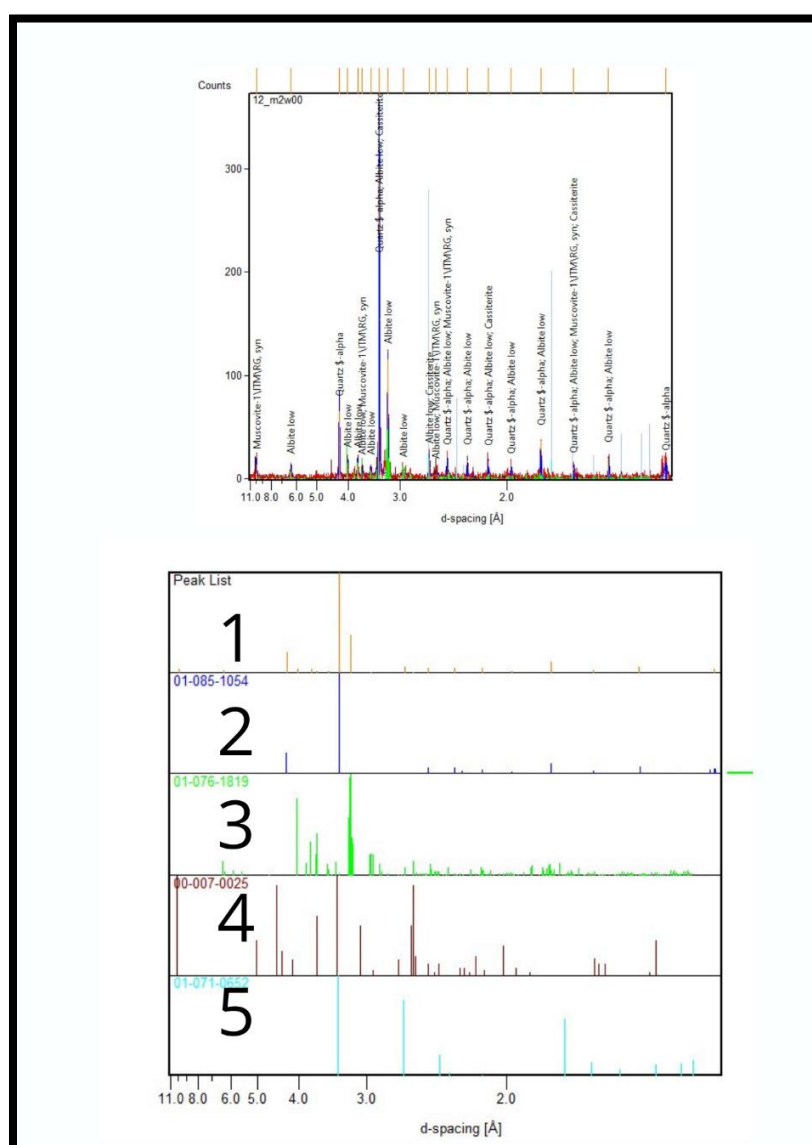
	A	B	C	D	E	F	G	
1								<p>Comentario: Se aprecian partículas ocluidas y liberadas del mineral casiterita. Partículas ocluidas 1-2B de 2 mm de tamaño y 4C de 1 mm. Partículas liberadas en el recuadro 1-2D-E.</p> <p><b>Figura 20. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la segunda fase de corrida del en el JIG de la muestra M2-W0021</b></p>
2								
3								
4								
5								
	A	B	C	D	E	F	G	
1								<p>Comentario: Se aprecia en el recuadro 3C, 3D y 4D partículas liberadas y concentradas del mineral casiterita en conjunto con minerales asociados como granate almandino, cuarzo y plagioclasa.</p> <p><b>Figura 21. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la primera fase de corrida del en la mesa de sacudidas tipo Wilfley de la muestra M2-W002</b></p>
2								
3								
4								
5								
	A	B	C	D	E	F	G	
1								<p>Comentario: Se aprecia en el recuadro 3F, partículas liberadas y concentradas del mineral casiterita en conjunto con minerales asociados como granate almandino.</p> <p><b>Figura 22. Fotomicrografía de partículas liberadas, de la segunda fase de corrida del en la mesa de sacudidas tipo Wilfley de los mixtos de la muestra M1-W001</b></p>
2								
3								
4								
5								

Gracias a las operaciones unitarias de beneficio, que incluyen la trituración primaria, secundaria, terciaria y la concentración gravimétrica en los equipos mencionados, se pudo observar que el mineral de interés ya estaba liberado en un rango de tamaño, desde el tamiz P#12 hasta el tamiz R#200.

### *Caracterización química*

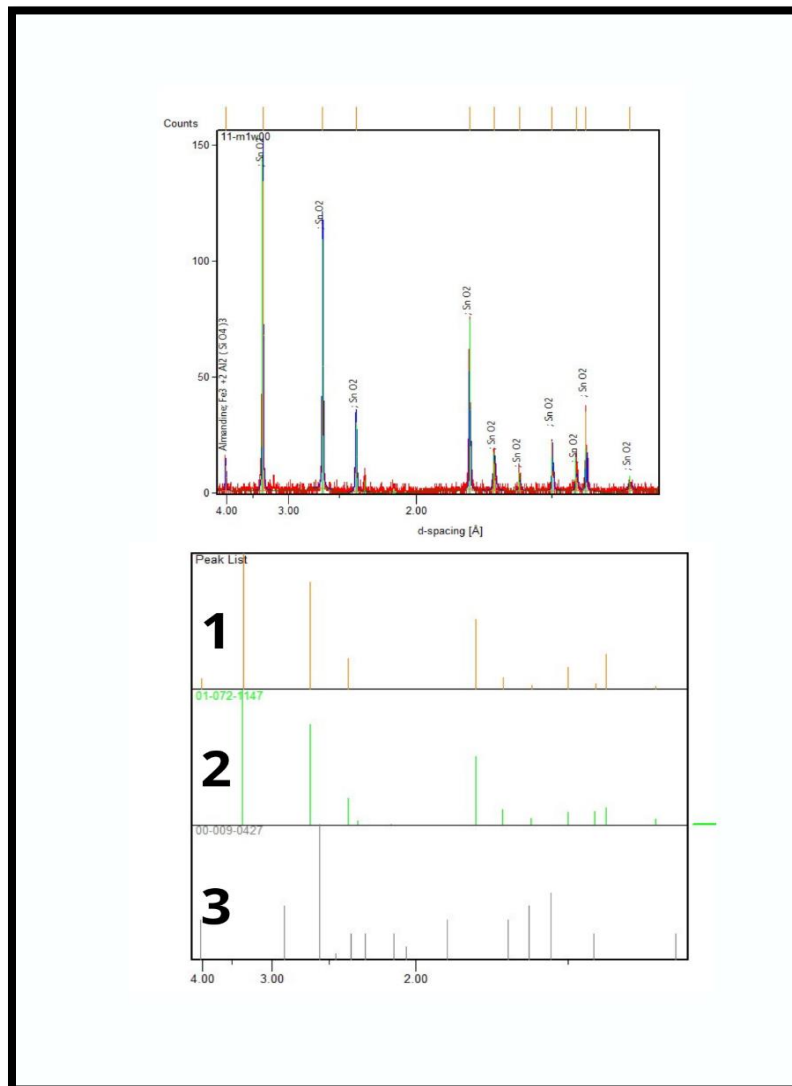
### *Caracterización mineralógica mediante la técnica Difracción de Rayos X*

A continuación, se muestra en las figuras, 23 a la 35, los Difractogramas y gráficas comparativas de los minerales existentes en las muestras cabezas analizadas:



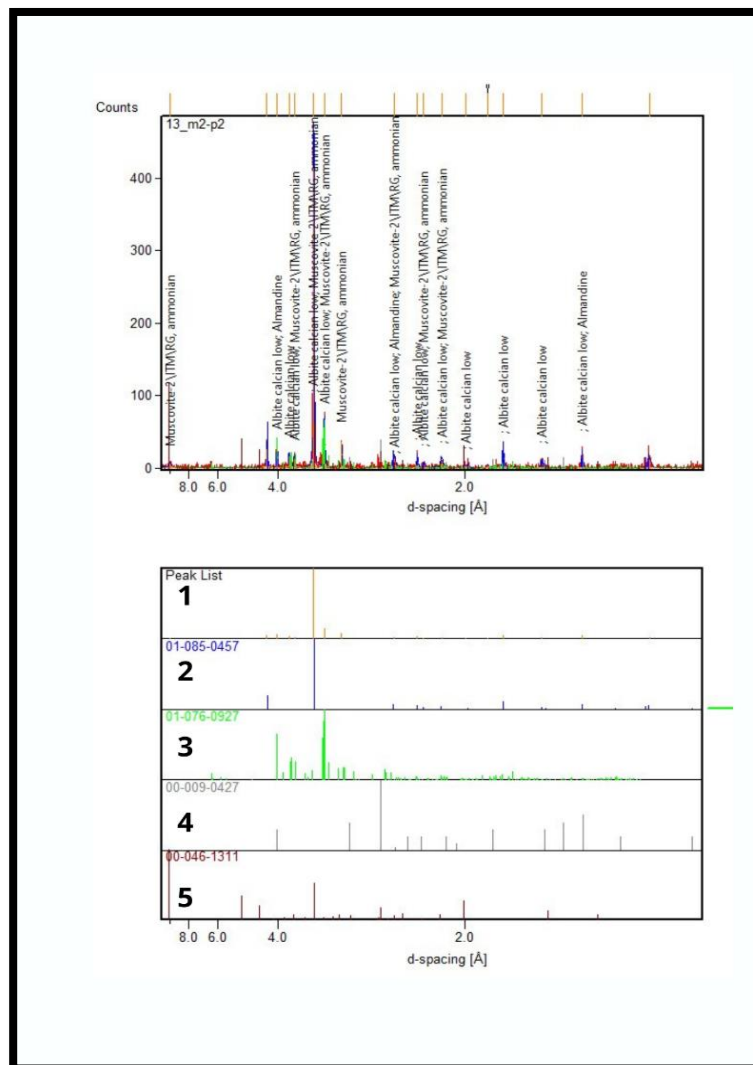
**Figura 23. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en la muestra cabeza M2-W002.**

En el difractograma, presente en la figura 23, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en la muestra M2-W002, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de la mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, cuarzo [2], albita low [3], muscovita [4], resaltan que hay presencia del mineral de interés, casiterita [5].



**Figura 24. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la fase 1 del JIG para M1-W0012.**

En el difractograma que se refleja en la figura 24, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en el concentrado de la Fase 1 de la criba hidráulica (JIG) M1-W0012, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de la mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado, con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, granate almandino [3] y casiterita [2], cabe resaltar que este último es nuestro mineral de interés.

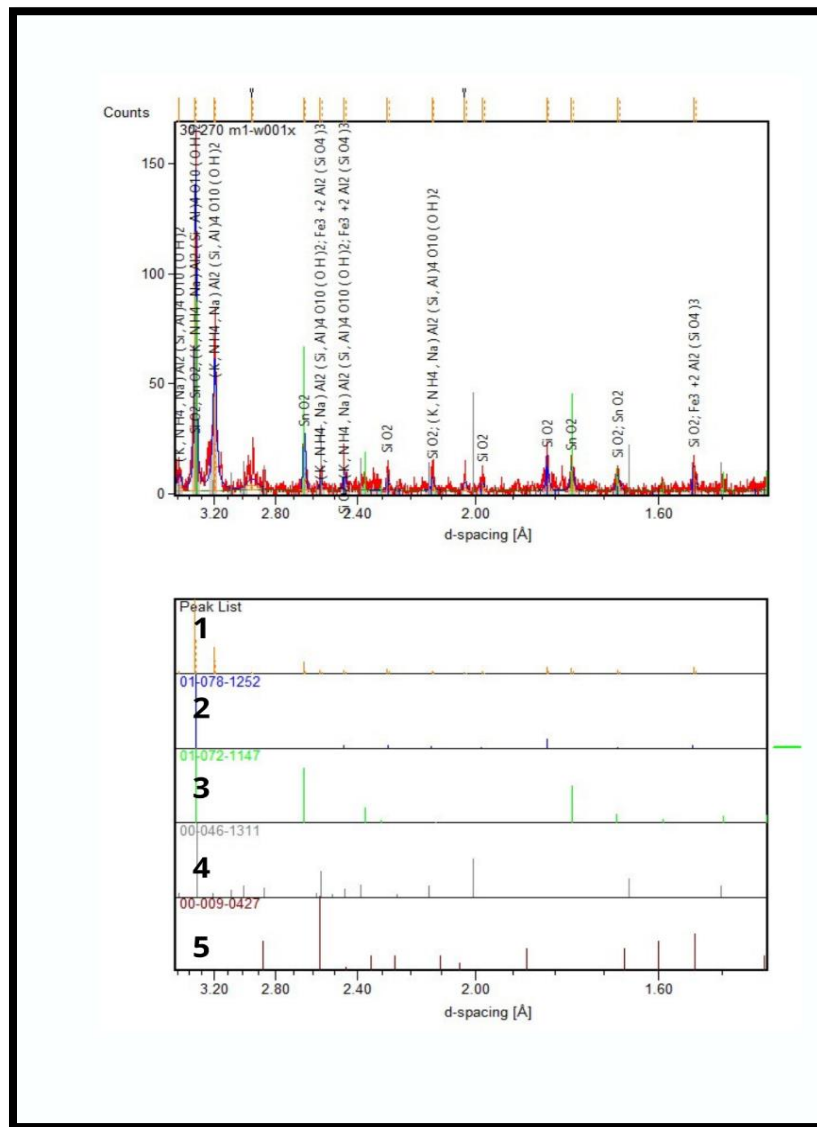


**Figura 25. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en P200 de M2-W002.**

En el difractograma presente en la figura 25, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en la muestra asociada al Pasante de la malla 200 (P200)



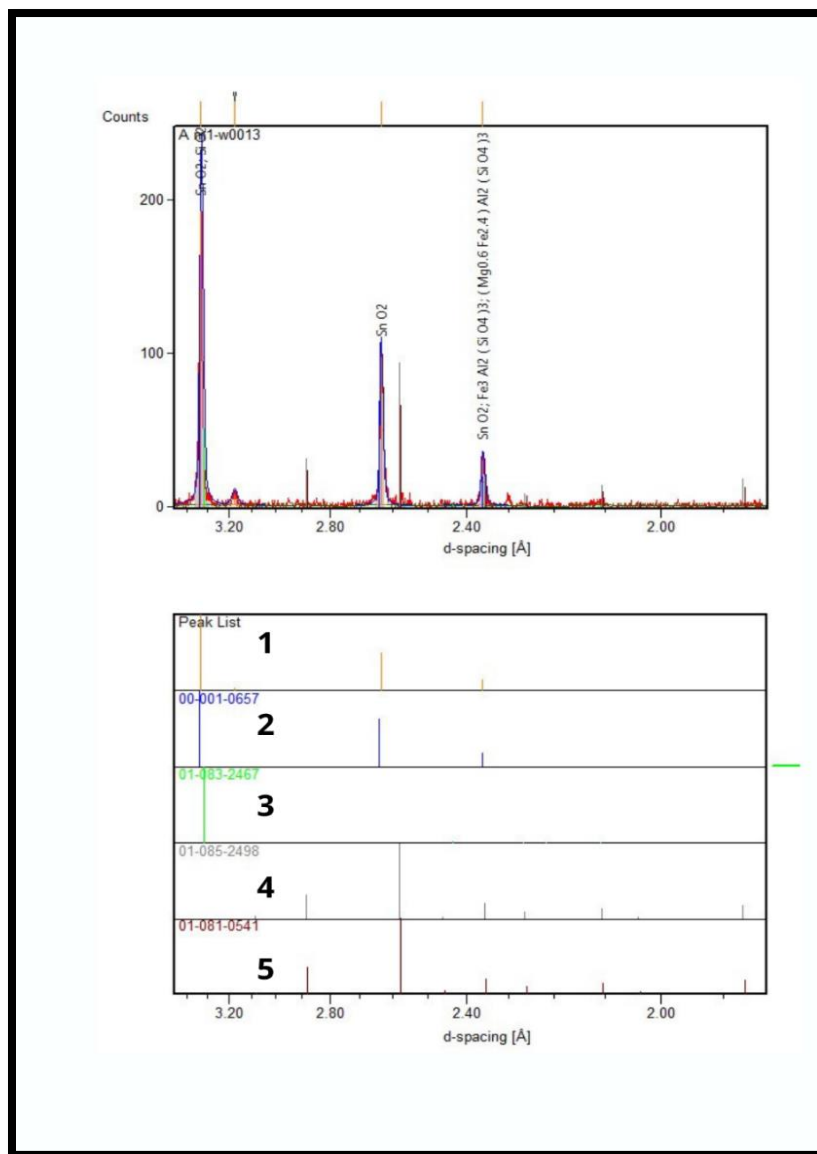
M2-W002, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de la mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, cuarzo [2], albite calcian low [3], granate almandino [4] y muscovita [5], no hay presencia del mineral de interés, casiterita.



**Figura 26. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el corte #30 - #200 de M1-W001**

En el difractograma anterior, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales, presentes en la muestra asociada al corte del pasante de malla 30 y retenido de la malla 200 (#30 - #200) M1-W001, con relación a las intensidades de los picos del

difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de la mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado, con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, cuarzo [2], muscovita [4], granate almandino [5], hay presencia del mineral de interés, casiterita [3].

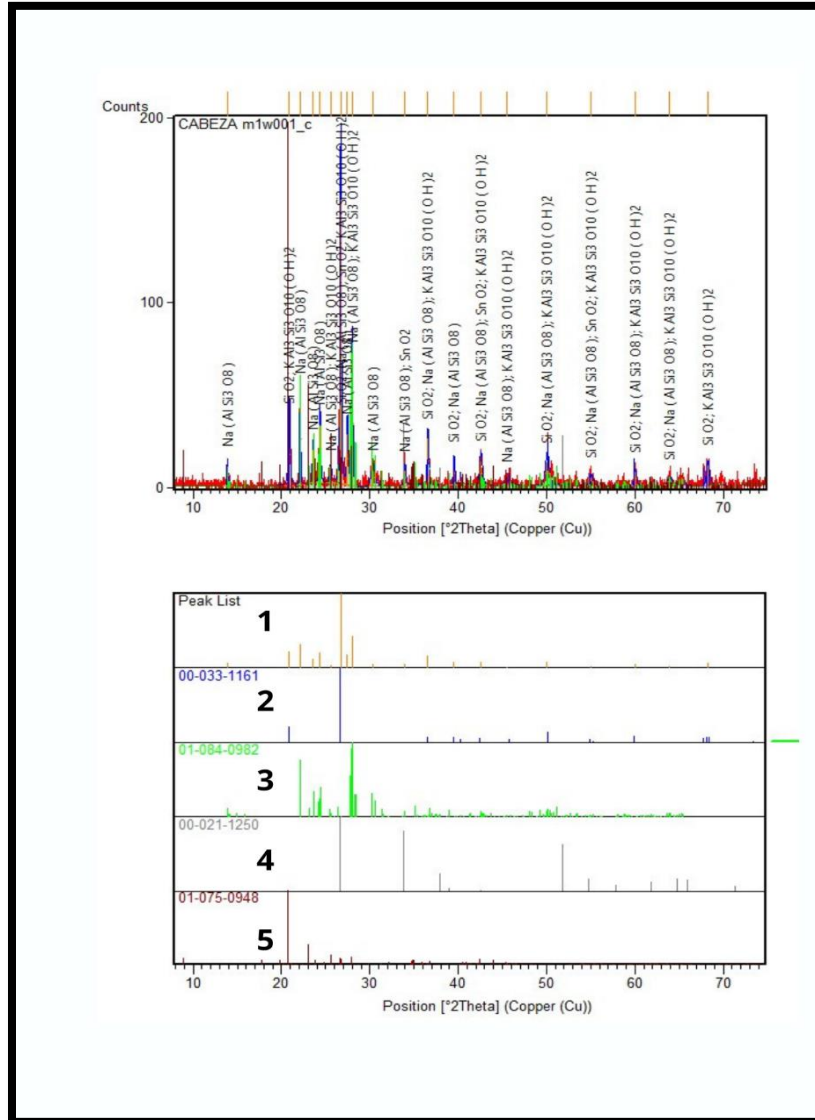


**Figura 27. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la Fase 2 del JIG para M1-W0013**

En el difractograma presente en la figura 27, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en el concentrado de la Fase 2 del JIG para M1-W0013, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de la mismas, [1] el gráfico del mineral



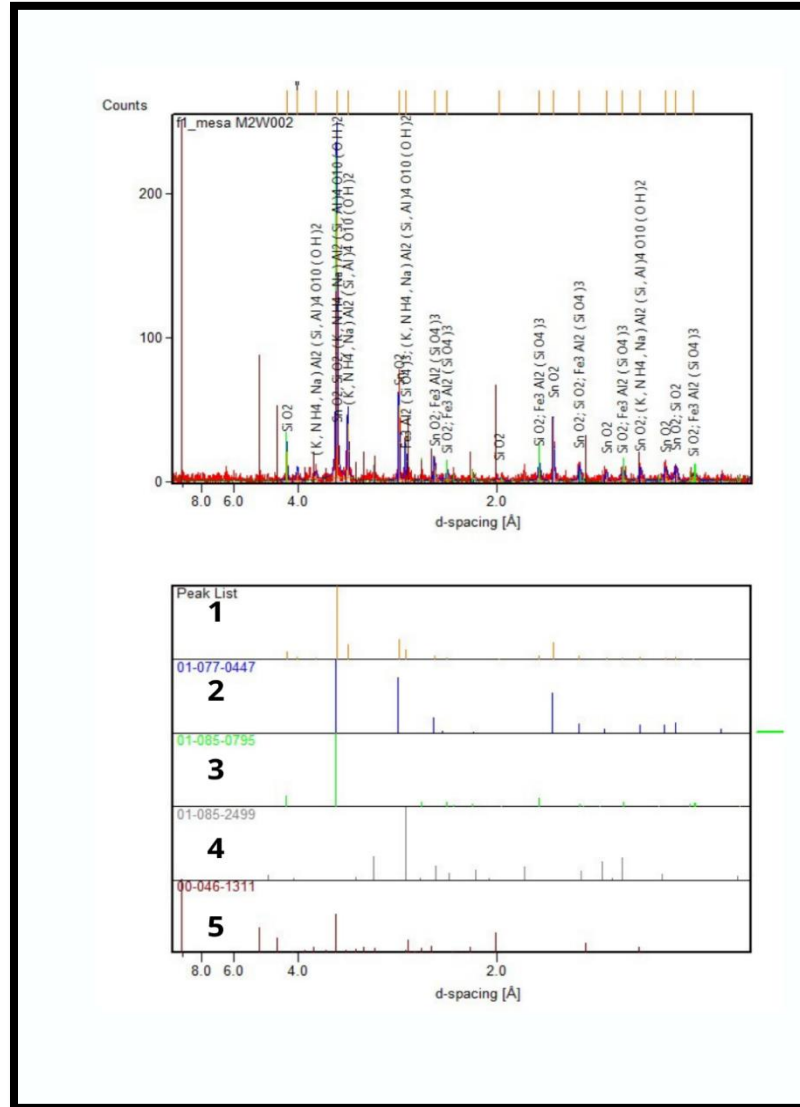
estudiado, con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, cuarzo [3], granate almandino rico en hierro[4], granate almandino rico en magnesio [5], hay presencia del mineral de interés, casiterita [2].



**Figura 28. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en la muestra cabeza M1-W001**

En el difractograma que muestra la figura 28, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en la muestra cabeza M1-W001, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de la mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado, con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, cuarzo [2], albita low[3], casiterita [4]

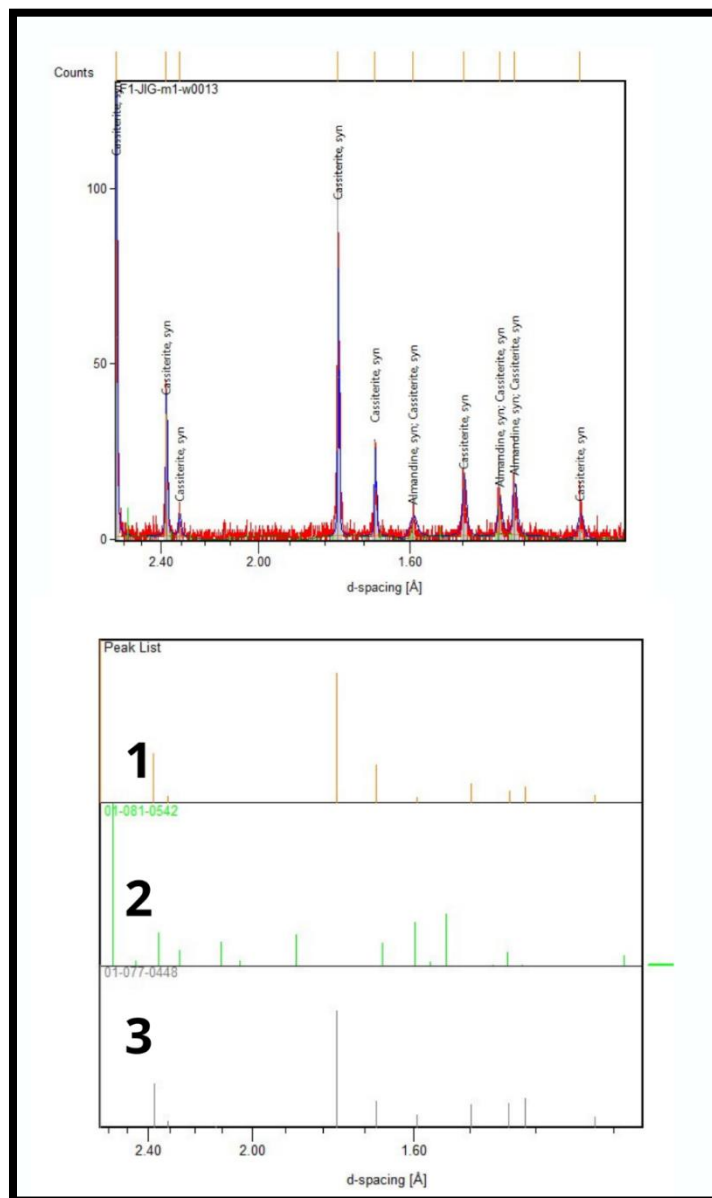
siendo este último el mineral de interés, se puede observar como en la muestra cabeza 1, hay presencia de este mineral, dando paso a sus procesos de concentración y, por último, muscovita [5].



**Figura 29. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la fase 1 de la mesa vibratoria para M2-W002**

En el difractograma se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en la muestra cabeza M1-W001, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de las mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, casiterita [2] dándole continuidad a los procesos de concentración

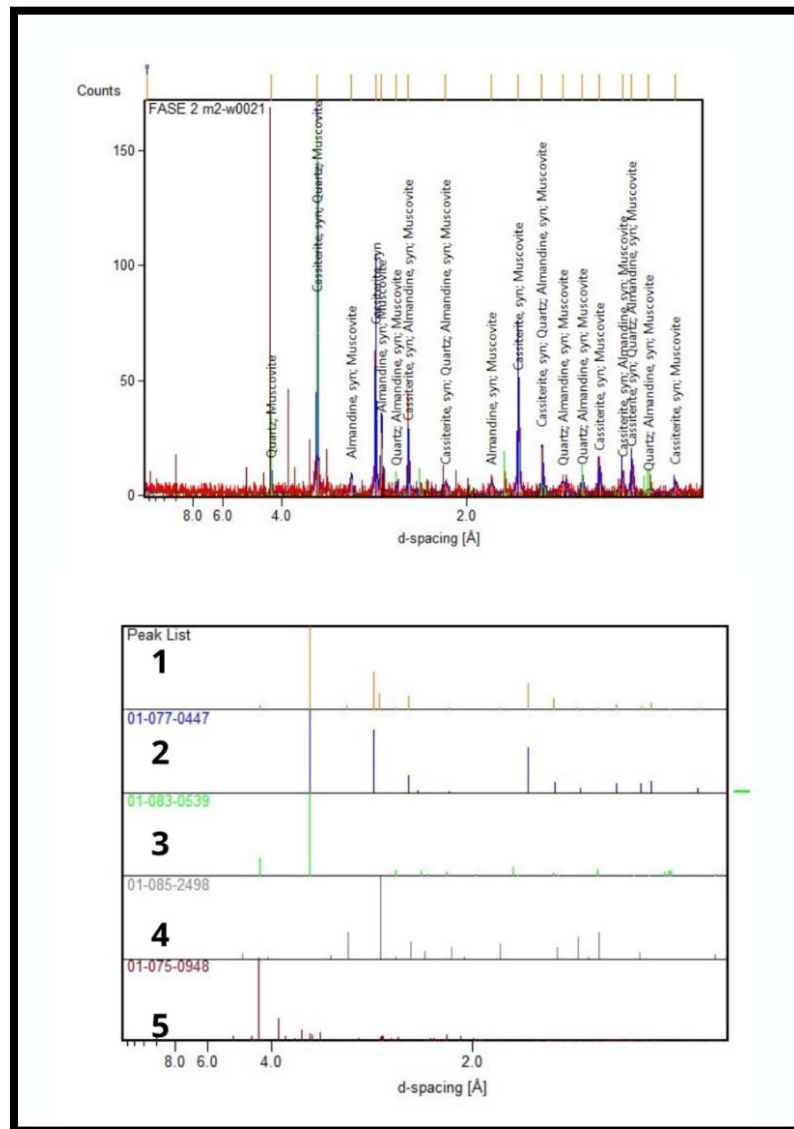
gravimétrica, siendo el mineral de interés a concentrar en el circuito de beneficio, cuarzo [3], granate almandino[4] y, por último, muscovita [5].



**Figura 30. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la Fase 1 del JIG para M1-W0013.**

En el difractograma anterior, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en el concentrado de la Fase 1 del JIG en M1-W0013, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de la mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, granate almandino[2], y la casiterita

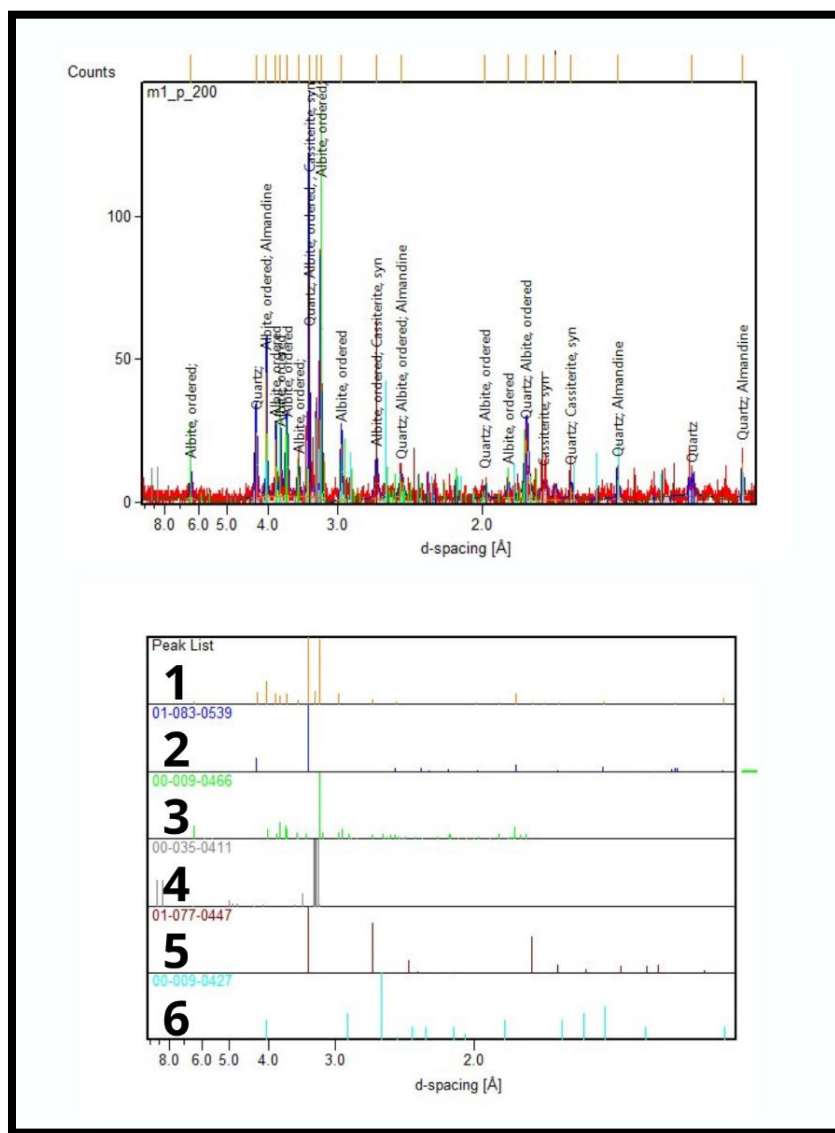
[3], que al igual que el análisis anterior, destaca para el diseño del circuito de beneficio mineral, logrando elevar las concentraciones presentes del mineral.



**Figura 31. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la Fase 2 del JIG para M2-W0021**

En el difractograma que muestra la figura 31, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en el concentrado de la Fase 1 del JIG en M1-W0013, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de las mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado, con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, casiterita, [2] que al igual que el análisis anterior, destaca para el diseño del circuito de beneficio mineral,

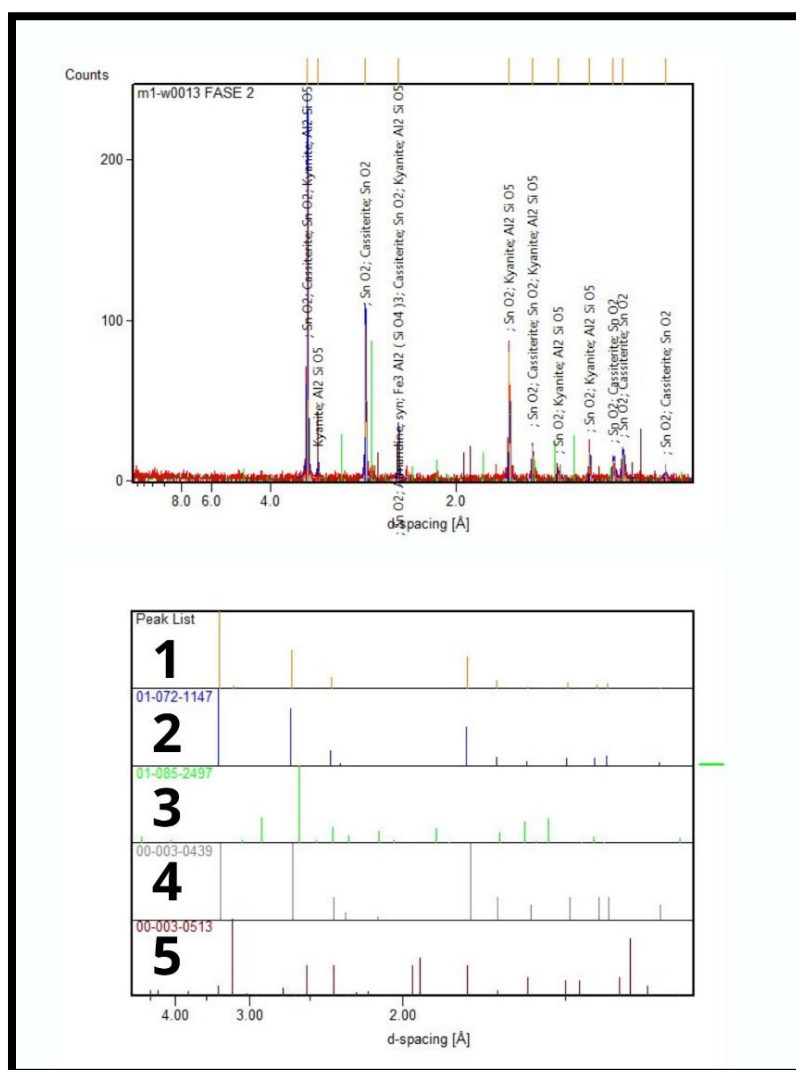
logrando elevar las concentraciones presentes del mineral, cuarzo [3], granate almandino [4] y la muscovita [5].



**Figura 32. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el P200 para M1-W001**

En el difractograma que muestra la figura 32, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en el concentrado de la Fase 1 del JIG en M1-W0013, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de la mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado, con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, cuarzo [2], albita ordenada [3], molybdenum oxide, [4] la presencia de este mineral solo hace referencia

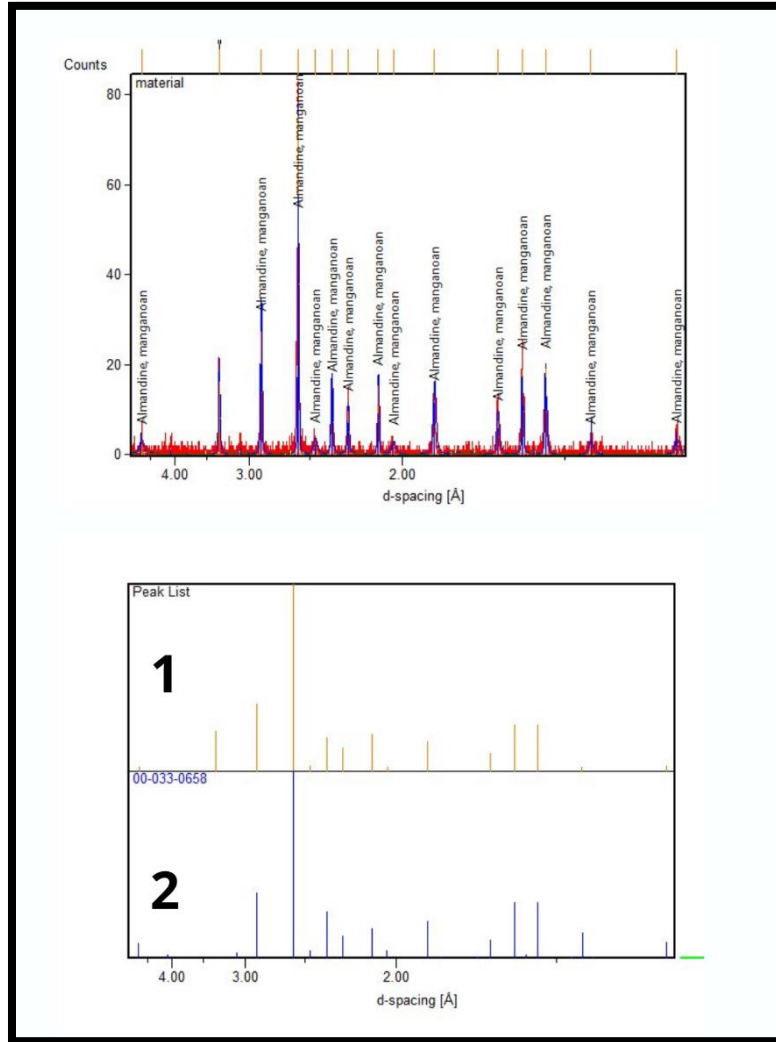
a una aproximación del programa con la muestra, pero que se descarta su presencia porque la mena en estudio no tiene asociado este tipo de mineral en su composición, casiterita [5], vale señalar que el programa pudo detectar, en muy bajo porcentaje, la presencia de nuestro mineral de interés, ya que abunda en tamaño de granos mayor a la malla 200, y por último, el granate almandino [6].



**Figura 33. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado del JIG de la fase 2 para M1-W0013**

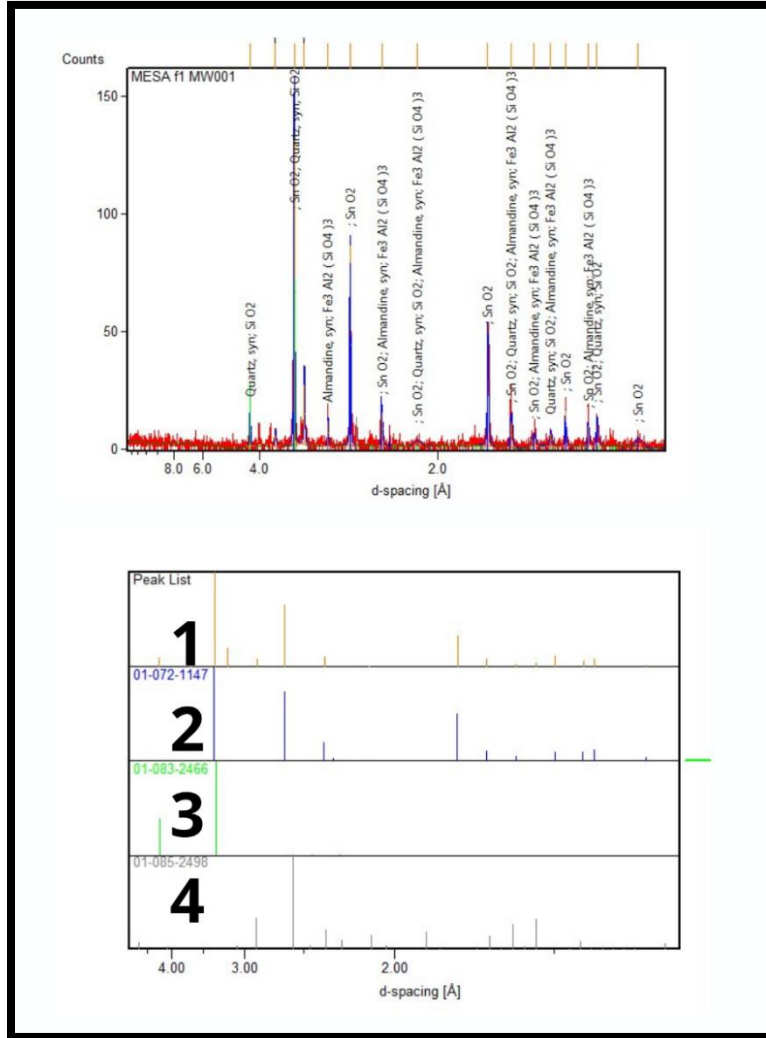
En el difractograma que refleja la figura 33, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en el concentrado de la Fase 2 del JIG en M1-W0013, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de las mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado, con el cual se comparan las diferentes fases mineralógicas presentes, casiterita

[2,4], destaca para el diseño del circuito de beneficio mineral, logrando elevar las concentraciones presentes del mineral granate almandino [3] y la kyanite, asociada a aluminio silicatos, refiriéndose a presencia de feldespatos[5].



**Figura 34. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado magnético de la mesa en la fase 1.**

En el difractograma que refleja la figura 34, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en el concentrado magnético de la Fase 1 de la Mesa Vibratoria, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de las mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado, con el cual se compara las diferentes fases mineralógicas presentes, granate almandino [2] que, en este particular, proporciona la información correspondiente para adaptar concentración magnética en el diseño del circuito de beneficio, del mineral de interés.



**Figura 35. Difractograma y gráfica comparativa de minerales existentes en el concentrado de la mesa en la fase 1 para M1-W001.**

En el difractograma anterior, se observan que las reflexiones de difracción de los minerales presentes en el concentrado de la Fase 1 de la mesa vibratoria en M1-W001, con relación a las intensidades de los picos del difractograma, junto con el gráfico que especifica las fases minerales más abundantes de las mismas, [1] el gráfico del mineral estudiado, con el cual se comparan las diferentes fases mineralógicas presentes, casiterita [2], destaca para el diseño del circuito de beneficio mineral logrando elevar las concentraciones presentes del mineral, cuarzo [3], granate almandino [4].



***Caracterización mineralógica mediante la técnica Fluorescencia de Rayos X de energía dispersa (FRX-ED).***

La excitación de la muestra ocurre cuando se expone a una fuente de energía, como los rayos X. Esta energía hace que los electrones de los átomos de la muestra se eleven a niveles de energía más altos. A medida que los electrones regresan a su estado de energía original, emiten radiación en forma de rayos X secundarios. Los resultados de la caracterización inicial, mediante la técnica Fluorescencia de Rayos X de energía dispersa (FRX-ED), de cada una de las muestras, se reflejan en la Tabla 15:

Tabla 15. Análisis de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersa para muestras provenientes del sector la Esperanza, estado Bolívar.

N.º	COMPUESTO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO <sub>2</sub> (%)	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SnO <sub>2</sub> (%)	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	WO <sub>3</sub> (%)	ZrO <sub>2</sub> (%)	TOTAL (%)	Sn (%)	Ta (%)
1	M2 P200	20,85	3,31	0,00	37,21	35,10	3,15	0,00	0,00	0,00	99,62	27,65	2,58
2	M1 P200	11,09	2,19	0,00	25,26	56,78	4,40	0,00	0,00	0,00	99,72	44,72	3,61
3	M1 WOO11 F1	0,79	0,12	0,00	2,12	91,22	4,13	0,00	0,00	0,00	98,39	71,85	3,38
4	M2 WOO2	14,31	1,73	1,02	32,16	44,71	1,77	0,39	0,00	0,00	96,08	35,21	1,45
5	M1 WOO1	10,35	1,75	0,00	30,47	53,53	3,77	0,00	0,00	0,00	99,88	42,17	3,09
6	M1 WOO13 F1	0,90	0,17	0,00	3,72	89,65	4,04	0,00	0,00	0,00	98,47	70,61	3,31
7	M1 WOO12 F2	1,54	0,54	0,00	3,82	88,56	4,09	0,00	0,00	0,00	98,54	69,76	3,35
8	M2 WOO23 F1	2,42	2,37	0,00	2,61	87,59	3,40	0,00	0,00	0,00	98,39	69,00	2,78
9	M2 WOO2X	13,54	4,39	0,00	42,00	37,54	2,22	0,00	0,00	0,00	99,68	29,57	2,64
10	M1 WOO13 F2	2,60	0,92	0,00	6,10	85,20	4,07	0,00	0,00	0,00	98,90	67,12	3,33
11	M2 WOO21 F2	13,01	16,19	0,00	7,22	60,45	2,94	0,00	0,00	0,00	99,82	47,62	2,41
12	M1 WOO1X	7,29	1,82	0,00	28,82	55,54	3,95	0,00	0,00	0,00	97,42	43,75	3,23
13	M2 WOO2 CON 3 F2	4,80	3,80	0,00	3,01	83,56	3,65	0,00	0,00	0,00	98,82	65,82	2,99
14	M1 WOO1 CON 3 F2	4,96	1,96	0,00	2,92	84,44	4,07	0,00	0,00	0,00	98,35	66,51	3,33
15	M2 WOO2 MXT F2	14,48	13,97	0,00	6,41	60,84	3,14	0,00	0,03	0,00	98,87	47,92	2,57
16	M1 WOO1 MXT F2	8,71	3,88	0,00	7,25	75,52	3,76	0,00	0,00	0,00	99,10	59,48	3,07
17	M2 WOO2 CON F1	14,04	11,84	0,00	19,44	51,13	3,09	0,00	0,00	0,00	99,54	40,28	2,53
18	M1 WOO1 CON F1	9,17	3,90	0,00	10,37	70,12	3,77	0,00	0,00	0,00	97,32	55,23	3,08
19	MIXTO F2 JIG M2 WOO2	7,26	2,07	0,05	36,40	47,29	3,58	0,00	0,00	0,00	96,66	37,25	2,93
20	MIXTO F2 JIG M2 WOO1	14,59	14,78	0,14	41,50	23,55	2,50	0,00	0,00	0,00	97,06	18,55	2,04
21	MIXTO F1 JIG M2 WOO2	1,04	0,16	0,00	3,73	89,34	4,11	0,00	0,00	0,00	98,37	70,37	3,36
22	MIXTO F1 JIG M1 WOO1	11,66	4,53	0,00	10,41	69,55	3,46	0,00	0,00	0,00	99,61	54,79	2,84
23	MIXTO MESA F1 M1 WOO1	4,39	1,14	0,14	51,28	39,03	3,08	0,00	0,00	0,00	99,05	30,74	2,52
24	MIXTO MESA F1 M2 WOO2	9,80	3,62	0,06	52,50	30,05	3,28	0,00	0,00	0,00	99,32	23,67	2,68
	MIN	0,79	0,12	0,00	2,12	23,55	1,77	0,00	0,00	0,00	96,08	18,55	1,45
	MAX	20,85	16,19	1,02	52,50	91,22	4,40	0,39	0,03	0,00	99,88	71,85	3,61
	PROMEDIO	8,48	4,21	0,06	19,45	62,93	3,48	0,02	0,00	0,00	98,62	49,57	2,88

En la tabla 15 se representan 24 muestras, que fueron analizadas por la técnica de FRX. Dichas muestras son provenientes de la concentración gravimétrica, ocurrida en la criba hidráulica JIG Marca Denver y la mesa de sacudidas tipo Wilfley. De estas 24 muestras, existe una presencia, reflejada en porcentaje (%), de SnO<sub>2</sub>, siendo este el mineral de interés denominado como casiterita. Se ubicó el valor mínimo y máximo. El valor mínimo fue de 23,55% de casiterita en la muestra M1-W001, que obedece a la segunda corrida de la mesa de sacudidas, específicamente al producto mixto. El valor máximo, 91,22% de Casiterita, en la muestra M1-W0011, producto de la primera corrida en el JIG, específicamente el concentrado en esa fase.

***Ensayos de Concentración Gravimétrica y Separación Magnética en los equipos***

***Ensayos de concentración en la Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver***

En las tablas 16 y 17 se expresan los parámetros utilizados en la concentración gravimétrica, vía JIG en sus dos corridas de material para la concentración, especificando peso, tiempo, caudal y velocidad de alimentación. En cada corrida, la muestra se dividió en 3 partes, para generar una reproducibilidad del análisis:

**Tabla 16. I corrida de concentración en la Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver**

Muestra		Tiempo	Peso (g)	Caudal (l/min)	V Alim. (g/min)	Peso (g)		
						Concentrado	Mixto	Cola
M1-W001	M1-W0011	04:48,6	650	17	160,66	19,7	14,2	573
	M1-W0012	05:01,7	610	17	160,66	11,2	6,5	586
	M1-W0013	05:25,0	600	17	160,66	29,6	5,4	563
M2-W002	M2-W0021	04:13,4	650	17	160,66	5,8	5	629
	M2-W0022	03:32,3	650	17	160,66	4,2	3,4	634
	M2-W0023	03:40,8	681	17	160,66	4,5	2,5	666

Fuente: Elaborada por los autores

**Tabla 17. II corrida de concentración en la Criba Hidráulica (JIG) Marca Denver**

Muestra	Tiempo	Peso (g)	Caudal (l/min)	V Alim. (g/min)	Peso (g)			
					Concentrado	Mixto	Cola	
M1-W001	M1-W0011	10:01,3	573	12	160,66	39,4	24,6	499
	M1-W0012	10:05,1	586	12	160,66	47,2	19,4	519
	M1-W0013	10:56,4	563	12	160,66	33,1	18,3	509
M2-W002	M2-W0021	08:26,0	629	12	160,66	17,8	21,8	589
	M2-W0022	07:06,6	634	12	160,66	15,5	21	561
	M2-W0023	07:24,1	666	12	160,66	18,1	21	623

Fuente: Elaborada por los autores

Los resultados expuestos en la tabla 16 reflejan, tanto las condiciones de operaciones, a la cual fue sometida la muestra M1-W001 en cada una de las partes en que fue dividida, como los resultados obtenidos durante la corrida I. Las condiciones de operaciones fueron: 17 l/min de caudal, fondo de granza de 75 esferas de acero, una granulometría de alimentación de (1,70 mm-1,18 mm) y un tiempo de ciclo, 5min en promedio para cada ejemplar. Durante la corrida, en la primera etapa, se realizó el desalmado de la muestra para limpiar el material de fracciones finas, que puedan existir. Esto se reprodujo tres veces. Para el tercer tratamiento, donde es procesada la muestra M1-W0013, se evidencia su tendencia a un mayor %R. Esto es debido a los factores involucrados con el operador del equipo, reducción de los errores humanos durante el análisis. Por otro lado, esta primera etapa se basó en las condiciones operativas ajustadas, planteadas en Peña (2019) (ver Tabla 10).

Para la muestra M2-W002, se repitieron los parámetros antes mencionados, así como también el número de partes en la que se dividió la muestra (3 partes). En ese sentido, la primera etapa de esta muestra, da indicios de un %R bajo. Estas muestras presentaban un alto índice de mineral ligero, como micas (muscovita). Continúa siendo una etapa de desalmado, a pesar de que visualmente la muestra presentaba muy poco rastro de mineral oscuro. La velocidad de alimentación, fue otro de los factores fijos en esta etapa, para ambas muestras.

Es importante destacar que, la expansión del lecho mineral (fondo de granza) causó que las partículas ligeras no permanecieran dentro de la cámara, al contrario que el caudal y el tiempo de ciclo, hizo que un porcentaje de partículas pesadas se alojaran en las corrientes de livianos, a pesar de que estos parámetros permitirían que el concentrado de esta etapa se obtuviera rico en partículas pesadas.

Debido a esto, se ajustan los parámetros duplicando el tiempo del ciclo y reduciendo el caudal de la cámara, como se muestra en la tabla 17, para permitirle a las partículas pesadas mayor tiempo de estratificación por el mecanismo de escurrimiento intersticial, propuesto por Bustamente et al., (2008), el cual hace referencia a que las partículas de diferente tamaño y/o densidad, no recorren distancias iguales durante un período de sedimentación determinado, ellas pueden detenerse en diferentes instantes. Por lo que la sedimentación de los finos no es tan rápida durante el escurrimiento con respecto a las otras fases del ciclo, pero si esta fase puede hacerse tan larga como sea posible, el efecto puede llegar hacer significativo durante la concentración.

Finalmente, el efecto del tiempo del ciclo y el caudal de la cámara, adquirió relevancia. Permitía clasificar el mineral pesado, prácticamente en su totalidad, ya que facultó a que las partículas de casiterita percolen entre el fondo de granza y la apertura de la malla de la criba hidráulica (JIG) Marca Denver.

### ***Ensayos de concentración en la mesa de sacudidas tipo Wilfley***

Se realizaron diferentes ensayos con los parámetros que se describen en la tabla 18, a fin de determinar el diseño más beneficioso para la planta de procesamiento de mineral de casiterita.

**Tabla 18. Concentración en mesa de sacudidas tipo Wilfley.**

Fuente: Elaborada por los autores

							Peso (g)						
Muestra	Angulo (°)	Caudal (l/min)	Tiempo	Alimentación (g)	V. Alimentación (g/min)	Concentrado 1 y 2	Concentrado 3	Concentrado 4 y 5	Cola 6	Cola 7	Concentrado Magnético	Concentrado no Magnético	
M1-W001	M1-W0011	8	15	15:30:30	0,00	278	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	M1-W0012	4	12	10:05,1	677,30	278	85,80	146,30	359,50	36,20	14,70	4,70	141,60
	M1-W0013	4	12	10:56,4	675,00	278	82,50	110,30	406,90	29,90	2,40	4,90	105,40
M2-W002	M2-W0021	4	12	08:26,0	689,00	278	31,20	108,00	293,70	205,80	2,80	3,50	104,50
	M2-W0022	4	12	07:06,6	687,80	278	47,80	146,80	318,80	140,20	10,20	4,10	142,70
	M2-W0023	4	12	07:24,1	679,90	278	41,80	90,30	179,20	271,30	18,10	5,60	84,70
M1-W001	M1-W0011	6	15	-	91,20	278	0,30	5,40	35,00	41,10	1,10	0,00	0,00
M2-W002	M2-W0022	6	15	-	145,00	278	1,90	8,70	94,10	27,10	11,30	0,00	0,00

Se procedió con la separación por gravimetría con los parámetros enunciados en Marañón (2019): Ángulo de inclinación 8° (grados), número de sacudidas por minuto 300 RPM, caudal de agua 15 l/min (ver Tabla 10). Se observó, durante los ensayos exploratorios, que las partículas pesadas fluían hacia las corrientes de las partículas livianas, debido al grado de inclinación de la mesa vibratoria Wilfley, por lo que los parámetros como velocidad de alimentación, caudal de agua y sacudidas por minuto, permanecieron fijas, y se modificó el grado de inclinación a 4°, en la primera etapa de concentración de la muestra M1-W001 y M2-W002, como se refleja en la tabla 18 (corrida 1). Con esta modificación, se obtuvieron resultados con los parámetros de trabajo, es decir, con los parámetros operativos ajustadas para una separación gravimétrica apropiada. Resaltan las diferencias de la distribución correcta, coloración de material mixto, el cual debe tener mayor contenido de tonalidades blancas que negras, a diferencia de la coloración del material pesado, que debe tener una tonalidad predominante negra, característica del material de interés a concentrar. Durante la concentración, se puede observar como la muestra se separa en sus tres colores predominantes: negro, rojo pardo y blanco. Pero, además, se visualiza cómo se logran separar los tres minerales. Sin embargo, en el concentrado de las muestras partículas livianas no alcanzaron a separarse correctamente, resultando un concentrado con una coloración blanca.

En la Figura 36 se muestra cómo se separan los minerales en el lecho de la mesa vibratoria Wilfley. También se puede observar, en la figura 37, cómo resultó el concentrado de esta etapa, para ambas muestras.



Figura 36. Separación gravimétrica en la mesa vibratoria Wilfley, Fase I, 4 grados de inclinación.



Figura 37. Concentrado secado M1-W001 y M2-W002, de la mesa vibratoria Wilfley, Fase I. Tomando en cuenta todas las consideraciones anteriores, se realizó una segunda corrida, para conocer la tendencia de las partículas pesadas en el lecho fluidizado de la mesa, si se aproxima al estudio exploratorio de 8 grados de inclinación o si, por el contrario, marca



su tendencia a los resultados de la corrida I. Para ello se modificó el grado de inclinación a 6 grados, como se muestra en la tabla 18. En este estudio, se observó como cambiando el grado de inclinación mejoró, considerablemente, la separación de las fracciones livianas y pesadas (ver figura 38).



**Figura 38. Separación gravimétrica en la mesa vibratoria Wilfley, Fase II, 6 grados de inclinación**

Finalmente, se obtuvo un producto pesado con una coloración negra predominante, fracciones livianas bastante limpias y con muy poco rastro de coloración oscura. Un mixto de coloración heterogéneo, pero en su mayoría se consolida la coloración negra, de la misma manera que luce el concentrado de fase I, luce el producto mixto de la fase II, como se puede ver en la figura 39.



**Figura 39. Productos: Concentrado, Mixto y Colas de M1-W001 y M2-W002 en la mesa vibratoria Wilfley, Fase II, 6 grados de inclinación**

### ***Ensayo de Separación Magnética***

El producto de la primera corrida en la mesa de sacudidas, fue sometido al proceso de separación magnética con un imán de alta intensidad, separando así los minerales asociados al magnetismo, como lo fue el granate almandino. Dichos valores se encuentran reflejados en la tabla 18:

### ***Índices metalúrgicos***

Los Índices metalúrgicos permiten calcular el porcentaje de recuperación, la razón de enriquecimiento y **la razón de concentración** del mineral, en el proceso de concentración gravimétrica.

En la tabla 19 se muestran los valores de peso, medidos en gramos (g), y los porcentajes (%) de tenor para las siguientes variables operativas: 1) Alimentación, 2) Concentrado y 3) Colas. Además, en la tabla 20 se muestran los resultados de los cálculos derivados de las ecuaciones (3, 4 y 6), que se encuentran en el marco teórico de este trabajo de investigación. Estas ecuaciones proporcionan los siguientes resultados: Porcentaje de recuperación (%R), razón de enriquecimiento (Re) y razón de concentración (RC), obtenidos a través de la concentración gravimétrica en la criba hidráulica (JIG), marca Denver y en la mesa tipo Wilfley (ver tabla 20).

**Tabla 19. Masa y Tenor en concentración gravimétrica en la criba hidráulica (JIG) Marca Denver y en la mesa de sacudidas tipo Wilfley**

Equipo	Muestra	Alimentación		Concentrado		Colas	
		(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
<b>JIG I</b>	<i>M1-W0011</i>	650	53,53	19,7	91,22	55,86	573
	<i>M1-W0012</i>	610	53,53	11,20	89,65	53,24	586
	<i>M1-W0013</i>	600	53,53	29,6	89,65	51,67	563
	<i>M2-W0021</i>	650	44,71	5,8	87,59	44,75	629
	<i>M2-W0022</i>	650	44,71	4,20	87,59	44,82	634
	<i>M2-W0023</i>	681	44,71	4,5	87,59	44,82	666
<b>JIG II</b>	<i>M1-W0011</i>	573	55,86	39,4	88,56	52,66	499
	<i>M1-W0012</i>	586,00	53,24	47,20	88,56	52,66	519
	<i>M1-W0013</i>	563,00	51,67	33,1	85,20	52,66	509
	<i>M2-W0021</i>	629,00	44,75	17,8	60,45	45,23	589
	<i>M2-W0022</i>	634,00	44,82	15,50	60,45	45,23	561
	<i>M2-W0023</i>	666,00	44,82	18,1	60,45	45,23	623
<b>MESA VIBRATORIA I</b>	<i>M1-W0012</i>	677,30	55,54	85,80	70,12	62,93	50,90
	<i>M1-W0013</i>	675,00	55,54	82,50	70,12	62,93	32,30
	<i>M2-W0021</i>	689,00	37,54	31,20	51,13	58,48	208,60
	<i>M2-W0022</i>	687,80	37,54	47,80	51,13	62,4	150,40
	<i>M2-W0023</i>	679,90	37,54	41,80	51,13	52,83	289,40
<b>MESA VIBRATORIA II</b>	<i>M1-W0011</i>	91,20	70,12	5,40	84,44	56,40	38,40
	<i>M2-W0021</i>	145,00	51,13	8,70	83,56	48,76	42,20

Fuente: Elaborada por los autores

**Tabla 20. Porcentaje de Recuperación, Razón de enriquecimiento y Razón de concentración en la concentración gravimétrica en la criba hidráulica (JIG) Marca Denver y en la mesa de sacudidas tipo Wilfley**

Equipo	Muestra	Índices Metalúrgicos			Promedio		
		%R	Re	RC	%R	Re	RC
<b>JIG I</b>	<i>M1-W0011</i>	5,16	1,70	32,99	5,50	1,68	35,91
	<i>M1-W0012</i>	3,07	1,67	54,46			
	<i>M1-W0013</i>	8,26	1,67	20,27			
	<i>M2-W0021</i>	1,75	1,96	112,07			
	<i>M2-W0022</i>	1,27	1,96	154,76			
	<i>M2-W0023</i>	1,29	1,96	151,33			

Equipo	Muestra	Índices Metalúrgicos			Promedio		
		%R	Re	RC	%R	Re	RC
JIG II	M1-W0011	10,90	1,59	14,54	11,33	1,63	14,66
	M1-W0012	13,40	1,66	12,42			
	M1-W0013	9,69	1,65	17,01			
	M2-W0021	3,82	1,35	35,34			
	M2-W0022	3,30	1,35	40,90			
	M2-W0023	3,67	1,35	36,80			
MESA VIBRATORIA I	M1-W0012	15,99	1,26	7,89	15,71	1,26	8,04
	M1-W0013	15,43	1,26	8,18			
	M2-W0021	6,17	1,36	22,08			
	M2-W0022	9,47	1,36	14,39			
	M2-W0023	8,37	1,36	16,27			
MESA VIBRATORIA II	M1-W0011	7,13	1,20	16,89	8,47	1,42	16,78
	M2-W0021	9,81	1,63	16,67			

Fuente: Elaborada por los autores

Se realizó el cálculo del promedio de los índices metalúrgicos para cada equipo, utilizado en sus dos fases, considerando los parámetros operativos seleccionados. Esto permitió contrastar las diferencias de concentración entre las fases y los equipos. Los parámetros que variaron entre cada fase de los equipos fueron: para la criba hidráulica (JIG) el tiempo del ciclo y el caudal de agua; para la mesa de sacudidas fue el ángulo de inclinación de la mesa y el caudal de agua (ver tabla 21).

**Tabla 21. Parámetros de los equipos de concentración gravimétrica que variaron entre cada fase.**

Equipos	Fase	Parámetros		
		Caudal de agua (l/min)	Tiempo promedio del ciclo (‘ ’’ °)	Ángulo de inclinación (°)
Criba Hidráulica (JIG)	I	17	04:26:90	-
	II	12	08:59:90	-
Mesa de sacudidas tipo Wilfley	I	12	-	4
	II	15	-	6

Fuente: Elaborada por los autores

Teniendo en cuenta la diferencia entre fases de los parámetros seleccionados, se puede decir que el porcentaje de recuperación (%R) en la I fase de la criba hidráulica (JIG) fue de 5,50%, a diferencia de la segunda fase, donde porcentaje de recuperación fue de 11,33%, es decir, aumentó la recuperación en un 48,54% con respecto a la primera fase del JIG. En la mesa de sacudidas el porcentaje de recuperación, en su primera fase fue de 15,71% y en su segunda fase fue de 8,47%, reflejando una disminución en la recuperación de un 53,91%, concluyendo que existe un mayor porcentaje de recuperación, utilizando la mesa de sacudidas.

La razón de enriquecimiento (Re), indica cuántas veces se ha aumentado la concentración del mineral de interés, a través del proceso de concentración, siendo este índice no muy diferenciable entre fases y equipos utilizados, variando entre las mismas 0,05 entre fase I y fase II del JIG, y 0,16 entre las dos (02) fases de la mesa, reflejando una diferencia entre equipos de la razón de enriquecimiento de 0,26.

Con relación a la razón de concentración (RC), en el uso de JIG, se necesita procesar 35.91 y 14.66 toneladas de material para obtener 1 tonelada de concentrado de casiterita. Por otro lado, para la mesa de sacudidas se requieren 8.04 y 16.78 toneladas para producir también 1 tonelada de concentrado de casiterita. Esto significa que, al utilizar la mesa con un ángulo de 4°, se necesita un 446.65% menos cantidad de material para el proceso, en comparación con el uso del JIG en su primera fase.

### ***Discusión de los resultados***

Los ensayos experimentales de laboratorio se dividieron y desarrollaron en cuatro fases: caracterización geometalúrgica (fase 1), caracterización química (fase 2), ensayos de concentración gravimétrica y separación magnética (fase 3), y por ultima, la formulación de la propuesta conceptual de la planta de mineral de casiterita con su respectivo soporte económico (fase 4).

Ante la situación planteada, se inició con la caracterización geometalúrgica de las muestras estudiadas, como se enuncia en la pág. 57-59, lo que permitió identificar que la presencia de la mica, en las etapas de trituración y molienda, generan muchos finos para alcanzar los cortes de granulometría requerido por los equipos de concentración - aproximadamente 35-40% de la muestra inicial, posterior a la trituración secundaria-, lo que nos llevó a realizar, en la etapa de los ensayos de concentración gravimétrica a considerar,

un deslamado del material para enriquecer los concentrados y tener mejores índices metalúrgicos, como se muestra en la Tabla 20. Esta etapa también comprendió la estimación del grado de liberación por Microscopía Óptica, a pesar de que estas fotografías se lograron en la 3 fase, una vez obtenido los concentrados de cada equipo de concentración gravimétrica, se pudo observar, en las figuras 16,17, 18, 19, 20, 21 y 22, que el mineral de casiterita para el tamiz N.º 12-16, en su mayoría (85%) esta liberado, a excepción de cristales de casiterita que se visualizan con micas y cuarzo adheridos a su matriz, e incluso se llegan a observar cristales de casiteritas arropados por cuarzo y mica. Y, por el contrario, para el corte comprendido entre los tamices N.º 30-200, los cristales de casiterita se encuentran completamente liberados. Permitiendo, de esta manera, demostrar que el grado de liberación de la muestra se encuentra por debajo del tamiz N.º 12 en un 85% y, por debajo del tamiz N.º 30 en un 100%. Esto facilitó reforzar el criterio de selección de los cortes utilizados en cada equipo de concentración gravimétrica y separación magnética. Es importante resaltar que, a pesar de la distinción entre cada fase enunciada, todas se relacionan entre sí, los estudios realizados en las fases finales pudieron complementar las fases iniciales y viceversa.

De igual manera, la fase 2 comprendió la caracterización química, la cual consistió en realizar ensayos de difracción de rayos x y fluorescencia de rayos x de energía dispersa, como se enuncia en la pág. 60. Así mismo, las figuras 23 a la 35, permitió distinguir los distintos minerales existentes en las muestras estudiadas: casiterita, cuarzo, granate almandino y muscovita en su mayoría. Esta fase tuvo su curso desde que se inició con la caracterización geometalúrgica de M1-W001 y M2-W002, analizando las muestras cabezas iniciales. Una vez obtenidos los productos de la fase 1, fase 2 de la criba hidráulica (JIG) y de la fase 1, fase 2 de la mesa de sacudidas, como se muestra en la tabla 19, se fue realizando este análisis, para tener el control y seguimiento de los minerales que se estaban obteniendo en cada producto de concentración gravimétrica, identificando las facies mineralógicas y así usar estos resultados preliminares de cada etapa de concentración, como criterio de mejora de los parámetros en la propuesta conceptual de la planta de casiterita. Esto completó el ensayo de fluorescencia de rayos x de energía dispersa, que sirvió para determinar la ausencia de minerales como ilmenita y coltán, favoreciendo la hipótesis sobre la presencia de mineral de casiterita ( $\text{SnO}_2$ ), conociendo su tenor medido en porcentaje (%), lo que permitió realizar un balance de masa en metálico, definir los índices metalúrgicos como se anuncia en la pág.

101-102 y la tabla 20, y adicionalmente, esta técnica fungió como uno de los indicadores determinantes para identificar si estaba siendo eficiente al momento de concentrar un equipo de concentración gravimétrica. En la tabla 20 se puede observar que, el porcentaje de recuperación en el JIG II para la muestra M1-W0012 es el mejor con un valor de 13,40 %, con un Re de 1,66, indicando que aumento 0,66 veces la concentración del mineral de interés, a través del proceso de concentración. Para la mesa de sacudidas y estos dos valores, se observan que el mejor valor para el porcentaje de recuperación que se obtuvo fue de 15,99%, pero con un Re un poco bajo, respecto a la fase del JIG. Finalmente, esta fase de caracterización química, muy relacionada con los resultados arrojados en la fase 3, que será desarrollada a continuación, se puede decir que permitió establecer el número de equipos necesarios para el diseño del circuito de la planta de casiterita. Fortaleciendo y dando inicio a la descripción de las variables para el análisis económico, de modo que, conociendo la cantidad de casiterita (%SnO<sub>2</sub>) en los concentrados obtenidos, mediante estos análisis llevados a cabo en la fase 2, introduce este valor como medida comparativa en los mercados internacionales de casiterita y metal de estaño, bajo las consideraciones requeridas, para crear así la rentabilidad de este proyecto.

En referencia a la fase 3, durante los ensayos de concentración gravimétrica como es enunciado en la tabla 21 y se menciona en la pág. 104-105, permite establecer que la criba hidráulica JIG logra concentrar la casiterita en un tamaño de grano medio, funcionando como un proceso de deslamado para las etapas siguientes como lo es la mesa de sacudidas, destinando productos como sus colas al equipo previamente mencionado. También, un punto de inflexión fue el tiempo del ciclo en la criba hidráulica que siguiendo lo enunciado en Bustamante et al., (2008) el mecanismo de escurrimiento intersticial, lograría que la etapa de concentración en el JIG se incremente considerablemente para obtener concentrados más enriquecidos con el mineral de interés (casiterita). En la figura 38, se puede observar como la fracción pesada fluye hacia la zona de los concentrados en la mesa de sacudidas, predominando la coloración negra. Lo que nos lleva a identificar el grado de inclinación con mayor %R. Es importante tener en cuenta que esta etapa no tuvo una cantidad de material considerable para generar una matriz de reproducibilidad de ensayos. Así mismo, estos son estudios exploratorios ya que los ensayos realizados en el laboratorio previamente por Peña (2019), fue una mezcla sintética de casiterita con otro material, el mineral al cual fueron

sometidas todos los parámetros que el autor enuncia en su trabajo. Siendo de este modo el punto de partida, con los mejores datos obtenidos por Peña (2019), la forma como se realizó esta tercera fase. Para el caso de la mesa de sacudidas, también comprendió ensayos exploratorios a partir de los mejores datos obtenidos en Maraón (2019), en donde la segunda corrida del equipo resultó más eficiente, por los índices metalúrgicos obtenidos (ver tabla 20). Y de forma comparativa visualmente, la figura 36 vs la figura 38, observándose la separación de las facies mineralógicas en la superficie de la mesa. En la figura 37 vs figura 39, el resultado de los concentrados de cada corrida.

Finalmente, esta fase facilitó la selección de los equipos para la propuesta conceptual de la planta de casiterita proveniente del sector la Esperanza, Edo. Bolívar. Cabe agregar que se identificó la necesidad de desarrollar ingeniería conceptual sobre el control de calidad de agua de los vertidos de la planta, por la presencia abundante de muscovita en los relaves de cada equipo de concentración gravimétrica. De igual manera, la necesidad de diseñar una matriz, para la mesa de sacudidas, donde se evalúe con mayor profundidad la densidad de pulpa, entrada de agua de lavado e inclinación de la mesa de sacudidas, y para el JIG, fondo de granza (número de esferas) por medio de un diseño factorial de superficie de respuesta que permita darle continuidad a la línea de investigación de estos ensayos exploratorios. Resaltando que durante esta investigación se demostró que el material es susceptible a concentración gravimétrica, para el corte de tamiz N.º 12-16 en el JIG y corte tamiz N.º 30-200 en la mesa de sacudidas.



## **CAPITULO V**

### **PROPUESTA**

#### **5.1 Diseño conceptual**

La propuesta conceptual se desarrolló utilizando el *software MODULAR SIMULATOR for MINERAL PROCESSING PLANTS MODSIM<sup>™</sup>* versión *Student 3.6.*, tal como se muestra en la figura 40. Estos datos fueron obtenidos a partir de la fase experimental. Es importante destacar que, para lograr una mejor recuperación en la concentración gravimétrica, es fundamental tener en cuenta la liberación de partículas y establecer los parámetros óptimos que se ajusten a la geología de la localidad. En consecuencia, la selección de los equipos utilizados en este diseño se basa en los resultados obtenidos durante la experimentación, llevada a cabo en el marco de este trabajo de grado.

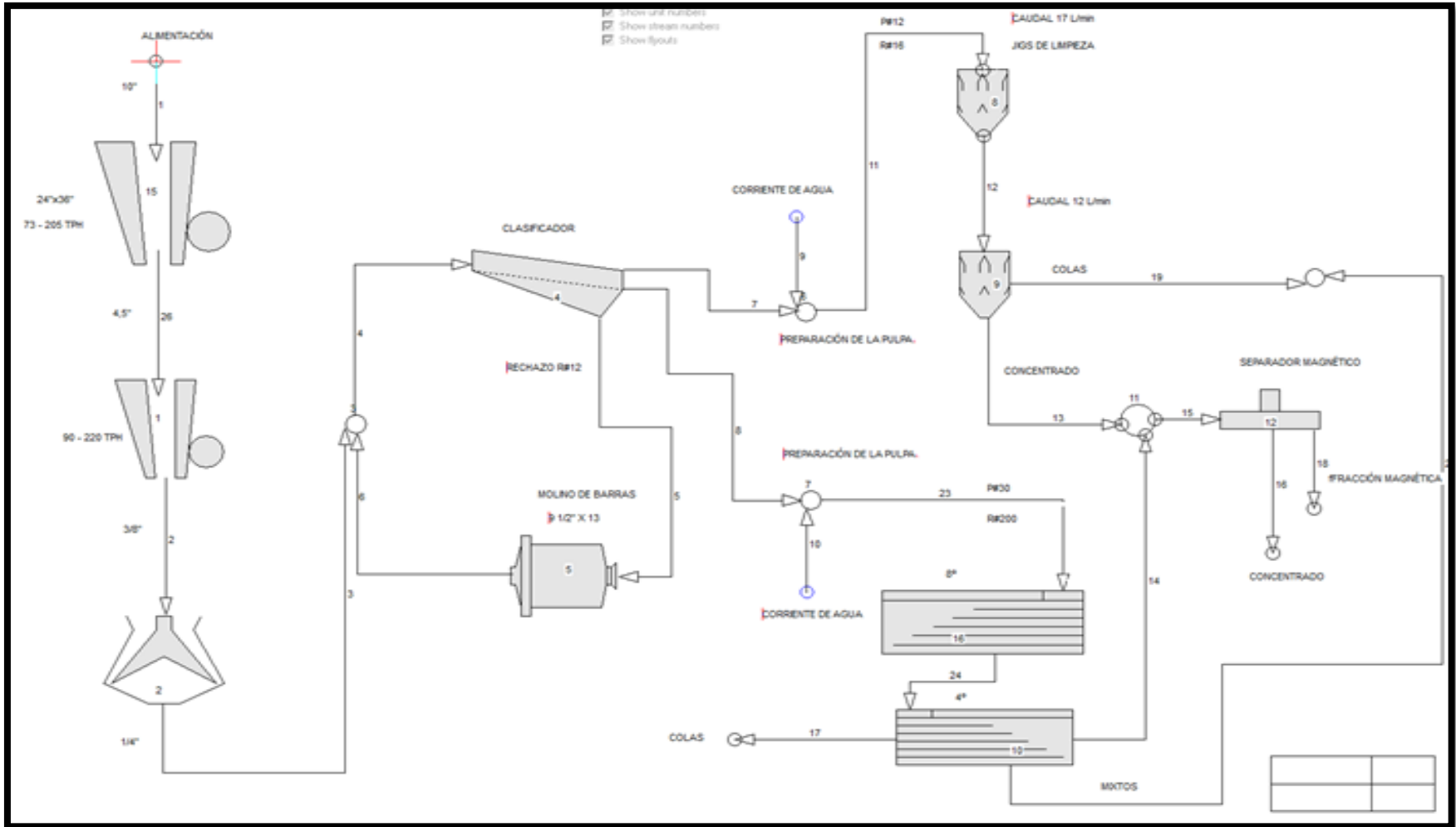


Figura 40. Diseño conceptual para concentrar mineral de Casiterita mediante el Software MODULAR SIMULATOR for MINERAL PROCESSING PLANTS MODSIMtm versión Student 3.6.

## 5.2 Análisis de factibilidad económica

### *Plan de inversión*

A continuación, se presenta el plan de inversión para la planta de beneficio de casiterita (ver tabla 22). Se prevé que el total de la maquinaria sea adquirida a contado. La columna de aporte propio describe el monto en dólares americanos (USD), requerido para la compra de los equipos, el mobiliario, los gastos de organización y capital de trabajo. La sumatoria de aporte propio, más el crédito solicitado, se muestra en la columna Inversión Total.

**Tabla 22. Plan de Inversión.**

<b>Concepto</b>	<b>Aporte propio</b>	<b>Crédito solicitado</b>	<b>Inversión Total</b>	<b>Vida útil</b>
Maquinarias	435.245		435.245	12
Equipos	91.564	-	91.564	5
Mobiliario	1.540	-	1.540	7
Gastos de organización	19.622	-	19.622	3
Capital de trabajo	389.666	-e	389.666	-
<b>Total</b>	<b>937.637</b>	<b>-</b>	<b>937.637</b>	
<b>Participación</b>	<b>100%</b>	<b>0%</b>	<b>100%</b>	

Fuente: Elaboración propia.

### *Bases de Cálculo e Informaciones Generales.*

#### *Maquinaria.*

**Tabla 23. Maquinarias y unidades.**

<b>Maquinaria</b>	<b>Unidades</b>
Trituradora de Mandíbula	2
Trituradora de Cono	1
Criba Vibratoria de dos paños	1
Criba Hidráulica (JIG)	8
Mesa Vibratoria	12
Cinta Transportadora	8
Separador Magnético (con campo magnético variable)	1

Fuente: Elaboración propia.

**Equipos.****Tabla 24. Equipos y unidades.**

<b>Equipos</b>	<b>Unidades</b>
Impresora HP	5
Computadora Intel i7	5
Refrigerador (300 l)	2
Planta Eléctrica 125 KVA	1
Planta Eléctrica 625 KVA	1
Planta Eléctrica 750 KVA	1

Fuente: Elaboración propia.

**Mobiliario****Tabla 25. Mobiliario y unidades.**

<b>Mobiliario</b>	<b>Unidades</b>
Escritorio 1m x 2m	5
Mesas altas 1m x 1m	4
Sillas de oficinas	10
Sillas para mesas altas	10
Sofá largo	1
Sofá individual	1
Archivo	1

Fuente: Elaboración propia.

**Gastos de Organización:** Los gastos de organización consideran instalación de la maquinaria, solicitud de licencias, registro de la empresa, comisiones y depósito de garantía para el alquiler.

**Capital de Trabajo:** El capital de trabajo considerará algunos meses, hasta que el proyecto comience a generar ingresos por ventas, el cual estará estructurado de la siguiente manera: seis (6) meses para compra de combustible, grasa y aceite, seis (6) meses de pago de sueldos.

**Nota 1:** Todos los costos fueron considerados en dólares americanos (USD).

**Nota 2:** Todo el plan de inversión es financiado con aporte propio.

**Nota 3:** Las especificaciones de la maquinaria, equipos y mobiliario utilizado, fueron seleccionadas en función de las necesidades de producción requeridas (**960 t de SnO<sub>2</sub> / mes**), y como parte del ejercicio académico desarrollado en este trabajo de investigación. Es de gran importancia mencionar, que dichas especificaciones van a **vari**ar dependiendo sea el caso y las necesidades de cada proyecto relacionado con la producción de mineral de casiterita (**SnO<sub>2</sub>**.)

#### *Depreciación de maquinaria y equipos.*

Con el plan de inversión ya especificado, se procede a calcular la depreciación para los activos fijos, que en este caso abarcan la maquinaria, los equipos y el mobiliario.

Todos estos datos se muestran en las siguientes tablas:

**Tabla 26. Depreciación Anual Activos Fijos.**

	<b>Costo en dólares (\$)</b>	<b>Vida útil probable</b>	<b>Valor de rescate</b>	<b>Depreciación Anual</b>
<b>Capital fijo</b>	528.349			39.842,4
Maquinarias	435.245	12	10%	32.643
Equipos	91.564	5	10%	6.979
Mobiliario	1.540	7	0%	220

Fuente: Elaborada por los autores

**Tabla 27. Capital de Trabajo.**

<b>Concepto</b>	<b>Monto Dólares (\$)</b>	<b>Tiempo (meses)</b>
-----------------	---------------------------	-----------------------

Inventario de materias primas	362.760	6
Sueldos y salarios	26.906	6
Edificios y construcciones (Galpón)	285.000	0
Gastos en estudios y Proyectos	635.000	6
<b>Total, capital de trabajo</b>	<b>1.309.666</b>	<b>6</b>

Fuente: Elaborada por los autores

### *Ocupación de la Empresa.*

En el siguiente apartado, se muestra el gasto en sueldos y salarios, tanto en mano de obra directa como indirecta, del establecimiento. La mano de obra directa estará compuesta por diez (15) empleados, conformados por un gerente de planta, un supervisor de operaciones de planta, dos operadores de trituradora de mandíbula, un operador de cono, dos operadores de JIGS, dos operadores de mesa vibratoria, un operador de espiral, un operador de molino, un administrador, 3 encargados de mantenimiento y limpieza general. La mano de obra indirecta se divide en tres (3) trabajadores donde se incluyen un asesor minero, un asesor ambiental y un asesor geológico con conocimientos de topografía. La planta funcionará con un total de trece (18) empleados.

**Tabla 28. Mano de obra directa.**

Mano de obra directa Cargos	N.º de Empleados	Año 2024	Año 2025	Año 2026
<i>Gerente de planta</i>	1	9.744	\$9.744	\$9.744
<i>Supervisor de operaciones de planta</i>	1	\$4.732,80	\$4.732,80	\$4.732,80
<i>Operador de trituradora de mandíbula</i>	2	\$5.568	\$5.568	\$5.568
<i>Operador de Cono</i>	1	\$2.784	\$2.784	\$2.784
<i>Operador de JIGS</i>	2	\$5.568	\$5.568	\$5.568
<i>Operador de Mesa Vibratoria</i>	2	\$2.784	\$2.784	\$2.784
<i>Operador de Espiral</i>	1	\$2.784	\$2.784	\$2.784
<i>Operador de Molino</i>	1	\$2.784	\$2.784	\$2.784
<i>Mantenimiento y Limpieza General</i>	3	\$4.176	\$4.176	\$4.176
<i>Administrador</i>	1	\$5.568	\$5.568	\$5.568
<b>Total, de mano de obra</b>	<b>15</b>	<b>\$46.492,80</b>	<b>\$46.492,80</b>	<b>\$46.492,80</b>

Fuente: Elaborada por los autores

Tabla 29. Mano de obra indirecta.

Cargos	N.º Empleados	Año		
		2024	2025	2026
<i>Asesor minero</i>	1	18.000	18.000	18.000
<i>Asesor ambiental</i>	1	18.000	18.000	18.000
<i>Asesor geológico</i>	1	18.000	18.000	18.000
<b>Total, Mano de Obra Indirecta</b>	3	<b>54.000</b>	<b>54.000</b>	<b>54.000</b>

Fuente: Elaborada por los autores

**Bases de Cálculo:** Ley Orgánica del Trabajo, los Trabajadores y las Trabajadoras (**LOTTT**), Ley Del Seguro Social (**LSS**), Ley de Régimen Prestacional de Vivienda y Hábitat (**LPH**), y sus respectivos reglamentos.

- **Seguro Social Obligatorio:** Sueldo básico x 12 meses entre 52 semanas, el resultado se multiplica por el 4% de retención SSO y luego se multiplica por los lunes que tenga el mes, que pueden ser 4 o 5.
- **PF:** Manutención mensual hasta por cinco meses, equivalente al 60% del monto resultante de promediar el salario mensual durante los últimos doce meses de trabajo anteriores a la cesantía.
- **Bono vacacional:** Cuando el trabajador cumpla un año de trabajo ininterrumpido para un patrono, disfrutará de un período de vacaciones remuneradas de quince días hábiles. El cual será equivalente a un mínimo de 15 días de salario, más un día por cada año que haya prestado el servicio.
- El patrono depositará, a cada trabajador, por concepto de **prestaciones sociales** el equivalente a quince (15) días, cada trimestre, calculado con el último salario devengado.
- **Utilidades:** Se dividen todos los beneficios repartibles del año entre los salarios de todos los trabajadores. El pago corresponderá a 30 días de salario.
- **LPH:** El artículo 19 de la Ley establece que el aporte de los empleados y obreros será del uno por ciento (1%) del sueldo mensual básico.
- Se contempla, además, dar bonificaciones por concepto de desempeño mensual a los trabajadores.

### Presupuesto de ingresos.

El presupuesto de ingresos fue calculado con base al % de recuperación, asumiendo que la planta procesará 815.76 t de roca/mes para producir 80 t de casiterita. El % de recuperación que se consideró fue de 9,81. Contemplando la capacidad de planta instalada.

**Tabla 30. Presupuesto de ventas por tonelada.**

Descripción	Precio (\$/t)	%	Cantidad de mineral de casiterita		
			2024/t	2025/t	2026/t
<i>Mix de ventas</i>					
Concentrado %SnO <sub>2</sub> = 91.20%; Granulometría: 1.70 mm -1.18 mm	10.852	15,20	145,92	145,92	145,92
Concentrado %SnO <sub>2</sub> = 88.56%; Granulometría: 1.70 mm -1.18 mm	10.852	24,80	238,08	238,08	238,08
Concentrado %SnO <sub>2</sub> = 70.10%; Granulometría: 0.600 mm -0.075 mm	10.852	24	230,40	230,40	230,40
Concentrado %SnO <sub>2</sub> = 84.44%; Granulometría: 0.600 mm -0.075 mm	10.852	36	345,60	345,60	345,60
		<b>100%</b>	<b>960</b>	<b>960</b>	<b>960</b>

Fuente: Elaborada por los autores

El volumen de ventas estimado, para los próximos tres (3) años, es de 960 toneladas anuales, incluyendo todas las presentaciones y productos obtenidos en la planta.

**Tabla 31. Presupuesto de Ingreso.**

Descripción	Precio (\$/t)	%	Ingreso en dólares		
			2024	2025	2026
<i>Mix de ventas</i>					
Concentrado %SnO <sub>2</sub> = 91.20%; Granulometría: 1.70 mm -1.18 mm	10.852	15,20	1.583.524	1.583.524	1.583.524
Concentrado %SnO <sub>2</sub> = 88.56%; Granulometría: 1.70 mm -1.18 mm	10.852	24,80	2.583.644	2.583.644	2.583.644
Concentrado %SnO <sub>2</sub> = 70.10%; Granulometría: 0.600 mm -0.075 mm	10.852	24	2.500.301	2.500.301	2.500.301
Concentrado %SnO <sub>2</sub> = 84.44%; Granulometría: 0.600 mm -0.075 mm	10.852	36	3.750.451	3.750.451	3.750.451
		<b>100</b>	<b>10.417.920</b>	<b>10.417.920</b>	<b>10.417.920</b>

Fuente: Elaborada por los autores



**Bases de cálculo:**

- Los precios establecidos en el Mix de venta son de 10.852 USD para el mineral de casiterita, con unas características pre establecidas por el mercado internacional.
- Se prevé que no varíe el aforo del establecimiento, durante los próximos 3 años.

En su totalidad, la proyección de ingresos de la *planta de beneficio*, en los tres (3) años siguientes, es de **10.417.920** USD americanos anuales.

Tabla 32. Estructura de costos

<b>1. Costos de producción</b>
<b>1.1 Costo de Adquisición de materiales, insumos y servicios</b>
1.1.1 Royalty por Explotación
1.1.2 Combustibles y Lubricantes
1.1.53 Otros insumos
<b>1.2 Costo de Transformación</b>
1.2.1 Mano de obra directa
1.2.2 Depreciación de equipos
<b>1.3 Costo Administrativos</b>
1.3.1 Costos de mano de obra y equipos indirectos
1.3.2 Costos ambientales
1.3.3 Honorarios profesionales
1.3.4 Tributos mineros
1.3.5 Tasas, contribuciones y otros
<b>2. Gastos Administrativos</b>
2.1 Sueldos y salarios administrativos
2.2 Honorarios Profesionales
2.3 Cargas sociales
2.4 Gastos generales por servicios
2.5 Servicios básicos
2.6 Materiales y suministros de oficina

Fuente: Elaborada por los autores

### **Estados Financieros**

En este apartado se muestran los estados financieros proyectados de los primeros tres años de funcionamiento de la planta. Así como el estado de ganancias y pérdidas, junto al balance general de la empresa (ver tabla 29).

Tabla 33. Estado de Ganancias y Pérdidas proyectado.

<b>Concepto</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>
<i>Ingresos brutos</i>	10.417.920	10.417.920	10.417.920
<i>Ventas netas</i>	10.417.920	10.417.920	10.417.920
<i>Egresos</i>			
<i>Costo primo</i>	772.013	772.013	772.013
<i>Gastos de fabricación</i>	76.082	76.082	76.082
<i>Gastos de administración y ventas</i>	1.567.380	1.567.380	1.567.380
<i>Costo total</i>	2.415.475	2.415.475	2.415.475
<i>Utilidad antes de ISLR</i>	8.002.445	8.002.445	8.002.445
<i>Impuesto sobre la renta*</i>	2.720.703,28	2.720.703	2.720.703
<b>Utilidad neta</b>	<b>5.281.742</b>	<b>5.281.742</b>	<b>5.281.742</b>

Fuente: Elaborada por los autores

**NOTA:** Ya que todo el proyecto ha sido calculado en USD americanos, la utilidad antes del ISLR está expresada en esa misma unidad monetaria, por lo que, para facilitar el cálculo del Impuesto, se hace la conversión de dólares americanos a bolívares, a la tasa oficial del BCV, para la presente fecha (04 de noviembre del 2023), la cual es Bs. 35.17/\$. Se calcula el Impuesto en bolívares y, nuevamente, se hace la conversión a dólares americanos (ver tabla 30).

**Tabla 34. Valor de la unidad tributaria.**

<b>SENIAT 08/05/2023</b>		
<i>Valor de la Unidad Tributaria (UT)</i>		
UT (Bs)	USD BCV 04/11/2023	UT (USD)
9.00	35.17	0.26

Fuente: Elaborada por los autores

***Flujo de caja y capacidad de pago de la Empresa.***

A continuación, se presentan las entradas y salidas de dinero, para cada año del período de evaluación del proyecto.

**Tabla 35. Flujo de caja proyectado de la empresa.**

<b>CONCEPTO FUENTES</b>	<b>AÑO 0 (\$)</b>	<b>AÑO 1 (\$)</b>	<b>AÑO 2 (\$)</b>	<b>AÑO 3 (\$)</b>
<i>Efectivo inicial</i>	-	-	5.321,584	10.643.168
<i>Utilidad neta</i>	-	5.281.742	5.281.742	5.281.742
<i>Depreciación y amortización</i>	-	39.842,40	39.842,40	39.842,40
<i>Impuesto por pagar</i>	-	4.283.391,28	4.283.391	4.283.391
<i>Intereses por pagar</i>	-	-	-	-
<i>Venta de activos</i>	-			
<i>Aporte propio</i>	1.835.015	-	-	-
<i>Créditos recibidos</i>	-	-	-	-
<b><i>Total, fuentes</i></b>	<b>1.835.015</b>	<b>9.604.975</b>	<b>14.926.559</b>	<b>20.248.143</b>
<i>Maquinaria, equipo y mobiliario</i>	528.349			
<i>Capital de trabajo</i>	1.309.666			
<i>Pago de impuestos</i>		4.283.391	4.283.391,28	4.283.391
<i>Amortización de capital(deuda)</i>		-	-	-
<i>Pago de intereses diferidos</i>		-	-	-
<i>Estudios previos</i>	19.622			
<i>Dividendos</i>				
<b><i>Total, usos</i></b>	<b>1.835.015</b>	<b>4.283.391</b>	<b>4.283.391</b>	<b>4.283.391</b>

CONCEPTO FUENTES	AÑO 0 (\$)	AÑO 1 (\$)	AÑO 2 (\$)	AÑO 3 (\$)
<b>SALDO DE EFECTIVO</b>	-	<b>5.321.584</b>	<b>10.643.168</b>	<b>15.964.752</b>

Fuente: Elaborada por los autores

**\*Las cantidades fueron colocadas con cifras significativas.**

En el análisis del proyecto, resulta evidente que la empresa podría lograr mantener un saldo de efectivo positivo a lo largo del tiempo de evaluación. La habilidad para generar recursos internamente, sin depender de deudas externas, es un indicio claro de una buena gestión financiera.

### ***Indicadores de evaluación.***

Para determinar la viabilidad del proyecto se recurre a distintos indicadores financieros, tales como, el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR):

*“El valor actual neto es el método más conocido, mejor y generalmente más aceptado por los evaluadores de proyectos. Mide el excedente resultante después de obtener la rentabilidad deseada o exigida y después de recuperar toda la inversión. Para ello, calcula el valor actual de todos los flujos futuros de caja, proyectados a partir del primer periodo de operación, y le resta la inversión total expresada en el momento 0.” (SAPAC, 2011).*

**Tabla 36. Flujo de efectivo para el cálculo de los indicadores de evaluación.**

Concepto	Año 0 (\$)	Año 1 (\$)	Año 2 (\$)	Año 3 (\$)
<i>Utilidad neta</i>	-	5.281.742	5.281.742	5.281.742
<i>Depreciación y amortización</i>	-	39.842	39.842	39.842
<i>Compra de activos</i>	-	-	-	-
<i>Inversión</i>	<b>1.835.015</b>	-	-	-
<i>Venta de activos</i>	-	-	-	-
<b>Flujo de efectivo</b>	<b>1.835.015</b>	<b>5.321.584</b>	<b>5.321.584</b>	<b>5.321.584</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 38. Indicadores de Evaluación.**

<i>Valor actual neto</i>	\$7.564.421,36
<i>Tasa interna de retorno</i>	284,92%
<i>Relación beneficio / costo</i>	5,12
<i>Costo de capital</i>	32%
<i>Tir-k</i>	274,68%

**Nota:** Tasa de interés pasiva de los 6 principales bancos del país 2022 (Depósito de Ahorro): 32% Anual.

De acuerdo al **Valor Actual Neto (VAN)**, hace referencia al valor del dinero en el tiempo, una vez ejecutada la inversión, para flujos de efectivo positivos y negativos, el inversionista aportará a su patrimonio ocho millones cuatrocientos sesenta un mil setecientos noventa y nueve con un céntimo (**\$7.564.421,36** USD americanos). Por otro lado, en lo referente a **Tasa Interna de Retorno (TIR)**, el proyecto es rentable, porque la diferencia entre la TIR y el costo de capital es positiva. Entonces, tomando en consideración el valor del dinero en el tiempo, la tasa de rendimiento de la inversión realizada dentro del mismo negocio, para los siguientes tres años, es del **274,68%** (**TIR-K**). Finalmente, la **Relación costo/beneficio, adquiere importancia por ser mayor a uno (1)**, ya que, indica que los beneficios del proyecto serían mayores a los costos, en este caso, por cada dólar americano (1 USD) invertido, se obtiene una ganancia del 512%, es decir 5 veces lo invertido.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

La caracterización geometalúrgica, permitió conocer las particularidades de la muestra objeto de estudio, de manera específica, sus características físicas y químicas.

La caracterización física, proporcionó información, a través de análisis granulométrico, la medición de la densidad relativa por picnómetro y la estimación del grado de liberación por Microscopía Óptica. Los resultados de estos ensayos reportaron que: 1) El 80% (d80) del material analizado se encuentra por debajo del tamiz N.º 5. 2) la densidad de la muestra oscila entre 2,27 y 3,50 g/cm<sup>3</sup> y, 3) las partículas de casiterita, en conjunto con los minerales accesorios, se encuentran liberadas entre el pasante del tamiz N.º 12 hasta el retenido del tamiz N.º 200.

La caracterización química, permitió conocer los minerales asociados a la muestra y su tenor. La difracción de Rayos X (DRX) facilitó la identificación de los minerales, entre los cuales se encontraban: casiterita, albita, moscovita, cuarzo y granate almandino. La técnica de fluorescencia de Rayos X (FRX), permitió determinar el contenido del mineral de interés, en este caso, la casiterita (SnO<sub>2</sub>). Este mineral presentó, como valor mínimo 23,55 % y como valor máximo 91,22 %. Siendo el promedio 62,93% de casiterita en la muestra. Esto devela que la muestra tiene un alto valor de estaño para considerar la concentración del mismo.

Los ensayos de concentración gravimétrica, permitieron constatar que la combinación de equipos hace más eficiente la concentración del mineral. El JIG, permitió limpiar las muestras, mientras que la mesa vibratoria tipo Humphrey facilitó su concentración. Este equipo permitió obtener un grado de concentración más eficiente que el JIG. Este resultado se obtuvo cuando se ajustó el ángulo de la mesa a 4° y a un caudal de 12 l/min. En el JIG, el valor más alto de concentración fue de 26,9 g, mientras que en la mesa fue de 85,80 g. Los ensayos de separación magnética, facilitaron la separación del granate almandino del mineral casiterita, por sus propiedades magnéticas.

Los índices metalúrgicos, permitieron calcular el porcentaje de recuperación, la razón de enriquecimiento y *la razón de concentración* del mineral en el proceso de concentración gravimétrica. El mayor nivel de recuperación se evidenció en la segunda corrida del JIG, el cual arrojó como resultado 11,33 %. En la mesa de sacudidas, la *primera corrida* tuvo mejor *recuperación*, al presentar como resultado 15,71%. En cuanto a la razón de enriquecimiento,

se encontró resultados similares entre las corridas y los equipos. El **valor más** alto en el JIG fue de **1,68** con un 15% más de eficiencia que la mesa. Mientras que el valor más bajo en el JIG fue de 1,63 con un 23% por encima del valor de la mesa. Con relación a la **razón de concentración**, se encontró que la mejor concentración entre el JIG y la mesa de sacudidas se obtuvo en la mesa al ajustar el ángulo de inclinación a 4°. Esto quiere decir que se necesitan 8,04 toneladas de material para concentrar una (1) tonelada de casiterita.

Los resultados obtenidos, a través de los ensayos, facilitaron el diseño conceptual para una planta de procesamiento de casiterita. El diseño refleja el circuito del procesamiento del mineral en el contexto del sector la Esperanza, municipio Cedeño, Estado Bolívar, Venezuela. La propuesta conceptual se desarrolló utilizando el *software MODULAR SIMULATOR for MINERAL PROCESSING PLANTS MODSIM<sup>tm</sup>* versión *Student 3.6*.

La propuesta contiene el análisis de factibilidad económica, que incluye el Plan de inversión. Se estimó la maquinaria a adquirir, los equipos, el mobiliario, los gastos de organización y capital de trabajo. Se tasó el índice de depreciación de las maquinarias y equipos; así como, el gasto en sueldos y salarios tanto en mano de obra directa como indirecta, del establecimiento. De igual forma, se valuó todo lo relativo a los beneficios sociales establecidos en la normativa laboral del país. También se calculó el presupuesto de ingreso y se contemplaron indicadores de evaluación. Es importante señalar que el análisis económico es muy sensible, debido a que solo fue contemplada y evaluada una sola fase (preparación y concentración de mineral), de las tres (3) que lo componen: Evaluación y Exploración de yacimiento, Extracción de mineral, preparación y concentración de mineral.

Los resultados obtenidos de los ensayos experimentales de laboratorio, fueron analizados como medida comparativa en los mercados internacionales de casiterita y metal de estaño y, bajo las consideraciones requeridas, mostraron que esta fase experimental fundamentada en el diseño conceptual y en el estudio de factibilidad y rentabilidad de este proyecto, es económicamente rentable.

## Recomendaciones

Para estudios posteriores, se recomienda incorporar al circuito la técnica de flotación, junto con los equipos de concentración gravimétrica utilizados en este estudio, a fin de implementar lo propuesto en el diseño conceptual, tomando en cuenta los reactivos necesarios para la separación de la muscovita y la casiterita.

Realizar un estudio económico para la mica (muscovita), que se produce en el proceso de refinación y concentración de la casiterita, considerando el % de potasio (K) que contiene este mineral.

Se recomienda ingeniería de control de calidad de agua en los vertidos de la planta de casiterita por la presencia abundante de muscovita en los relaves de cada equipo de concentración gravimétrica.

Realizar un diseño factorial por superficie de respuesta donde se establezca una matriz de estudio de parámetros (mesa de sacudidas): densidad de pulpa, entrada de agua de lavado y grado de inclinación.

Realizar un diseño factorial en la criba hidráulica (JIG) por superficie de respuesta donde se establezca una matriz de estudio incorporando el fondo de granza (número de esferas de acero).

Contemplar un estudio de factibilidad económica de un proyecto donde se incorpore el proceso productivo de la obtención de estaño a partir de mineral de casiterita.

Los resultados de esta propuesta se fundamentan en los ensayos de laboratorios de la región estudiada, por lo tanto, para el desarrollo de proyectos similares en otras regiones deben realizarse los ensayos correspondientes para hacer las estimaciones geometalúrgica y económicas contempladas en este trabajo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angadi S, Sreenivas B, Ho-Seok J y Sang-Ho Baek y Mishra, B (2015). A review of cassiterite beneficiation fundamentals and plant practices. *Revista Minerals Engineering*, Volume 70, January 2015, Pages 178-200. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687514003124>
- Anaya, R. (2004). *Calibración del Separador Magnético de Alta Intensidad Magnet-lift MLH (13) 11-5 y comparación con el Separador Isodinámico Frantz, para la concentración de grandes volúmenes de minerales accesorios pertenecientes a rocas sedimentarias de las Formaciones Isnotú y Betijoque del Estado Trujillo*. Escuela de Geología Minas y Geofísica, UCV, Trabajo Especial de Grado.
- Baca Urbina, G. (2010). *Evaluación de proyectos* (6ta ed.). Mc Graw Hill.
- Bowles, J (2021). *Encyclopedia of Geology*. ScienceDirect. Recuperado de: <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00185-5>
- Bustamante, O. Gaviria, A, Restrepo, O (2008). *Concentración de minerales*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín Colombia
- Carrera L, Pérez R, Boggio W, Sampol M, Orozco G y Díaz R. (2011) *EL Patrimonio Geológico e Histórico en Venezuela, Oportunidades Culturales y Económicas, “Museo Interactivo Geohistorico Vial Del Estado Bolívar”* GEOCIENCIAS. Sociedad Cubana de Geología, Habana, Cuba. Recuperado de: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglcfindmkaj/https://www.aacademica.org/luis.angel.carrera.figueroa/2.pdf>
- Castro, Dávila, Torres y Aramburú (2022) *Geometalurgia y el análisis de la data. Importancia y aplicaciones en Perú*. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal. cienc. geogr.* vol 25 N.º 49, 2022: 211 – 228. Recuperado de: [file:///C:/Users/Irayda/Downloads/81377%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/Irayda/Downloads/81377%20(4).pdf)
- CienciaDeSofa. (14 de enero de 2022). *Tabla periódica | el estaño, un metal que se deshace con el frío [video]*. YouTube. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=ma9XbkMzu0U>
- Condoretty, J (2003). *Obtención de concentrados de cromita a partir de los depósitos de peridotita ubicados en el rodeo, Carirubana, Estado Falcón*. Trabajo especial de grado presentado en la Universidad Central de Venezuela, para optar al título de Ingeniero de Minas. Caracas Venezuela.

- Dana – Hurlbut (1959) *Manual de Mineralogía. Tratado moderno para la enseñanza en universidades y escuelas especiales y para guía de Ingenieros de Minas y Geólogos.* Barcelona España. Editorial Reverté, S.A, 2ª edición.
- Deiana, A., Granados, D., & Sardella, M. (2018). Balance de Masa. San Juan, Argentina: Universidad Nacional de San Juan.
- Errol, K y Spottiswood, D (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales.* México. Editorial Limusa, S.A
- Henao, M (2012). *Cristalografía recreativa.* 1ª edición. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. Medellín, Colombia.
- Hernández R, Fernández C y Baptista P (2014). *Metodología de la investigación.* México. Editorial Mac Graw Hill, Sexta Edición.
- Herrera, J (2018). El proceso de evaluación de un proyecto minero. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid- Escuela técnica superior de ingenieros de Minas y Energía, serie “Diseño integral y Planificación Minera”. Volumen 2.
- Hurtado, J (2010) Guía para la comprobación holística de la Ciencia. Caracas, Venezuela
- Ish Grewal, M.A.Sc. P.Eng (2006) Introduction to Mineral Processing. Instituto Nacional de Estadística. (2011). XIV Censo Nacional de Población y Vivienda. Venezuela.
- Li Ch, Yang C, Tian z, Wu Ch y Qin W (27 de febrero de 2023). Cassiterite beneficiation in China: Revista de la Universidad Central del Sur, volumen 30, paginas1–19 Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11771-023-5245-4>
- Martínez, P (2012). *Apuntes de tecnología Mineralógica. Separación Magnética y Electrostática.* Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena Colombia.
- Marañón, J (2019). *Establecimiento de los parámetros óptimos en la concentración gravimétrica con principio de separación en corrientes superficiales de agua, usando metodología de superficies de respuesta.* Trabajo especial de grado presentado en la Universidad Central de Venezuela, para optar al título de Ingeniero de Minas. Caracas Venezuela
- Mariño, N (2023). *Municipio Cedeño: La alternativa minera del estado bolívar, Venezuela.* Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. ISSN 1317-6781. Caracas, N.º 58. Enero-marzo 2023. Pág. 207. [https://www.researchgate.net/publication/370772429\\_MUNICIPIO\\_CEDENO\\_LA\\_ALTERNATIVA\\_MINERA\\_DEL\\_ESTADO\\_BOLIVAR\\_VENEZUELA\\_1\\_CEDENO\\_](https://www.researchgate.net/publication/370772429_MUNICIPIO_CEDENO_LA_ALTERNATIVA_MINERA_DEL_ESTADO_BOLIVAR_VENEZUELA_1_CEDENO_)

MUNICIPALITY\_THE\_MINING\_ALTERNATIVE\_OF\_THE\_BOLIVAR\_STATE\_VENEZUELA/link/64626ba1fbaf5b27a4cb4ee1/download

- Mendoza, V. (1972). *Geología del área del río Suapure, parte Noroccidental del Escudo de Guayana*. En: Mem. Bol. Geol. Publ. Esp. Num. 6: 306- 336.
- Mendoza, V (2005) *Geología de Venezuela Tomo I: Escudo de Guayana Andes Venezolanos y Sistema Montañoso Del Caribe*. Universidad de Oriente, Escuela Ciencias de la Tierra, Cátedra: Geología de Venezuela. Venezuela
- Mendoza, V., Márquez, H., Petit, P. y Brojanigo, A. (2019). *Historia Geológica del Escudo de Guayana, Venezuela y sus Recursos Minerales: Evolución de Supercontinentes, Tectónica de Placas y Plumitas del Manto*. Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, Caracas, 43, junio 2019. Caracas, Venezuela: 97-227
- Menéndez, V. (1968). *Revisión de la Estratigrafía de la Provincia de Pastora según el estudio de la región de Guasipati, Guayana Venezolana*. Boletín Geológico, Caracas, 9(19): 309-338, Venezuela
- Ministerio del Poder Popular de Desarrollo Minero Ecológico (abril, 6 de 2022). “*La Casiterita*” *Mineral importante para la Producción de Estaño*. Recuperado de: <http://www.desarrollominero.gob.ve/la-casiterita-mineral-importante-para-la-produccion-de-estano-%EF%BF%BC/>
- Montero, B (2012). *Proyecto de viabilidad de una planta de tratamiento para mineral de estaño y tántalo*. Proyecto de fin de carrera presentado ante la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, España.
- Ndimande, S., Durgean, U., Labuschange, J., Buthelezi, N., Nam, J., Hulley, J., & Khoza, I. (9 de marzo de 2016). Gravity concentration- Shaking Table.
- Palella, S. y Martins, F. (2012). *Metodología de la investigación cuantitativa*. Editorial FEDEUPEL. Caracas. Venezuela.
- Pelaez, E. (1981). *Preparación y Concentración de Minerales*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Peña, C (2019) *Evaluación de los parámetros óptimos operacionales de funcionamiento de una criba hidráulica (JIG) a escala de laboratorio mediante una herramienta estadística*. Trabajo especial de grado presentado en la Universidad Central de Venezuela, para optar al título de Ingeniero de Minas. Caracas Venezuela.
- Pérez, M., Vargas, K., Bisbal, R., Meléndez, W., Marrero, S., y González, L. (2018). *Determinación de elementos mayoritarios en minerales que contienen niobio y tántalo*

- mediante fluorescencia de rayos x por dispersión de energía*. Jornadas de investigación encuentro Académico Industrial, Facultad de Ingeniería UCV (JIFI 2018).
- ProActivo. Seguridad, salud, Medio Ambiente y Responsabilidad Social (21 de junio de 2018) *La Geometalurgia y sus beneficios para la minería*. Recuperado de: <https://proactivo.com.pe/la-geometalurgia-y-sus-beneficios-para-la-mineria/>
- Providencia Administrativa SNAT/2013/004. (2013)
- Quispe, V (2019). *Estudio del tratamiento y análisis en laboratorio de minerales de casiterita*. Trabajo especial de Grado ante la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, para optar al Título Profesional de Ingeniera Química. Arequipa, Perú
- Redd GBR (12 de septiembre de 2020). *Estaño - Definición, Características*. [video]. YouTube. Recuperado el 10 de mayo de 2023 de <https://www.youtube.com/watch?v=GfcD17LASRk>
- República Bolivariana de Venezuela. Gaceta Oficial N.º 42230. Decreto N.º 4598
- Schachl E, Padula F, Pereira R, Möckel R, Ebert D, Buchmann M, Leißner T, Pashkevich D, Sousa R, Kern M, Bremerstein I, Filippov L, Rudolph M, Broadbent Ch y Boogaart G (2019). *Pilot Plant for the Processing of a Complex Tin Ore: A Contribution towards Geometallurgy in Beneficiation*. Procemin GEOMET 2019. Recuperado de: <https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm&ogbl#inbox?projector=1>
- SGS Mineral Services (julio del 2007) *Geometalurgia. Visión general de la Geometalurgia*. Recuperado el 19 de mayo de 2023 de: <https://www.sgs.com/en>
- Taggart, A.F. (1996) *Elementos de Preparación de Minerales*. Interciencia Madrid 1 era edición española.
- Tovar, A (2019). *Diseño a nivel de laboratorio de un circuito de beneficio para recuperación de ilmenita en arenas de la zona de San Quintín, estado Yaracuy*. Trabajo especial de grado presentado en la Universidad Central de Venezuela, para optar al título de Ingeniero de Minas. Caracas Venezuela
- Valero, D (mayo, 2 de 2018). *terita, en Venezuela*. Página web, recuperado de: <https://es.linkedin.com/pulse/casiterita-en-venezuela-daniel-valero-gutierrez>
- Wemineral.com (s: f.) *Base de datos de mineralogía. Especies minerales que contiene estaño (Sn)*. Recuperado 10 de mayo de 2023 de <https://webmineral.com/chem/Chem-Sn.shtml>
- Zambrano, J (2014). *Evaluación Financiera de Proyectos Mineros*. Universidad de Bolivia Tomás Fría.