



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación del proceso extractivo de oro, aurífero a cielo abierto, mediante las metodologías de análisis de ciclo de vida, primera ley de la termodinámica y exergía. (Caso de estudio)

Carlos Andrés Orozco Loaiza

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de minas, Departamento de Ingeniería Mecánica

Medellín, Colombia

2023

Evaluación del proceso extractivo de oro, aurífero a cielo abierto, mediante las metodologías de análisis de ciclo de vida, primera ley de la termodinámica y exergía. (Caso de estudio)

Carlos Andrés Orozco Loaiza

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Director:

Ph. D. Héctor Iván Velásquez Arredondo

Codirector:

Ph. D. Moisés Oswaldo Bustamante Rúa

Línea de Investigación:

Fluidos y Ciencias Térmicas

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia
2023**

Evaluation of the open-pit gold mining process, using life cycle analysis, first law of thermodynamics and exergy methodologies (case study).

Carlos Andrés Orozco Loaiza

Thesis or research work submitted as a partial requirement for the degree of:

Master's Degree in Mechanical Engineering

Director:

Ph. D. Héctor Iván Velásquez Arredondo

Co-director:

Ph. D. Moisés Oswaldo Bustamante Rúa

Lines of Research:

Fluids & Thermal Sciences

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia
2023**

(A mis familiares y amigos)

"El mundo no es perfecto y la ley está incompleta, el intercambio equivalente no comprende todo lo que sucede aquí, pero aun así escojo creer en su principio, que todas las cosas tienen un precio, que hay un porque, un flujo y un ciclo, que el dolor que sufrimos tiene su recompensa y que cualquiera que persevere con determinación, obtendrá algo de igual valor a cambio, incluso si no es lo que esperaba."

Alphonse Elric (Fullmetal Alchemist)

Agradecimientos.

Me disculpo con aquellas personas que estuvieron esperando la finalización y entrega de este documento; no me fue fácil escribir esta tesis dala la etapa de la vida en la que me encontraba, la necesidad de ingresos y una profunda sensación que este trabajo no era digno de ser leído. Por su paciencia, motivación y apoyo les estoy infinitamente agradecido.

Agradezco a mis padres y hermanos por el apoyo, esfuerzo, dedicación y entera confianza, ya que han estado presente en cada etapa de mi vida motivándome en cada proyecto de decido emprender.

A mi gran amigo Héctor I Velásquez por su paciencia y valiosa orientación como director de tesis.

A Natalia A Cano y Christian Hasenstab por su interés y apoyo durante el desarrollo de esta investigación; por permitirme hacer parte de su grupo de investigación y permitir que los resultados de esta tesis apoyasen en pequeña escala sus tesis de doctorado.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA sede de Medellín y al proyecto de *Evaluación de la Sostenibilidad de un Sistema de Extracción Minera Mediante el Análisis de Ciclo de vida, el Método Exergético y el Método Energético*, código 34686, por brinda los recursos tecnológicos, logísticos y profesionales necesarios para culminar exitosamente esta esta labor.

Resumen.

El siglo XX se caracterizó por el crecimiento económico de países industrializados que se mantuvo por la extracción y uso masivo de los recursos minerales presentes en el subsuelo; situación que no ha cambiado en la actualidad a causa del latente deseo de un “nivel de vida más alto” y un progreso tecnológico donde las limitaciones físicas del planeta podrían restringir seriamente las economías mundiales, de hecho, muchos productos minerales como el petróleo o el cobre ya muestran signos de escasez, en consecuencia, sus precios están aumentando considerablemente [1].

El sector minero colombiano caracterizado por la producción de carbón, oro, esmeralda, ferromanganeso y materiales de construcción; es considerado como un agente económico que impulsa el desarrollo en la región, que requiere fortalecimiento de sus políticas y responsabilidad ambiental. Por lo tanto, esta investigación pretende mostrar la importancia de implementar metodologías basadas en la lógica de la naturaleza que permitan calcular el Impacto Ambiental de actividades extractivas, como lo es la minería Aurífera a Cielo Abierto, de manera objetiva; con la finalidad de medir el costo físico de un Recurso Natural a partir de un estado degradado en el denominado Ambiente de Referencia, utilizando la Exergía como unidad universal de medida. Mostrando con esto opciones al momento de evaluar los Impactos Ambientales en los proyectos mineros, fortaleciendo la toma de decisiones y la gestión energética.

Los resultados de evaluar el caso de estudio aurífero a cielo abierto en Colombia, revelan que tanto el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en su indicador de CExD (Cumulative Exergy Demand) junto con el análisis de exergía; estos constituyen una herramienta que evalúa la degradación de los recursos no renovables presentes en el subsuelo en forma de exergía destruida e impacto ambiental. Logrando la identificación de procesos críticos en la operación, ambiental y energéticamente hablando, al encontrar sus impactos ambientales, eficiencias exergéticas y proponiendo escenarios donde si se mejora la eficiencia se disminuye la destrucción de exergía y, en consecuencia, se reducen las posibles emisiones al medioambiente. Este análisis puede implementarse como una guía básica para la toma de decisiones en la planificación de los procesos mineros integrando el componente ambiental con la producción [2][3][4].

Palabras claves: Operación minera, Minería, Oro, Exergía, Eficiencia exergética, Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Demanda de Exergía Acumulada (CExD), costo exergético.

Abstract.

The 20th century was characterized by the economic growth of industrialized countries that was sustained by the extraction and massive use of mineral resources present in the subsoil. It that has not changed today because of the latent desire for a "higher standard of living" and technological progress where the physical limitations of the planet could seriously restrict world economies, in fact, many mineral products such as oil or copper already show signs of scarcity, consequently, their prices are increasing [1].

The Colombian mining sector, characterized by the production of coal, gold, emeralds, ferronickel and construction materials, is considered as an economic agent that drives development in the region, which requires strengthening of its policies and environmental responsibility. Therefore, this research intends to show the importance of implementing methodologies based on the logic of nature that allow calculating the environmental impact of extractive activities, such as open-pit gold mining, in an objective way in order to measure the physical cost of a natural resource from a degraded state in the so-called Reference Environment, using the Exergy as a universal unit of measurement. Showing with these options at the moment of evaluating the Environmental Impacts in the mining projects, strengthening the decision making and the energetic management.

The results of evaluating the open pit gold mining case study in Colombia reveal that both the Life Cycle Analysis (LCA) in its CExD (Cumulative Exergy Demand) indicator together with the exergy analysis constitute a tool that evaluates the degradation of non-renewable resources present in the subsoil in the form of exergy destroyed and environmental impact. Achieving the identification of critical processes in the operation, environmentally and energetically speaking, by finding their environmental impacts, exergy efficiencies and proposing scenarios where if the efficiency is improved, the exergy destruction is reduced and consequently, the possible emissions to the environment are reduced. This analysis can be implemented as a basic guide for decision making in the planning of mining processes, integrating the environmental component with the production of energy [2][3][4].

Palabras claves: Mining operation, Mining, Gold, Exergy, Exergetic Efficiency, Life Cycle Analysis (LCA), Cumulative Exergy Demand (CExD), Exergetic Cost.

Contenido

Agradecimientos.....	5
Resumen.....	6
1. Introducción.....	15
1.1. La importancia del sector minero para Colombia.....	15
1.2. La extracción de minerales y métodos.....	18
1.3. Los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) y entorno natural (medio ambiente) en el contexto de la minería primaria en Colombia.....	19
1.4. Métodos de Evaluación de Impactos Ambientales en la planeación de proyectos colombianos.....	21
1.5. Descripción del Problema.....	22
1.5.1. Alcances y Finalidad de la Investigación.....	22
1.5.2. Objetivo General.....	23
1.5.3. Objetivos Específicos.....	23
1.5.4. Productos de esta investigación.....	23
2. Minería de superficie.....	24
2.1. La minería Aurífera a Cielo Abierto.....	26
2.2. Procesos involucrados en cada etapa de la actividad minera (caso de estudio).....	28
2.3. Composición del depósito minero.....	32
3. Análisis de ciclo de vida (ACV).....	33
3.1. Metodología de un ACV.....	35
3.2. Umberto NXT Universal, como Software para el ACV.....	38
3.3. Método de impacto ambiental ReCiPe.....	38

4.	Exergía.....	41
4.2.	La importancia de un análisis de exergía.....	42
4.3.	Alrededores, ambiente de referencia y estado muerto.....	43
4.4.	Formas de exergía y sus interacciones.....	44
4.4.1.	Exergía cinética.....	44
4.4.2.	Exergía potencial.....	45
4.4.3.	Exergía física.....	45
4.4.4.	Exergía química.....	46
4.4.5.	Exergía química estándar.....	47
4.4.6.	Estado ambiental de referencia (A.R).....	48
4.5.	La Exergía de los recursos minerales.....	49
4.5.1.	Análisis Termo-económico y Exergo-económico.....	50
4.5.2.	Balance de costos termo-económicos.....	51
4.5.3.	Balance de costos exergéticos.....	53
4.5.4.	Criterio de partición de costos basados en exergía.....	54
4.6.	Destrucción de la exergía y su principio de disminución.....	55
4.7.	Rendimientos exergéticos e indicadores de exergía.....	55
4.8.	Indicador de Demanda Acumulada de Exergía CExD.....	57
5.	Resultados.....	59
5.1.	Modelado en Umberto del ACV.....	59
5.1.1.	Resultados del ACV.....	62

5.1.2.	Comparación de resultados con proceso registrados en la base de datos de ecoinvent 3.1.	66
5.1.3.	Indicador de demanda acumulada de exergía CEXD.	68
5.2.	Resultados del análisis exergético.	71
5.2.1.	Balances de exergía.	72
5.2.2.	Resultados del balance exergético.	78
5.2.3.	Rendimientos e indicadores exergéticos.	84
5.2.4.	Análisis de sensibilidad.	85
5.2.5.	Costos exergéticos.	86
6.	Conclusiones.	88
7.	Referencias.	90
8.	Apéndice A. Balance del costo exergético.	95

Listado de tablas.

Tabla 1. División de los diversos métodos extractivos de superficie [16].	25
Tabla 2. Etapa de minería. Procesos de exploración, explotación y primera preparación del material extraído.	29
Tabla 3. Etapa de beneficio. Segunda trituración, separación de los minerales oro y plata. .	30
Tabla 4 Etapa de fundición. Proceso de separación en lingotes.	31
Tabla 5. Etapa de tratamiento de residuos. Proceso de recuperación y disposición de residuos.	31
Tabla 6. Composición del Depósito Minero a partir de [26].	32
Tabla 7. Comparación ente energía y la exergía [3].	42
Tabla 8. Indicadores de impacto ambiental, ReCiPe mindpoints, utilizados para la agrupación del inventario del ACV.	61
Tabla 9. Condiciones estándar del depósito minero [1] [2] [4].	72
Tabla 10. Tabla de resultados para el proceso de explotación en sus rendimientos e indicadores.	78
Tabla 11. Balance de exergía.	78
Tabla 12 Comparación entre rendimiento útil, rendimiento de separación y los indicadores exergéticos.	84

Listado de figuras.

Figura 1. Consumo per-capital de minerales y su relación con las etapas de desarrollo de un país [5].	15
Figura 2. Producción minera nacional a noviembre del 2021 [7], [8].	16
Figura 3. Mapa de áreas con potencial mineral en Colombia [9].	16
Figura 4. Inversión extranjera directa (IED) en la minería colombiana, desde el 2010 hasta el 2021[9].	17
Figura 5. Precio del oro en los principales mercados de consumo (US/onza troy) febrero del 2021 [10][11].	17
Figura 6. Tipos de métodos de minería comúnmente usados.	18
Figura 7. Principales esferas temáticas de la minería y los ODS [21].	20
Figura 8. Diagrama de flujo de la operación minera.	27
Figura 9. Ejemplificación del modelado del proceso en entradas/salidas y sus niveles de interacción.	28
Figura 10. Ciclo de vida de un producto [32] [33].	34
Figura 11. Marco de referencia de un ACV [34].	36
Figura 12. Variantes del ACV [31].	37
Figura 13. categorías de impactos “midpoints” y “endpoints” [37].	39
Figura 14. Sustancias de referencia en la atmosfera [4].	47
Figura 15. Resumen de las metodologías usadas para calcular las propiedades termodinámicas de los minerales [1].	50
Figura 16. Volumen de control para el balance de costos [41].	51
Figura 17. Modelo en Umberto del proceso de extracción a modo de resumen.	60
Figura 18. Subred necesaria para caracterizar el proceso de extracción.	61
Figura 19. Indicadores del impacto ambiental en la producción de 1 kg de oro, desde los productos. (grafica en ingles según la convección estipulada para los resultados del ACV).	62
Figura 20. Indicadores del impacto ambiental en la producción de 1kg de oro, desde las etapas. (grafica en ingles según la convección estipulada para los resultados del ACV).	63

Figura 21. Indicadores del impacto ambiental en la producción de 1kg de oro, para las etapas, minería, tratamiento de residuos y materiales de entrada en los índices de interés. (grafica en ingles según la convección estipulada para los resultados del ACV).....	64
Figura 22. Indicadores del impacto ambiental en la producción de 1kg de oro, para las etapas de fundición y beneficio en los índices más representativos. (grafica en ingles según la convección estipulada para los resultados del ACV).	65
Figura 23. Comparación de diferentes ACV existentes en la base de datos ecoinvent 3.1 vs caso de estudio. (grafica en ingles según convección estipulado para los resultados).	66
Figura 24. CEXD para la producción de 1 kg de oro. [MJ]	69
Figura 25. CEXD para la producción de 1 kg de oro por etapas del proceso. [MJ].....	70
Figura 26. Figura 25. CEXD para la producción de 1 kg de oro por etapas del proceso. [% de participación en MJ]	70
Figura 27. Diagrama proceso de Explotación, entradas y salidas.	73
Figura 28. Diagrama Grassmann del Balance general de la actividad extractiva Aurífera a Cielo Abierto con base de cálculo 1.8151.771 kW.	80
Figura 29. Balance de procesos unitarios en un diagrama de Grassmann con base de cálculo 1.8151.771 kW	82
Figura 30 comparación entre los indicadores en el caso hipotético de usar los mismos insumos para extraer más oro.	85
Figura 31. comparación entre los indicadores en el caso hipotético de realizar una minería selectiva.....	86
Figura 32. Diagrama del flujo de costos exergéticos por proceso [kW].	87

Listado de ecuaciones.

Ecuación 1. Balance de Exergía	44
Ecuación 2. Exergía Cinética	44
Ecuación 3. Exergía Potencial	45
Ecuación 4. Exergía Física.....	45
Ecuación 5. Exergía Química.....	46
Ecuación 6. Exergía de mezclas de sustancias.....	47
Ecuación 7. Balance Exergoeconómico.....	52
Ecuación 8. Costo unitario.....	52
Ecuación 9. Balance exergoeconómico en terminos del costo unitario.....	52
Ecuación 10. Desigualdad entre costo exergético y exergía	53
Ecuación 11. Balance del costo exergético	53
Ecuación 12. Costo exergético unitario.....	53
Ecuación 13. Balance del costo exergético en terminos del costo exergético unitario	53
Ecuación 14. Destrucción de exergía	55
Ecuación 15. Rendimiento exergético 1	56
Ecuación 16. Rendimiento exergético 2.....	56
Ecuación 17. Indicador exergético 1	57
Ecuación 18. Indicador exergético 2	57
Ecuación 19. Demanda acumulada de exergía CExD.....	57

1. Introducción.

La demanda y el consumo de minerales en el mundo aparte de estar asociado con los ciclos económicos, se relaciona directamente con el crecimiento poblacional, la urbanización y el crecimiento en ingresos per-capital.

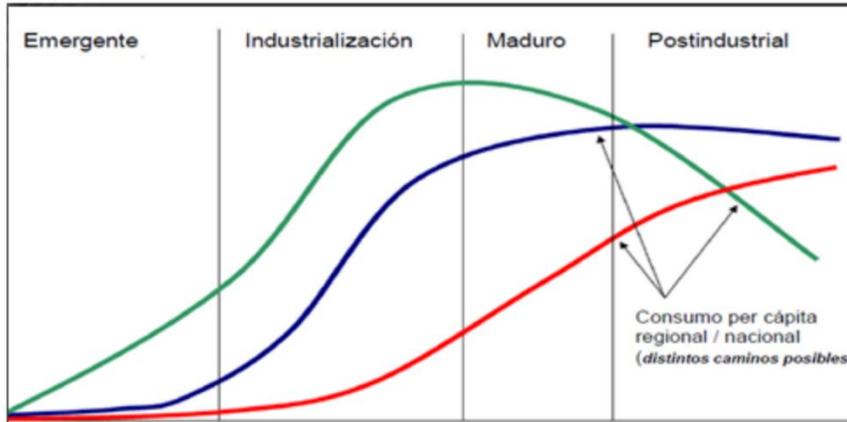


Figura 1. Consumo per-capita de minerales y su relación con las etapas de desarrollo de un país [5].

Por lo que las economías emergentes tienden a incrementar el consumo de minerales con tendencia a estabilizarse en una etapa de pos-industria (ver Figura 1) y cuya demanda mundial de minerales está liderada por el carbón, seguida por otros minerales no metálicos (útiles para la construcción), mineral de hierro, aluminio, potasio, cobre y otros metales [5].

Colombia como país que en vías de desarrollo que comienza a crecer con su propio nivel de producción industrial y sus ventas al exterior (Economía emergente de la región); ve en la minería una opción de expandir su crecimiento hacia la industrialización.

1.1. La importancia del sector minero para Colombia.

Los 9.602 títulos mineros vigentes en Colombia abarcan 312 tipos de minerales clasificados en 8 grandes grupos según el uso de cada mineral y su explotación; el más explotado es Materiales de Construcción con 57% de participación, seguido por Carbón que representa un 17%, Metales Preciosos 11%, Calizas 5%, Minerales Industriales 4%, piedras preciosas 4% y otros Metales 2%. Las mayores áreas del territorio tituladas para desarrollar proyectos mineros son en un 22% competencia de la Gobernación de Antioquía, seguido por el PAR Cartagena y el PAR Valledupar con un 10% cada uno; afirmando además que la minería se desarrolla en la mayor parte del territorio colombiano, para ser más precisos en 30 de los 32

departamentos y en el Distrito Capital [6]. En la Figura 2 se evidencia la producción de minerales desde el 2018 hasta noviembre del 2021 según el consolidado de la producción nacional de minerales para el territorio colombiano.



Figura 2. Producción minera nacional a noviembre del 2021 [7], [8].

La Figura 3 por su parte, enmarca las áreas con potencia para la minería y el tipo de recurso extraíble en Colombia, resaltando el interés del sector minero por la Cordillera Andina como un depósito de explotación de oro (naranjado), cobre (café) y Carbón (negro).

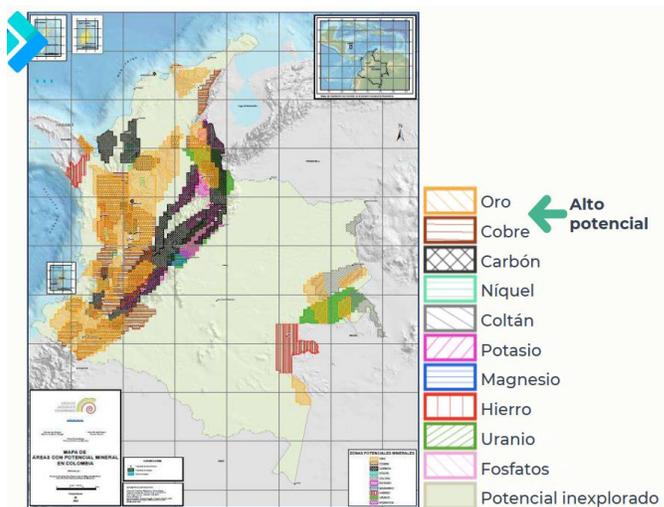


Figura 3. Mapa de áreas con potencial mineral en Colombia [9].

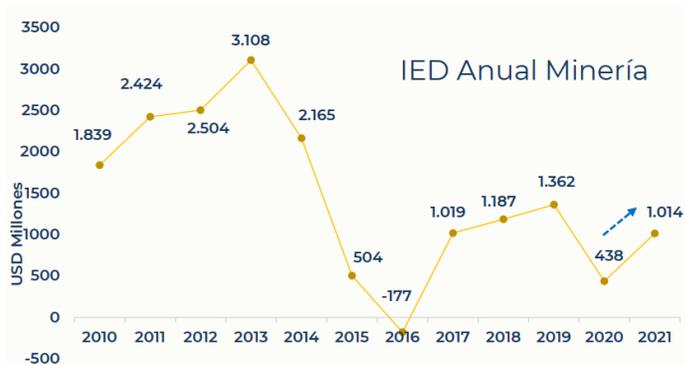


Figura 4. Inversión extranjera directa (IED) en la minería colombiana, desde el 2010 hasta el 2021 [9].

Según la Figura 4 Colombia recibió inversión extranjera para minería por 1.014 millones de dólares, equivalente al 11% de la inversión extranjera y una participación del 1,3% del PIB para el 2021 [9].

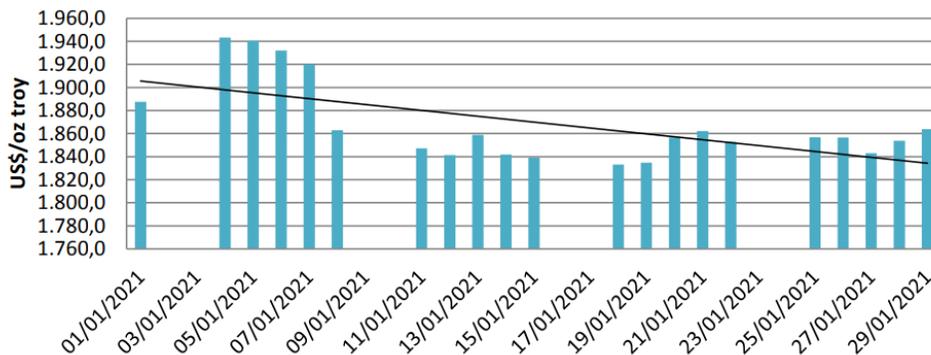


Figura 5. Precio del oro en los principales mercados de consumo (US/onza troy) febrero del 2021 [10][11].

Por lo que el sector minero es considerado como impulsor de la economía, aparato productivo, generador de empleo rural, agente de inversión privada y donde el oro en particular, representa el 33% de la exportación minera colombiana para el 2021 a causa de su precio en mercados internacionales (ver Figura 5) y atractivo como joyería, convirtiéndolo en un producto de fácil exportación [12][13][10].

1.2. La extracción de minerales y métodos.

La minería es una actividad económica del sector primario (extracción de minerales), que consiste en la explotación y exploración del recurso presente el suelo o sub-suelo y cuyos métodos más usados se ilustran en la Figura 6 y se resume en [14][15][16]:



Figura 6. Tipos de métodos de minería comúnmente usados.

- **La Minería de superficie** es adecuada para extraer minerales que están cerca de la superficie de la tierra; suele ser un método de minería más rentable que la minería subterránea y los minerales comunes que se extraen mediante la minería de superficie son el carbón, el hierro y materiales de construcción. Este método de minería se divide comúnmente en dos tipos **La minería a cielo abierto** y **La minería de remoción de cima**.
- **La minería subterránea** es adecuada para extraer minerales que se encuentran en las profundidades terrestres; comúnmente usada para la extracción de oro, plomo y plata, pueden alcanzar profundidades hasta 3000 m. Este método de minería se divide comúnmente en dos tipos **Minería de cámaras y pilares**, **Minería de hundimiento por bloques** y **Minería de pared larga**.
- **Minería aluvial** es el método de separar metales valiosos de sedimentos mediante un tamizado llevado comúnmente en lechos de ríos, arenas y entornos donde hay una acumulación natural de sedimentos.
- **La minería in situ** es el método de recuperar minerales de la tierra sin extraer la mezcla de rocas y minerales de la superficie para su procesamiento; lográndolo al inyectar una solución que disuelve el mineral y se bombea la solución que ahora incluye los minerales hacia la superficie. Este método comúnmente se utiliza para la extracción de uranio.

Es de recalcar que la correcta selección de un método de extracción es relativa y obedece a variables como la profundidad del yacimiento, el valor económico del mineral, la ubicación geográfica de la mina, los requerimientos ambientales, entre otros.

1.3. Los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) y entorno natural (medio ambiente) en el contexto de la minería primaria en Colombia.

A partir de los años 2000 las utilidades económicas provenientes de la minería en Colombia se han incrementado, lo que genera mayor interés por parte de los empresarios mineros en aumentar la explotación. Sin embargo, las altas utilidades e inversiones en la industria minera también han estado acompañadas de altos costos sociales y ambientales, que se manifiestan en numerosos conflictos que se originan en su mayoría a causa de la poca gestión política para tratar de evitarlos, mitigarlos o solucionarlos. La falta de una legislación minera (que incluya leyes ambientales, sociales, laborales, territoriales, entre otras) alineada a estándares internacionales y sobre todo, que sea firme al monitorear y sancionar la falta de cumplimiento de las políticas de Desarrollo Sostenible de los países ha sido uno de los factores que ha estado presente en los conflictos [17][14].

Según el Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina OCMAL [17][18], el impacto ambiental de la minería en Colombia ha sido una de las principales causas de conflictos sociales, entre estos se encuentra el **uso del agua, el uso del suelo y la deforestación** [17]. Por lo que el gobierno colombiano ha tomado postura clara pues el objetivo principal de todas las acciones realizadas hasta la actualidad es el de contrarrestar las problemáticas generadas por la extracción minera y aunque los esfuerzos no han sido suficientes para disminuir el impacto generado, se debe seguir mejorando las acciones para disminuir todo tipo de situaciones que atenten directa o indirectamente contra el medio ambiente [19].

En cumplimiento de la agenda Internacional 2015-2030 para el Desarrollo Sostenible, Colombia incorpora 92 de las 162 metas estipuladas para el cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible (ODS), con un particular interés en el **Consumo Responsable, la Protección del Medio Marino y Terrestre, la Acción contra el Cambio Climático, la Erradicación del Hambre, acceso al Agua Potable y Energía Renovable** [12]. Actualmente, el país participa activamente en las reuniones y seguimientos para la implementación de los ODS, por ende, ha incorporado el marco de los ODS en varios de sus planes y políticas públicas más importantes [20].

- **Los ODS en la minería colombiana.**

Para fortalecer la economía sin arriesgar los recursos naturales se requiere de la implementación de minería responsable, adoptando los principios fundamentales de los ODS: **El primero es el carácter integrado e indivisible**, lo que supone reconocer los vínculos

Se ve en la Figura 7 el compromiso del sector minero colombiano en cuanto a la implementación de los ODS según los informes gubernamentales en conjunto con las Naciones Unidas [22].

1.4. Métodos de Evaluación de Impactos Ambientales en la planeación de proyectos colombianos.

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un proceso técnico-administrativo utilizado para evaluar los impactos ambientales de Proyectos, Obras o Actividades (POA) e informar a la comunidad de manera previa para que se pueda intervenir en la toma de decisiones. En este sentido, la EIA puede considerarse como una herramienta de prevención y control en el contexto del Sistema Nacional Ambiental de Colombia [23]. *“Sin embargo, se evidencia poca calidad de los estudios ambientales, una gran diversidad de métodos con inconsistencias metodológicas e incluso conceptuales, uso de juicios de valor que dependen del profesional que los ejecuta y escalas de valoración cualitativas que no son claras o adecuadas, lo cual sesga los resultados”* [24].

El autor Daniel Toro Calderón [23] encontró que las EIA en Colombia utilizan métodos de matrices, en especial la matriz simbolizada, numérica y escalada; donde las más implementadas son: a) Método de Empresas Públicas de Medellín (9%), b) Método Conesa (67%), c) Método de la matriz de Leopold (3%) y d) Método RAM de Ecopetrol (21%). Llegando a la conclusión, por parte del autor Calderón, de que este tipo de métodos se caracterizan por incluir escalas descriptivas y numéricas para calificar a juicio del evaluador la importancia de los impactos ambientales; considerándose como un proceso difícil debido a su carácter subjetivo y lleno de juicios de valor. Por lo que *“los métodos para evaluar impactos ambientales en el proceso de Licenciamiento Ambiental en Colombia, se caracteriza por un alto nivel de incertidumbres y sesgo, disminuyéndose la efectividad”* [23].

El panorama anterior, sumado a las Noticias Colombianas sobre minería que hablan de vertimientos al agua, vertimientos al suelo, deforestación, daño a la fauna, flora y luchas sociales por el cuidado del medio ambiente. Muestra problemas de planeación y actuación en las contingencias mineras, panorama desfavorable para lograr los compromisos ODS en cuanto al Cuidado al Ambiente en la Agenda Nacional 2030.

Concluyendo en términos generalizados, que nuestra sociedad se construye sobre el uso ineficiente de la energía y materiales a causa de que a hay una gran falta de conciencia de límites, ya que, si los recursos son finitos, su gestión debe planificarse cuidadosamente; pero es imposible administrar los recursos de la madre tierra eficientemente porque no hay conocimiento de lo que se dispone y su velocidad de agotamiento [1].

1.5. Descripción del Problema.

Por lo que el problema a tratar en esta tesis se resume en que **la evaluación de impactos ambientales en Colombia**, en particular para las operaciones mineras, se realizan de manera cualitativa haciendo uso de matrices descriptivas y numéricas para **calificar a juicio del evaluador la importancia de los impactos ambientales**. Tomando como caso de estudio la operación minera de superficie aurífera a Cielo Abierto.

1.5.1. Alcances y Finalidad de la Investigación.

Esta investigación tiene como finalidad marcar un punto de partida para introducir métodos cuantitativos y objetivos basados en la lógica de la naturaleza, que permita evaluar la eficiencia energética y los impactos ambientales en los diferentes proyectos colombianos, incluidos los mineros, usando como caso de estudio la minería aurífera cielo abierto. Esto se logrará mediante la implementación de un Análisis de Ciclo de Vida de cuna a puerta (desde la extracción de las materias primas requeridas, hasta la producción del lingote de oro) junto con un análisis exegético (que permitirá mostrar los procesos a intervenir desde el punto de vista del impacto ambiental y el uso eficiente de los recursos.) Por lo que el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se modelara haciendo uso del software **Umberto NXT Universal** junto con la base de datos de **ecoinvent 3.1** y la metodología de agrupación de impactos **ReCiPe mind-point**. Mientras que el balance exegético se modelara en el software **Engineering Equation Solver (EES)**.

La importancia de este documento radica en la realización de un **Análisis de Ciclo de Vida** que combina las metodologías de **ReCiPe mind-point**, junto con **Análisis de Exergía** del proceso desde los recursos presentes en el suelo y el indicador de **Demanda Acumulada de Exergía** (Cumulative Exergy Demand CExD)

Aclarando que; aunque el **Análisis de Exergía** se aplican tradicionalmente para evaluar la eficiencia exegética con respecto a las pérdidas de exergía en un sistema, puede utilizarse como un indicador de la calidad de los recursos energéticos y no energéticos, mostrando así

los puntos de interés o de intervención. Pretendiendo facilitar la tomar decisiones en los diferentes proyectos colombianos incluido los mineros, a través de una metodología que considere e integre el capital natural, el uso de los recursos, el consumo energético y el proceso productivo; aportando criterios que se materialicen en avances significativos a la agenda ODS 2030 en términos de decisiones ambientales.

1.5.2. Objetivo General.

Evaluar mediante las metodologías de análisis de ciclo de vida y exergía, el impacto ambiental de la actividad minera Aurífera a Cielo Abierto.

1.5.3. Objetivos Específicos.

- Desarrollar el ACV del proceso extractivo, de cuna a puerta.
- Calcular la demanda acumulada de exergía.
- Modelar el análisis de exergía.
- Integrar los diferentes resultados y concluir

1.5.4. Productos de esta investigación.

- ✓ Ponencia. 1st LA sdewes Conference Rio de Janeiro 2018: *“Life Cycle Analsis (LCA) for an Open-Pit Gold Mining Process – a Study Case”*
- ✓ Ponencia. 1st LA sdewes Conference Rio de Janeiro 2018: *“A Colombia Case Study: a life Cycle Analysis for Mining System of Alluvial Gold Extraction”*
- ✓ Ponencia. ECOS 2019: *“Evaluation of the extractive gold process: open-pit mining through exergy analysis”*
- ✓ Paper en Journal of sustainable Mining, volume 19, article 3, *“Evaluation of the extractive gold process: open-pit mining through exergy analysis”*
- ✓ Aporte a la tesis de doctorado de la Dra. Natalia Andrea Cano Londoño: *“Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de extracción aluvial y a cielo abierto en Colombia. Análisis Emergético, Exergético y Ciclo de vida.”*

2. Minería de superficie.

Los depósitos minerales son concentraciones naturales de uno o más productos “minerales” y pueden denominarse **depósitos**, si estos alcanzan niveles en los que su extracción económica es viable. Estos minerales se forman como resultado de muchos procesos o entornos geológicos específicos, agrupando minerales que incluyen la cristalización fraccionada de los magmas, la liberación de sustancias volátiles de un magma cristalizado, la interacción magmática con las rocas del hospedador, las reacciones metamórficas que producen fluidos, los cambios químicos en las aguas subterráneas calientes en circulación, las interacciones orgánicas y el clima, entre otros. Por lo que los “tipos de depósitos minerales” son Depósitos Minerales que comparten un conjunto de atributos geológicos y contienen un producto (o productos) particular que los distingue colectivamente de otros tipos y cuya extracción es económicamente viable [25].

Los depósitos pueden ser minados completamente por métodos extractivos de **superficie**, pero en general, tales depósitos se encuentran en la superficie y tienen una geología relativamente uniforme. De manera similar, algunos depósitos solo pueden ser explotados por métodos **subterráneos** donde estos suelen ser más profundos con características geológicas y mineralógicas que requieren una extracción más selectiva. Pero en algunos casos ambos métodos se pueden combinar iniciando como pozos abiertos para luego cambiar a un método subterráneo a medida que se extraen porciones más profundas del cuerpo de mineral [15].

Si las condiciones lo permiten, en la explotación de algunos de los depósitos minerales siempre se opta como primera opción, por los modelos extractivos de **superficie** en comparación con los **subterráneos**, a causa de menores costos de desarrollo, tiempos de inicio más rápidos, menores tasas de accidentes laborales, etc [14][15]. Por lo que, al momento de elegir el método de explotación apropiado se deben considerar los siguientes factores:

- Tamaño, forma y profundidad del depósito.
- Estructura geológica y geomecánicas.
- Productividad y capacidad de maquinaria.
- Disponibilidad de mano de obra experimentada.
- Requerimientos de capital y costos de operación.
- Recuperación de minerales e ingresos.
- Seguridad y lesiones.
- Requisitos y costos de recuperación y reestructuración.
- Expectativas sociales, culturales, entre otros.

Concluyendo así que “cada operación minera es única en algún aspecto: propiedad, ubicación del mineral, tamaño, geometría, grado, mineralogía, hidrología o parámetros geotécnicos y restricciones tales como las regulaciones ambientales. Sin embargo, todas las operaciones mineras son similares en que el objetivo principal de cualquier proyecto minero es maximizar el retorno de la inversión, esta es la regla de oro o en el lenguaje de la minería, la Ley de Conservación del inversionista.” [16].

El recurso mineral por su parte no se convierte en una reserva explotable a menos que el este se pueda extraer económica y legalmente, donde la elección económica está determinada por el tipo de depósito a extraer, la tasa de extracción y las características físicas del depósito. Por ende, los métodos extractivos como el de superficie deben tener en cuenta dos objetivos principales de la planificación de la mina: desarrollar el plan más económico para el proyecto que maximizará el rendimiento del dinero invertido y maximizar la recuperación del recurso [16].

Resumiendo, la minería de superficie como un método para extraer minerales mediante la extracción en un tajo abierto, requiere un espacio de tierras para sus operaciones, generando un contraste perceptivo entre la minería de superficie y otros usos de la tierra como la agricultura, vivienda, etc. [14]. Y cullo proceso se subdivide en clase, subclases y métodos representadas en Tabla 1:

Tabla 1. División de los diversos métodos extractivos de superficie [16].

Clase	Subclase	Método
Mecánica		<ul style="list-style-type: none"> • Minería a cielo abierto • Canteras • Minería strip • Minería Auger
Acuosa	<ul style="list-style-type: none"> • Placer • Dragado 	<ul style="list-style-type: none"> • Minería hidráulica • Soluciones técnicas de superficie • Lixiviación in situ • Procesamiento evaporativo

2.1. La minería Aurífera a Cielo Abierto.

La minería a cielo abierto se aplica cuando los depósitos comercialmente útiles se encuentran cerca de la superficie terrestre, donde se emplean medios mecánicos o explosivos para remover los terrenos que recubren o rodean la formación geológica que forma al yacimiento; estos materiales se denominan estéril, mientras que a la formación a explotar se le llama mineral. El estéril excavado es necesario apilarlo en escombreras fuera del área final que ocupará la explotación, con la intención de utilizarlo en la restauración de la mina al finalizar el proyecto; en esencia, esta actividad se describe en 5 etapas: exploración, explotación, beneficio, fundición y tratamiento de residuos, donde:

- **Etapas 1. Exploración** consiste en determinar el tamaño y la forma del depósito, así como el contenido y la calidad del mineral.
- **Etapas 2. Explotación o minería** incluye un conjunto de operaciones para la preparación y desarrollo del depósito, extracción y transporte de minerales.
- **Etapas 3. Beneficio** consiste en los procesos físicos o químicos de los productos, que provienen de la explotación para elevar su contenido útil.
- **Etapas 4. Fundición** consiste en la fusión de minerales, para separar el producto de otros minerales que vienen con él.
- **Etapas 5. Tratamiento de residuos** consiste en un conjunto de operaciones que tienen como finalidad modificar las características, físicas, químicas y biológicas de un residuo para su reutilización y correcta disposición final.

Se ve en la Figura 8 el diagrama de flujo de la operación minera a analizar en esta tesis, la cual basado en un proyecto minero que actualmente opera en Colombia, donde para efectos del modelado y su entendimiento se divide en 4 etapas: **minería, beneficio, fundición y tratamiento** de residuos. Se aclara que la etapa de minería contiene a su vez la etapa de exploración, dado que esta solo se ejecuta en la etapa más temprana del proyecto, pero para el análisis debe incluirse como parte continua del proceso.

El flujo principal (FP líneas amarillas) representa los flujos con contenidos del mineral de valor en este caso una mezcla de oro y plata llamada dore, lo que significa que existe una masa de oro y plata en proporción al flujo. Por ejemplo, se estima que el material excavado listo para trituración, que es una mezcla de rocas, arenas, gravas, arcillas, agua y dore, contienen una proporción 0,00015% de dore y 99,99985% de otros elementos; mientras que, en la etapa final del proceso de fundición, antes de separar el dore en lingotes de oro y plata, se tiene una proporción de aproximadamente 53% plata y 47% oro.

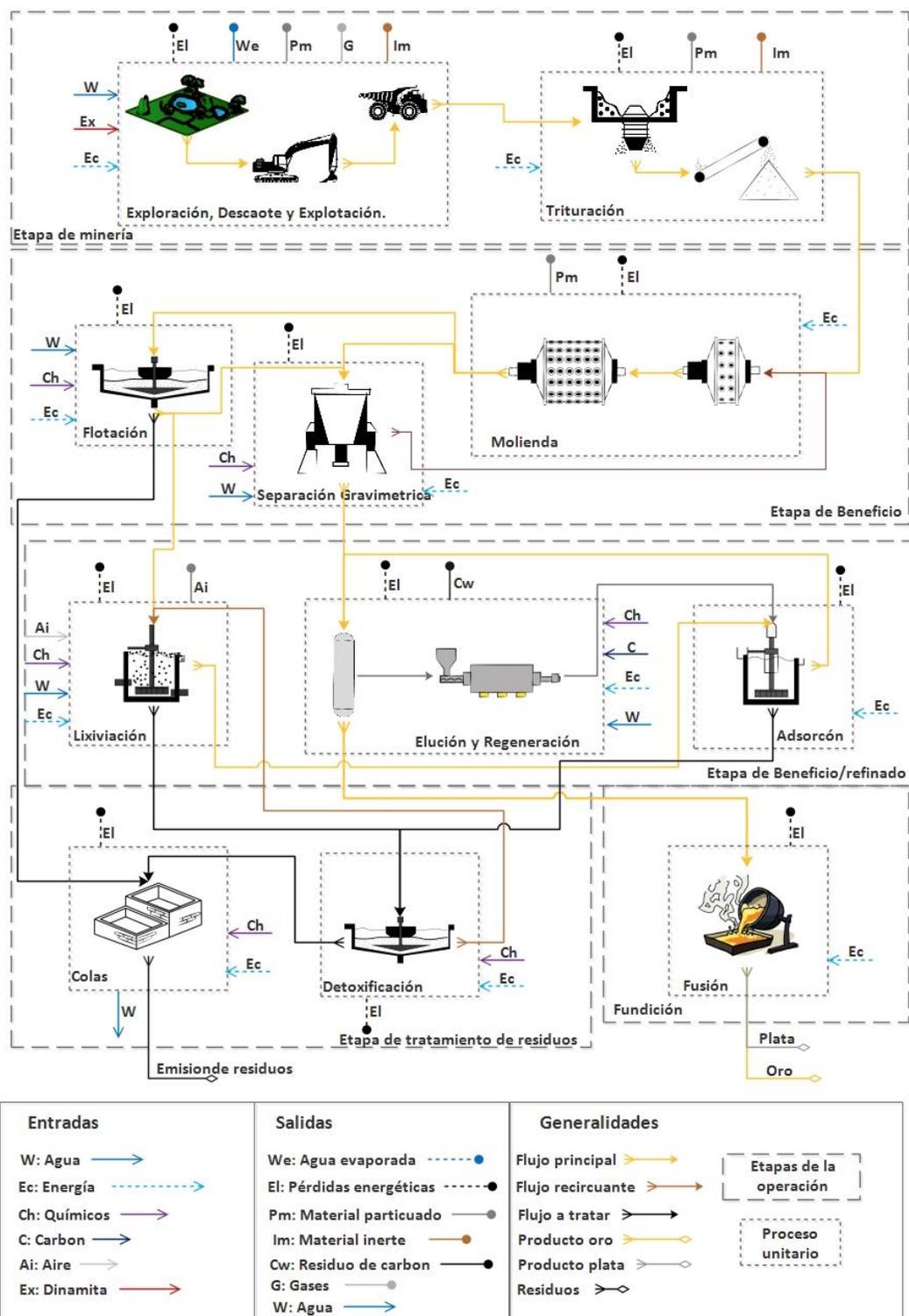


Figura 8. Diagrama de flujo de la operación minera.

En la Figura 8, a parte del flujo principal también se evidencian otros insumos que se mezclan o interfieren como adiciones o salidas del proceso, agua, agentes químicos (cal, cianuro, espumantes entre otros), energía (eléctrica, combustibles), materiales inertes, aire, material particulado entre otros, dando a entender con esto, que el diagrama debe conservar sus balances de materia y energía en sus entradas/salidas, por lo que su análisis puede entenderse o afrontarse desde varios puntos, un análisis macro que entiende toda la actividad minera, un análisis intermedio que comprende las etapas de cada proceso y sus interacciones con las demás etapas y un análisis específico que comprende el proceso particular o proceso unitario de cada etapa de la operación minera y sus interacciones.

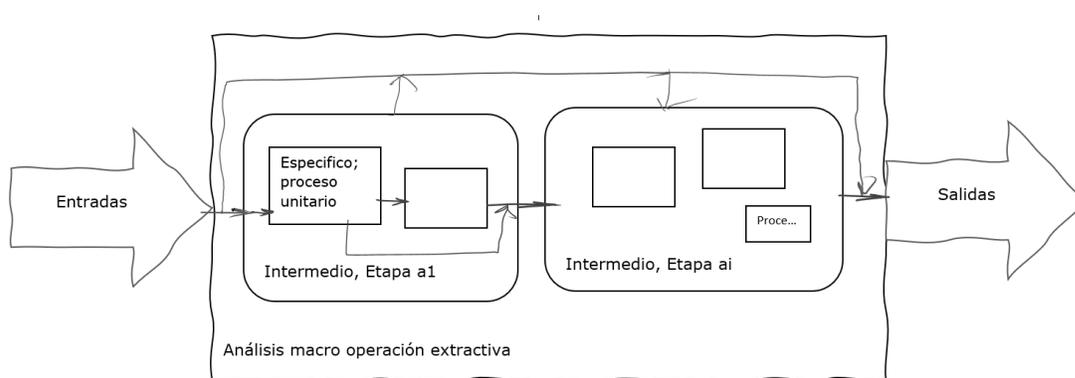


Figura 9. Ejemplificación del modelado del proceso en entradas/salidas y sus niveles de interacción.

La Figura 9 ejemplifica lo descrito anteriormente, se tiene un análisis macro de la operación minera, con sus entradas y salidas; en un nivel de detalle intermedio se tienen las etapas del proceso con sus entradas y salidas al igual que interacciones con otras etapas; y un nivel más detallado de procesos unitarios en sus entradas, salidas, interacción con otros procesos unitarios e interacción con otras etapas.

2.2. Procesos involucrados en cada etapa de la actividad minera (caso de estudio).

- i. En una **primera etapa** llamada **minería** se unen los procesos de exploración, explotación, extracción y triturado, esto con la finalidad de facilitar el análisis. Esta primera etapa, contiene los procesos unitarios relacionados la adecuación del terreno, la extracción de minerales y la preparación del material explotado en molienda para su posterior beneficio.

La Tabla 2 contiene en resumen y sin valores las entradas/salidas de la etapa llamada minería y sus procesos. Dando una pequeña descripción, seguido de las entradas/salidas de los materiales usados y sus respectivas pérdidas o emisiones al medio. Por ejemplo, el uso de electricidad genera pérdidas comúnmente por calentamiento de los equipos, iluminación y funcionamiento de maquinaria (motores, tableros de control); otro ejemplo es el combustible que genera pérdidas o emisiones al medio en forma de gases y calor.

Tabla 2. Etapa de minería. Procesos de exploración, explotación y primera preparación del material extraído.

Proceso Unitario	Descripción	Entrada	Salida
Exploración	Consiste en identificar las zonas por donde se ubican los Depósitos minerales que serán explotados.	-Diesel	-Pérdidas de energía por combustión.
Descapote	Consiste en remover la cobertura vegetal o capa superior del suelo, para tener acceso a los minerales y las rocas. Este material eliminado del proceso se conoce como material estéril, debido a su bajo contenido de oro, pero se almacena para usarse como recubrimiento.	-Diesel	-Pérdidas de energía por combustión. -Material inerte.
Explotación	Consiste en la extracción de las rocas junto con los minerales, para llevarse a una trituración primaria.	-Agua -Explosivos. -Electricidad. -Diesel. -Deposito minero	-Pérdidas de energía eléctrica por uso. - Pérdidas de energía por combustión. -Agua evaporada. -Material particulado. -Gases. -Material inerte. -FP o material con contenido de oro.
Trituración	En este proceso se reduce el tamaño de roca de minería para facilitar así su transporte a trituración.	-Electricidad. -FP rocas con contenido de oro.	-Pérdidas de energía eléctrica por uso. -Material particulado -Material inerte. -FP o material triturado.

- ii. **Segunda etapa llamada beneficio**, se optan por los procesos que separan el dore a través de cambios físicos y químicos en la mezcla o flujo principal, logrando así materiales adecuados para fundición en lingotes y separación de las aguas con sedimentos que requieren tratamientos para su recuperación, recirculación o disposición final.

Tabla 3. Etapa de beneficio. Segunda trituración, separación de los minerales oro y plata.

Proceso	Descripción	Entrada	Salida
Molienda	Consiste en reducir las rocas provenientes de trituración, en un ambiente húmedo.	-Electricidad -FP, Material triturado con contenido de oro. -Material recirculado de Separación gravimétrica. -Agua.	- Pérdidas de energía eléctrica por uso. -Material particulado. -FP, material molido para flotación. -FP, material molido para separación gravimétrica.
Separación Gravimétrica	Este proceso consiste en separar el oro del material inerte aprovechando la gravedad.	-Electricidad. -Agua. -Hidróxido de sodio. -Cianuro de sodio. -FP. Material molido con contenido de oro -Material de flotación con contenido de oro.	- Pérdidas de energía eléctrica por uso. -FP. Material de retorno a molienda. -FP. Material para elución.
Flotación	El objetivo de este proceso es concentrar los sulfuros que contienen oro y separarlos de los silicatos y otros minerales, que no lo contienen, mediante la adición de reactivos químicos, que promueven la selectividad de los que contienen oro.	-Electricidad. -Agua. -Floculante. -Espumante -FP. Material de Molienda	- Pérdidas de energía eléctrica por uso. -FP. Material para lixiviación. -FP. Material para separación Gravimétrica. -FP. Material a tratar en colas.
Lixiviación	Es el proceso en el cual el oro y la plata se obtienen mediante la aplicación de NaCN. Es responsable de resolver los contenidos metálicos, produciendo una solución complementada en oro y plata.	-Aire presurizado. -Cianuro de sodio. -Agua. -Electricidad. -FP. Material de flotación con contenido de oro. -Material recirculado de detoxificación. -Cal.	- Pérdidas de energía eléctrica por uso. -Material particulado. -Material a tratar en detoxificación (Detox). -FP. Material para adsorción.
Adsorción	Este proceso se basa en las propiedades del carbón activado para atrapar el oro contenido en una solución de cianuro.	-Electricidad. -Carbón activado proveniente de regeneración. -FP. Material proveniente de lixiviación	- Pérdidas de energía eléctrica por uso. -Material a tratar en Detox. -FP. Material para elución.
Elución y regeneración	El proceso de elución consiste en la inyección de NaOH y NaCN, para extraer el oro y la plata del carbón. Por otro lado, la regeneración consiste en la eliminación de material orgánico e inorgánico mediante un proceso térmico.	-Agua. -Carbón. -Hidróxido de sodio. -Cianuro de sodio. -Acido hidroclicórico. -FP. Material proveniente de Sep Grav. con contenido de oro. -FP. Material proveniente de adsorción con contenido de oro.	- Pérdidas de energía eléctrica por uso. -Carbón activado. -FP. Corriente de material para refinera y fundición. (Esta corriente contiene una mezcla de oro y plata conocidas como dore)

- iii. Una **tercera etapa** llamada **fundición** donde se tiene el dore se separa en lingotes de oro y plata, siendo el oro el producto principal y la plata un subproducto de la actividad minera.

Tabla 4 Etapa de fundición. Proceso de separación en lingotes.

Proceso unitario	Descripción	Entrada	Salida
Fusión	Su objetivo es llevar a cabo la precipitación selectiva de oro y plata contenida en una solución resultante de la elución por medio de galvanoplastia. Una vez obtenida la electrodeposición de oro y plata, se envían al horno de fundición.	-Electricidad. -Diesel -FP. Material de elución Con contenido de oro.	- Pérdidas de energía eléctrica por uso. - Pérdidas de energía por combustión. -Oro -Plata

- iv. En la **cuarta etapa** llamada **tratamiento** se tienen los procesos que recuperan el agua para recirculación y redistribución, al igual que disposición final de los residuos de minería en grandes estantes llamados piscinas de colas.

Tabla 5. Etapa de tratamiento de residuos. Proceso de recuperación y disposición de residuos.

Proceso	Descripción	Entada	Salida
Detoxificación	Es un proceso en el que se tratan los residuos más tóxicos, derivados de la actividad minera, mediante una serie de reacciones químicas. Luego, se liberan en tanques de cola.	-Electricidad -Peróxido de sodio -Metabisulfito de sodio -Desechos provenientes de lixiviación y adsorción. -Cal	- Pérdidas de energía eléctrica por uso. -Agua a recircular. -Desechos para colas
Colas	Es un lugar donde se depositan y almacenan los residuos mineros.	-Electricidad. -Floculante -Desechos de detoxificación y flotación.	-Residuos que se almacenan en grandes estanques. -Perdidas de energía eléctrica por uso. -Agua a recircular.

Desde la Tabla 2 hasta la Tabla 5, se describen los procesos unitarios a analizar en cada una de las etapas de la actividad extractiva, con estas tablas se aclara lo ya mostrado en la Figura 8; recalando que cada proceso no cuenta con un nivel detallado de lo que ocurre dada la magnitud de componentes o interacciones, por lo que se tienen imprecisiones en el uso de algunos insumos por los detalles particulares en la interacción entre las diferentes etapas. Un ejemplo es el uso de combustible para el transporte de materia desde trituración a molienda,

ya que no se cuenta con el detalle de lo que sucede en el límite de la interacción en estos procesos (retrasos en operación y tiempos de espera, aumento en recorridos, filas, entre otros.). Algo similar ocurre con los agentes químicos que se consumen en recirculaciones o tratamientos, se conoce su proporción, pero estos actúan en límites de interacción de cada proceso. Aunque se tengan estas imprecisiones el modelo sigue siendo válido, ya que se conocen las cantidades másicas y sus proporciones, manteniendo siempre la conservación de la masa en cada proceso o etapa.

2.3. Composición del depósito minero.

Para determinar la composición del depósito minero se combinan los datos de producción total por año del caso de estudio con los estudios referentes de la composición del suelo en la zona, donde el autor Gabriel Rodríguez [26] determina la composición de la corteza terrestre en el departamento de Antioquia sobre el eje de la cordillera Andina Colombiana. Dando como resultado la Tabla 6, la cual contiene las sustancias y su concentración másica como mezcla ($\frac{\text{sustancia [kg]}}{\text{mezcla[kg]}}$) extraídas en el proceso de explotación y contienen oro como producto principal y la plata como subproducto.

Tabla 6. Composición del Depósito Minero a partir de [26].

Sustancia	Concentración $\frac{\text{sustancia [kg]}}{\text{mezcla[kg]}}$
SiO ₂	0,4991
Al ₂ O ₃	0,1454
Fe ₂ O ₃	0,0907
MgO	0,0783
CaO	0,1116
Na ₂ O	0,0161
TiO ₂	0,0073
MnO	0,0016
H ₂ O	0,05
Ag	9,1*10 ⁻⁷
Au	5,41*10 ⁻⁷

Es de aclarar que se determinan las concentraciones del depósito minero como una ponderación entre los estudios de la zona y la producción anual de oro y plata, ya que solo se tienen los datos promedios de producción de dore al año mas no el estudio del suelo del punto de operación; datos que son útiles al momento de valorar su capital natural en términos de exergía.

3. Análisis de ciclo de vida (ACV).

La definición oficial de Análisis de ciclo de vida (ACV) esta dictaminada por la norma **ISO 14040 Gestión ambiental -Análisis de Ciclo de Vida - Principios y Marco de Referencia**. La cual menciona que “*el ACV es la recopilación y evaluación, de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de sus etapas consecutivas e interrelacionadas, desde la adquisición de materia prima o su generación a partir de sus recursos naturales, hasta su disposición final*” [27]. Definición que otorga un grado de complejidad para entender el ACV, por lo que organismos notorios en el tema, se han encargado de desarrollar su propio enunciado. La **Sociedad de Toxicología y Química Ambiental** (SETAC por sus siglas en inglés) por ejemplo, describe el **ACV** como “*Un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso del material y los vertimientos al entorno; para determinar el impacto que ese uso de los recursos y sus vertimientos generan en el ambiente y así evaluar con criterio llevando a la práctica estrategias de mejora ambiental. Donde el estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de: extracción, procesado de materias primas, producción, transporte distribución, uso, reutilización mantenimiento, reciclado y disposición del residuo*” [28]. Por otra parte, el autor Antón Vallejo define el ACV como “*Un tipo de contabilidad ambiental en la que se cargar a los productos los efectos ambientales adversos, debidamente cuantificados, generados a lo largo de su ciclo de vida*” [29].

Actualmente se vive en una era donde se pueden definir los gustos y preferencias, logrando ideales para vivir de una manera sostenible donde se utilicen los recursos naturales de la madre tierra a un ritmo que permitan su renovación. Pero el estilo de vida, el crecimiento económico y el desarrollo de las tecnologías en las últimas décadas; aportan grado de confort que impulsa la demanda de recursos, energía, productos y servicios. En consecuencia, estos modelos de producción contribuyen al calentamiento global, el agotamiento de los recursos naturales, depreciación de los suelos, agotamiento del agua, pérdida de biodiversidad, etc. Por lo que son modelos insostenibles de producción y consumo, generando daños irreversibles que afectan cada vez más el ambiente, la sociedad, la economía y las empresas [30].

Por lo que el **ACV** se considera como un medio para identificar oportunidades, sopesarlas según sus riesgos y tomar decisión oportuna que permita seleccionar un producto u otro teniendo en cuenta criterios medioambientales, sociales y económicos. “*Siendo el ACV una*

forma de pensar que ayuda a reconocer la manera en que nuestras acciones forman parte de un gran conjunto de actos que influyen notablemente en la sostenibilidad” [31]. Logrando así una perspectiva que ayuda a visualizar la cadena que conforma el ciclo de vida del producto como un sistema lleno de oportunidades de mejora, donde cada componente tiene una responsabilidad específica.

El ciclo de vida de un producto se aclara en la Figura 10, mostrando la transformación del producto desde la adquisición de las materias primas necesarias para su fabricación, hasta su disposición final como residuo. Involucrando las entradas de materias primas y energía necesaria para su fabricación, distribución, uso y disposición final, al igual que las salidas como emisiones y productos útiles. Completando con esto el ciclo de que las materias primas y la energía que se extraen del medio, regresan al él en su forma original o transformadas según sea el caso (emisiones y residuos).



Figura 10. Ciclo de vida de un producto [32] [33].

Por lo que para cuantificar cual es el impacto al ambiente, es necesario tener claridad acerca de los recursos utilizados y los residuos que se generan para la fabricación o extracción de un producto. Lo que concluye que el ciclo de vida considera toda la historia del producto desde su origen como materia prima, hasta su fina como residuo; teniendo en cuenta todas las fases intermedias como el transporte, materia prima, maquinaria, preparación de materias primas, manufactura, distribución, uso, etc. Por ende, en un **ACV** completo se atribuyen a los productos todos los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas, energía,

uso de maquinaria y procesos, al igual que los efectos ambientales procedentes del producto cuando es consumido y desechado [32][33].

Es necesario recalcar que el **ACV** permite tener un modelo simplificado de un sistema de producción y de los impactos ambientales asociados, sin embargo, no pretende entregar una representación absoluta de cada interacción ambiental. Ya que, a pesar de comprender todo el ciclo de vida de un producto existen casos en lo que resulta difícil o complejo abarcar todas las actividades desde la “cuna hasta la tumba”, a causa de los diferentes usos o trazabilidad que se le pueden dar al producto, por lo que se debe establecer con claridad los límites del sistema.

3.1. Metodología de un ACV.

El **ACV** está regido por la **Norma Internacional ISO 14040: Gestión ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Requisitos y Directrices** [34]. Que determina los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto, mediante:

- La recopilación de inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema del proceso o producto en estudio.
- La evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados con las entradas y salidas identificadas en el inventario.
- La interpretación de resultados de las fases de análisis de inventario y evaluación de impactos en concordancia con los objetivos de estudio.

De acuerdo con la **Norma ISO 14040**, el **ACV** se divide en 4 etapas interrelacionadas.

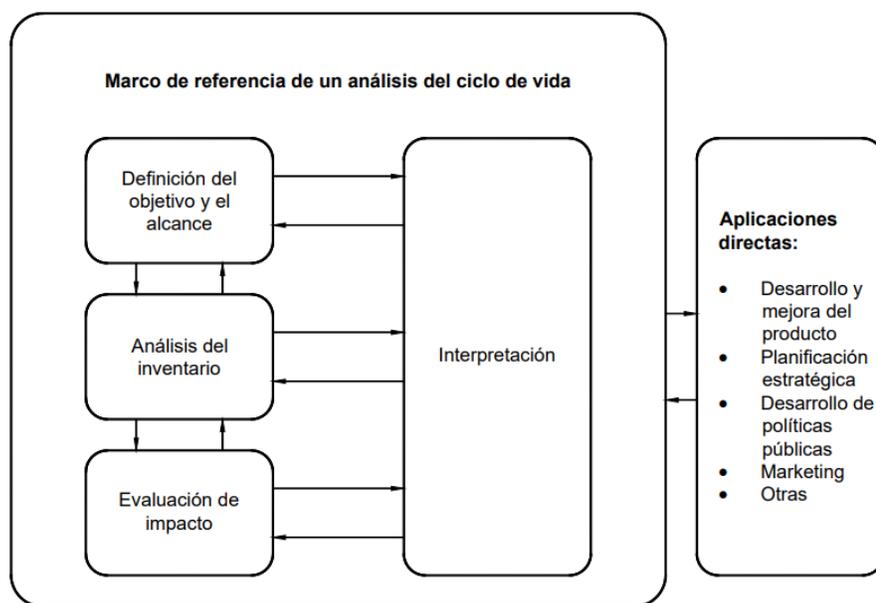


Figura 11. Marco de referencia de un ACV [34]

Donde:

- i. **Definición de objetivos y alcances:** Consiste en determinar los límites del sistema y el nivel de detalle; la profundidad y amplitud del **ACV** puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un **ACV** en particular.
- ii. **Análisis del inventario del Ciclo de Vida (ICV):** Consiste en determinar mediante un inventario las entradas y salidas en relación con el tema bajo estudio, e implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir con los objetivos del estudio definido.
- iii. **Evaluación del impacto ambiental del Ciclo de Vida (EICV):** El objetivo de esta fase es el de proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario de ciclo de vida, a fin de comprender mejor su importancia ambiental.
- iv. **Interpretación:** Consiste en dar un resumen y discutir los resultados de la **fase ii)** o la **fase iv)** o de ambos, como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con los objetivos y alcances definidos.

En la Figura 11 se muestra el marco de referencia del **ACV** en sus cuatro fases, donde una se retroalimenta o interactúa con el resto; por lo que la interpretación de resultados se debe realizar en cada una de ellas, lo que conlleva a una redefinición del alcance a lo largo del análisis y asegurar así coherencia e integridad en los resultados. De igual manera, muestra algunas aplicaciones directas que se le puede dar a los resultados obtenidos en el **ACV** como

lo son el desarrollo y mejora de producto, planificación estratégica, desarrollo de políticas públicas, márketing, etc.

A causa de la naturaleza global del **ACV** que abarca todo el ciclo de vida del producto, este podría ser interminable, por lo que se deben establecer los alcances o su extensión; por ende, la definición de los límites del sistema a estudiar es una de las etapas críticas del **ACV**, por tanto, se consideran los siguientes aspectos:

- a. **Función del sistema:** Se deben describir las funciones que definen el sistema o estudio. Esto a causa de que el producto puede cumplir varias funciones o finalidades, por lo que el análisis se puede simplificar a una o varias de estas funciones.
- b. **Función o unidad funcional:** La unidad funcional es la base de cálculo sobre la cual se relacionan o comparan los balances de materia y energía (Unidad de referencia), generalmente la unidad funcional está ligada a la cantidad de producto útil fabricado [34] [35].
- c. **Límites del sistema:** Definir el alcance y los límites supone realizar un estudio cuyo nivel de detalle varía según la precisión marcada en los objetivos, donde el analista debe decidir si es necesario cubrir todas las etapas del ciclo de vida del producto o por el contrario analizar solo algunas etapas y lograr así los objetivos planteados.

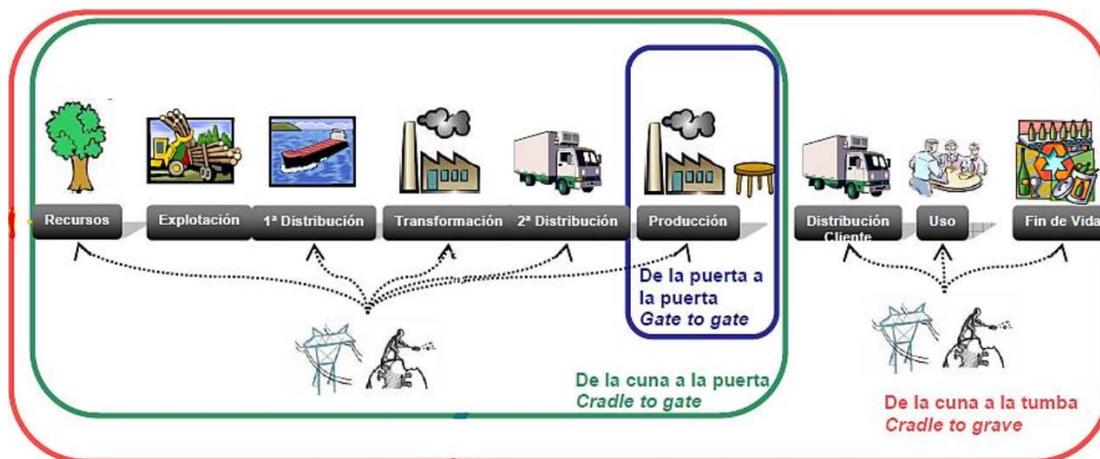


Figura 12. Variantes del **ACV** [31].

En la Figura 12 se muestran los límites o variantes de análisis comúnmente implementados en el **ACV**, análisis de puerta a puerta (recuadro azul), análisis de cuna a puerta (recuerdo verde) y el análisis de cuna a tumba (recuadro rojo). Donde cada recuadro en la figura enmarca los límites para cada variante del **ACV**, en el cual se tiene que:

- i. Análisis de cuna a tumba o “**cradle to grave**”: comprende todo el ciclo de vida sin obviar ninguna fase (extracción, transporte, fabricación, construcción, uso, disposición final).
- ii. Análisis de cuna a puerta o “**cradle to gate**”: comprende el ciclo de vida hasta la fabricación del producto y disposición para uso o instalación (producto terminado hasta la puerta de la fábrica), eliminando del análisis las fases distribución, uso, y disposición final.
- iii. Análisis de puerta a puerta o “**gate to gate**”: Inicia cuando las materias primas están en condiciones de ser transformadas y finaliza con el producto listo para su uso o instalación, centrándose solo en la fase de fabricación. leído

3.2. Umberto NXT Universal, como Software para el ACV.

Para el **ACV** en esta investigación se emplea el software **Umberto NXT** [36]; esta herramienta desarrollada por Ifu Hamburg, es un software de **ACV** versátil que le permite calcular y evaluar las emisiones e impactos ambientales del ciclo de vida de un producto. También se puede usar como herramienta para el cálculo de las Declaraciones de Productos Ambientales (EPD) y las Huellas Ambientales del Producto (PEF) al igual que se puede utilizar para encontrar huellas de carbono y el indicador de Demanda de Exergía Acumulada **CExD**; adicional se integra y comunica fácilmente con la metodología de categorías de impacto ambiental **ReCiPe** y la base de datos de **Ecoinvent 3.0**; que contiene tanto casos de estudios de otros proyectos mineros en el mundo para su posterior comparación, al igual que la data suficiente para dar profundidad al caso de estudio y llevarlo de cuna a puerta.

3.3. Método de impacto ambiental ReCiPe.

Existen diversas metodologías para convertir el Inventario de Ciclo de Vida **ICV** en categorías de impacto ambiental e indicadores ambientales, pero entre las más usadas se encuentra el método **ReCiPe**. El cual cuenta con un enfoque en las agrupaciones de inventario midpoints y endpoints, con un ámbito geográfico global y un horizonte temporal de evaluación de impactos de 20 a 100 años, además cuenta con la equivalencia de 3000 sustancias y cubre las fases otorgadas por la norma para el **ACV** [31] [37] [38].

El método **ReCiPe** creado por RIVM, CML, PRé Consultants, Radboud Universiteit, Nijmegen y CE Delft, publicado en el 2008 e internacionalmente aceptado. Se desarrolla para combinar las ventajas de los métodos CML2001 y Eco-Indicator 99; donde La ventaja del método CML

es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicador 99 es su facilidad de interpretación [37].

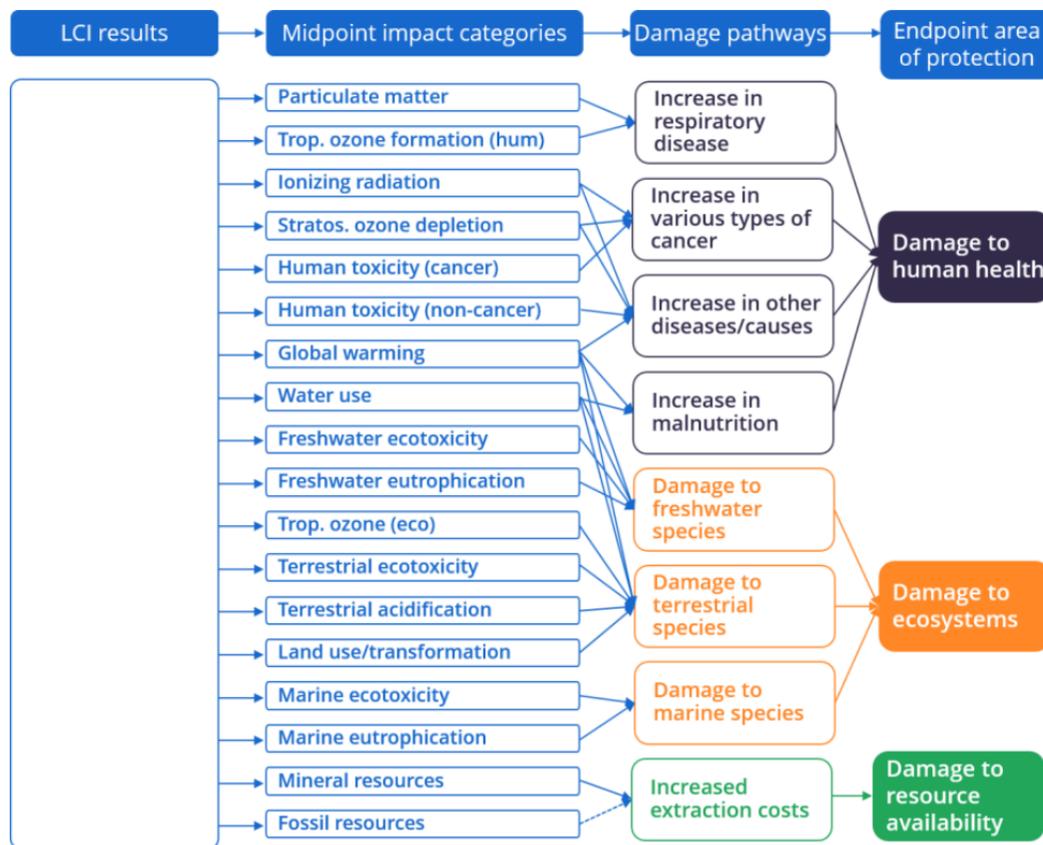


Figura 13. categorías de impactos “midpoints” y “endpoints” [37]

ReCiPe Integra el enfoque orientado al problema ambiental y el orientado al daño, mostrando así, dos grupos de categorías de impacto: uno de puntos intermedios (midpoints), que incluye 18 categorías: cambio climático, disminución de la capa de ozono, toxicidad humana, formación de oxidantes fotoquímicos, formación de material particulado, radiación ionizante, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, eutrofización marina, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad marina, ocupación de terreno agrícola, ocupación de terreno urbano, transformación de terreno natural, disminución de cantidad de agua dulce, disminución de recursos minerales y disminución de combustibles fósiles. Y otro de puntos finales (endpoints) que incluye tres categorías enfocadas en áreas de protección: salud humana, ecosistemas y aumento del coste de recursos.

Esto se evidencia en la Figura 13, donde gráficamente simplifica el inventario en agrupaciones de interés, su complejidad radica en la cantidad de datos a agrupar. Por ejemplo, al quemar combustible se emite una mezcla gases y calor al medio; de la mezcla de gases se puede decir que algunas sustancias interactúan con el medio, contaminando el agua, el suelo, se esparcen en el aire, etc. Estas interacciones se agrupan en categorías **MindPoints** según su estándar en las 18 categorías antes mencionadas y luego se reagrupan en categorías **Endpoints**, por lo que se debe contar con los suficientes datos para agrupar cada sustancia en una categoría en cualquiera de las dos etapas (mindpoints o endpoints) y sus equivalentes en unidades. Sin tener en cuenta que para el ejemplo anterior no se realizó el análisis desde la producción del combustible y transporte del combustible, aumentando la complejidad del análisis.

*Es de recalcar que “en el enfoque de puntos intermedios (**mindpoints**) la incertidumbre de los datos es baja, es decir, los resultados son más fiables y precisos, pero resulta ambigua o difícil de interpretar para audiencias no técnicas. En el enfoque de puntos finales (**endpoints**) la incertidumbre en los datos es alta, pero los resultados son más fáciles de interpretar.” [37].*

4. Exergía.

Una ley fundamental de la naturaleza (la primera ley de la termodinámica), indica que la energía y la materia no pueden ser creadas ni destruidas. Mientras que la segunda ley impone límites adicionales a las transformaciones de energía y refleja características cualitativas, afirmando que la energía solo puede ser transformada por el consumo de calidad a nivel local, donde la calidad puede mejorarse, pero esto solo puede ocurrir a costa de un mayor deterioro de la calidad o desorden de la calidad (entropía) en otros lugares. Por lo tanto, la segunda ley de la termodinámica sugiere que, en todos los procesos reales de transformación de energía la entropía total de todos los cuerpos involucrados solo puede aumentar o en un caso ideal, permanecer sin cambios, fuera de estas condiciones, es imposible incluso si se cumple la primera ley [1]. De manera que la combinación de ambas leyes indica que no se trata de la cantidad de masa o energía existente, sino de la calidad de esa masa o energía, en otras palabras, depende de su **contenido de exergía**.

El concepto de exergía comenzó a ser introducido hace dos siglos cuando Sadi Carnot, quien en 1824 desarrolló el primer trabajo en el que estableció las bases del Segundo Principio de la Termodinámica, por medio de la idea de cuantificar el trabajo máximo que podía ser obtenido en las máquinas de vapor. Los primeros enunciados de la Segunda Ley de la Termodinámica fueron propuestos por Clausius en 1850, Kelvin y Planck en 1897 y más formalmente por Carathéodory en 1909. Entretanto, Gibbs y Maxwell en la segunda mitad del siglo XIX, continuando con el trabajo de Carnot, dieron forma al concepto de energía disponible, que definieron como la propiedad por la cual se mide la capacidad de causar cambios, debido al desequilibrio con el medio ambiente de la respectiva sustancia analizada [39].

De ahí que la exergía se define como el trabajo máximo que puede ser obtenido cuando una cantidad de materia es llevada al estado de equilibrio con su entorno mediante una secuencia de procesos reversibles [1] [39] [4]. Por consiguiente, esta magnitud, también es conocida como disponibilidad (*availability*) o potencial máximo de trabajo de una sustancia o flujo, cuando se definen los alrededores y el ambiente en el cual se encuentra.

Tabla 7. Comparación ente energía y la exergía [3].

Energía	Exergía
Es una función de estado. Depende de las propiedades de la sustancia analizada y no depende de los parámetros del ambiente	Es una función de estado, es función de las propiedades de la sustancia y también de los parámetros del medio ambiente
Puede tomar valores arbitrarios dependiendo del sistema de referencia.	Puede ser igual a cero en el estado del ambiente de referencia (estado muerto). El ambiente de referencia también puede ser variable
Obedece la ley de conservación en todos los procesos y solo puede ser transformada. No puede ser destruida	Obedece la ley de conservación solamente en procesos reversibles; en procesos irreversibles es parcial o totalmente destruida
La interacción de tipo calor está limitada al ser convertida en trabajo	La transferencia de exergía asociada al calor es equivalente a la interacción tipo trabajo
Incrementa con el incremento de la temperatura	En procesos isobáricos, puede alcanzar un mínimo a la temperatura del medio ambiente. Por debajo del medio ambiente, se incrementa a medida que la temperatura se reduce.
En el caso de un gas ideal, no depende de la presión	Siempre depende de la presión, sin importar si se trata o no de un gas ideal
Para un vacío ideal, es nula	Para un vacío ideal, es positiva

La Tabla 7 compara la energía con la exergía mostrando un contraste entre los principales aspectos; por una parte, se tiene que la energía es un balance conservativo para cualquier caso, mientras que la exergía solo obedece a este principio para los procesos reversibles. Esto se debe a que la exergía también se puede interpretar como una combinación entre la primera y la segunda ley de la termodinámica, por lo que es importante distinguir entre exergía y energía para evitar confusiones con los métodos tradicionales de análisis y diseño de sistemas térmicos basados en energía.

4.2. La importancia de un análisis de exergía.

¿Porque el análisis de procesos industriales basado en la Primera Ley de la Termodinámica no resulta ser suficiente para la evaluación de procesos y sistemas térmicos?

La respuesta radica en la diferencia entre la *cantidad* de la energía y su *calidad*. Los conceptos de la primera ley de la termodinámica están centrados en un principio que garantiza la conservación de la energía, pero que no establece una dirección en la cual dicha transformación puede proceder de forma espontánea, o si existen requerimientos y limitaciones adicionales para transformar un tipo de energía en otro. La Segunda Ley de la Termodinámica, por otro lado, sugiere que los procesos naturales ocurren en una dirección, en la cual, en últimas, incrementa la entropía total del sistema y sus alrededores [3].

Por lo tanto, es una técnica eficiente para revelar si es o no es posible, y en qué medida, diseñar sistemas energéticos más eficientes por medio de la reducción de las ineficiencias del sistema (irreversibilidades o entropía generada), tomando en cuenta el efecto que tiene la producción de entropía en el aprovechamiento óptimo de los recursos energéticos en los procesos reales. De acuerdo con Szargut: “...con la ayuda de la exergía es posible establecer una economía ecológica con el propósito de reducir el consumo de los recursos naturales” [4]. De hecho, la exergía permite la identificación de procesos o fenómenos específicos que son responsables por la mayor cantidad de exergía destruida o irreversibilidades; comprender por qué esas pérdidas ocurren y como varían con la variación de los parámetros y la configuración del sistema; y finalmente, sugerir formas de mejoras. En consecuencia, la exergía proporciona información útil dentro de la contabilidad de recursos y puede abordar adecuadamente ciertas preocupaciones ambientales.

4.3. Alrededores, ambiente de referencia y estado muerto.

Por definición, los alrededores son todo aquello que está por fuera de las fronteras del sistema; los alrededores inmediatos son la porción de los alrededores que es afectada por el proceso y el ambiente es la región que se encuentra más allá de los alrededores inmediatos, cuyas propiedades pueden ser consideradas constantes y no afectadas por el proceso.

El estado muerto restringido es aquel estado en el cual la presión y la temperatura son iguales a las del ambiente, mientras que la velocidad y la elevación del sistema con relación al nivel de referencia del ambiente son nulas. Además, no existen potenciales de trabajo como tensiones superficiales, ni efectos electromagnéticos o eléctricos. Las propiedades del estado muerto restringido se representan con el subíndice (o): $P_o, T_o, h_o, s_o, u_o, B_o, V_o$. Por otro lado, el estado muerto absoluto es aquel para el cual se satisfacen las mismas condiciones del estado muerto restringido y, además, el sistema se encuentra en equilibrio químico con el ambiente, o sea, la composición y la concentración del sistema no producen ningún tipo de trabajo asociado al potencial químico o a la diferencia entre las presiones parciales de los componentes del sistema y del ambiente. En otras palabras, “*el estado muerto absoluto es un planeta termodinámicamente muerto donde todos los materiales han reaccionado, se han dispersado y se han mezclado*” [1]. La atmósfera, por ejemplo, posee una gran cantidad de energía, pero al encontrarse en el estado del ambiente su exergía es cero. Por lo que la exergía al ser definida como el trabajo máximo que un sistema puede desarrollar al evolucionar hasta el estado de equilibrio termo mecánico y químico con el ambiente es una propiedad de la combinación entre el sistema y el estado de referencia y no exclusivamente del sistema.

Así, una vez definido el medio ambiente o estado de referencia, la exergía puede ser considerada una propiedad del sistema [40].

Dicho de otra forma, “la exergía de cualquier sustancia o proceso siempre está fijada por el llamado Ambiente de Referencia (**A.R.**). Por tanto, para calcular la exergía de cualquier recurso natural es necesario definir un **A.R.** apropiado” [1].

4.4. Formas de exergía y sus interacciones.

Dependiendo del caso de estudio, una o todas las formas de exergía resultan importantes en la evaluación exergética de procesos. Donde ausentes los efectos de orden nuclear, magnético, eléctrico y de tensión superficial; la exergía total de un sistema B^T se compone generalmente de: la exergía física, B^{PH} , la exergía cinética, B^K , la exergía potencial, B^P , y la exergía química, B^{CH} [4].

$$B^T = B^{PH} + B^K + B^P + B^{CH} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Todas las formas de exergía son importantes, pero bajo ciertas hipótesis es posible despreciar los términos de menor orden de magnitud como en el caso de combustibles industriales o mezclas de sustancias, donde se desprecian los efectos de la exergía cinética, la potencial, o incluso la exergía física, en comparación con los efectos de la exergía química. En otro orden de ideas, el efecto de la exergía cinética no puede ser despreciado en el estudio de toberas y difusores o en la evaluación del rendimiento de aeronaves a reacción, donde el incremento de la exergía cinética de los gases expelidos a alta velocidad es el efecto deseado.

4.4.1. Exergía cinética

La exergía cinética corresponde o es equivalente a la energía cinética, porque esta forma de energía puede convertirse completamente en trabajo [41]. La expresión que determina la exergía asociada a la energía cinética viene dada por:

$$B^K = m \frac{v^2}{2} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Siendo v la velocidad relativa del sistema con respecto a un sistema de referencia estático en el ambiente.

4.4.2. Exergía potencial

Al igual que pasa con la exergía cinética, la exergía potencial también equivale a la energía potencial, ya que esta forma de energía puede convertirse completamente en trabajo [39][41]. Por lo que la expresión viene dada por.

$$B^P = mgz \quad \text{Ecuación 3.}$$

Siendo g la aceleración gravitacional y z la elevación del sistema con relación a un nivel de referencia en el ambiente

4.4.3. Exergía física

La exergía física es equivalente al trabajo máximo que se puede realizar cuando un sistema o un caudal se mueve desde un estado termodinámico dado, al estado de referencia donde se encuentra en equilibrio térmico y mecánico con el entorno [39][41]. Para un sistema, la exergía física viene dada por:

$$B^{PH} = \Delta U + P_0 \Delta V - T_0 \Delta S \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde P e P_0 son respectivamente la presión absoluta del sistema y la presión atmosférica, T_0 es la temperatura del medioambiente, ΔU y ΔS son los cambios de energía interna y de entropía respecto al estado de referencia.

Es importante recalcar, que aun cuando se asume que el sistema alcanza el equilibrio termodinámico con el ambiente por medio de procesos reversibles, la determinación de la exergía física es independiente del tipo de proceso y de la naturaleza de las interacciones del sistema con los alrededores, a causa de ser una propiedad, la exergía solamente es función de los estados inicial y finales especificados, es decir, es una función de estado (una propiedad del sistema).

4.4.4. Exergía química

Para efectos prácticos, el ambiente puede ser considerado como un medio que sufre procesos internamente reversibles y no experimenta variaciones en sus propiedades. Generalmente, es modelado como un sistema compresible simple, extenso y uniforme. De esta forma, este ambiente conceptual no posee ningún gradiente de presión o temperatura, ni exergía química, cinética, potencial o electromagnética. Por lo tanto, no existe la menor posibilidad de producir trabajo proveniente de cualquier forma de interacción entre las partes del ambiente. En la práctica del análisis exergético se utiliza un ambiente de referencia A.R. con el fin de evaluar la exergía.

Se dice que un sistema y el ambiente se encuentran en estado de equilibrio termo-mecánico cuando la presión y la temperatura del sistema son iguales a la presión y la temperatura del ambiente, es decir, para una composición y una concentración de especies dadas, el sistema sufre un proceso desde el estado (P, T) hasta alcanzar el estado muerto restringido, dado por las condiciones (P_o, T_o) . El máximo trabajo que puede ser realizado al llevar el sistema entre esos dos estados fue definido como la exergía física del sistema. Sin embargo, aún en el estado muerto restringido, cuando la composición o concentración de los componentes del sistema son diferentes de las condiciones en el ambiente, el sistema es capaz de producir una cantidad de trabajo útil, denominado como exergía química. La cual puede ser definida como el trabajo mínimo necesario para producir una cantidad de determinada materia a partir de las sustancias presentes en el ambiente por medio de procesos reversibles [2]. En otras palabras, si los componentes del sistema a (P_o, T_o, μ_i) pueden interactuar con los componentes del ambiente a (P_o, T_o, μ_i^e) , es posible producir una cantidad de trabajo adicional por medio de reacciones químicas, cambios de concentración en las sustancias y procesos reversibles.

Por lo que el cálculo de la exergía química tiene en cuenta únicamente el cambio de concentración de los componentes de las sustancias consideradas [2]. Y cuya expresión matemática está representada por:

$$B^{ch} = nT_oR\sum y_i \ln \left(\frac{y_i}{y_{oi}} \right) \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

n : Cantidad de moles de la sustancia

R : Constante universal de los gases

y_i, y_{oi} : Fracción molar de las sustancias consideradas y el estado de referencia.

Por último, para determinar la exergía química de una mezcla de gases o soluciones ideales, es empleada la Ec. 6

$$\bar{b}_{mix}^{CH} = \sum y_i \cdot b_i^{CH} + R_u T_0 \sum y_i \ln(y_i) \quad \text{Ecuación 6.}$$

Siendo b_i^{CH} la exergía química estándar de la sustancia i a las condiciones P_0 y T_0

4.4.5. Exergía química estándar.

El medio ambiente puede ser modelado como un conjunto de sustancias en equilibrio que existen de forma natural y en concentraciones específicas [39]. Con el objetivo de impedir la posibilidad de desarrollar trabajo a partir las interacciones entre las diferentes sustancias del ambiente, las sustancias de referencia deben estar en equilibrio mutuo. Estas sustancias poseen una concentración estándar que pretende modelar de la forma más exacta posible la composición química del ambiente, clasificándolas en tres tipos (Ver Figura 14): los componentes gaseosos de la atmósfera terrestre, las sustancias sólidas de la costra terrestre y las sustancias iónicas y no iónicas de los océanos

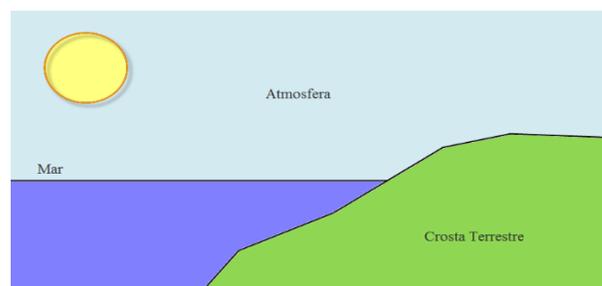


Figura 14. Sustancias de referencia en la atmósfera [4]

La definición de un estado de referencia estándar y la exergía química estándar de los componentes del ambiente, permite una aplicación general del método exergético en los procesos químicos y en los procesos que involucran interacciones químicas con el medio ambiente. En síntesis, la exergía química estándar hace alusión a la exergía de la sustancia

en el estado de referencia unificado a causa de las diferentes concentraciones que puede tener una misma sustancia en un estado ambiental de referencia extenso, como lo es la tierra.

4.4.6. Estado ambiental de referencia (A.R)

Como se mencionó anteriormente, en el estado de referencia se asume como un entorno termodinámicamente muerto, donde todos los materiales han reaccionado, se han dispersado y se han mezclado. Este estado de referencia debe ser determinado por el ambiente natural y es fijado por su composición química. Donde las divergencias entre las exergías químicas estándar de los elementos obtenidos de diferentes **A.R.** Genera diferentes exergías, de esta manera la determinación de la exergía del capital natural está necesariamente vinculada a la definición y las propiedades termodinámicas del **A.R.** Por lo anterior, la concepción del estado de referencia se puede dividir en dos grupos principales:

4.4.6.1. Entornos de referencias parciales

Este criterio se basa en que la exergía es un parámetro que cuantifica la evolución teórica de un sistema con respecto al **A.R.** algunas de las posibles evoluciones del sistema, no se pueden lograr debido a las limitaciones. Por lo tanto, solo se analizan las posibilidades de evolución que el sistema puede alcanzar. Mientras que la concepción de estos **A.R.** están muy alejados de la idea de la tierra degradada [1].

Como el caso a evaluar en esta tesis incluye el capital natural del material extraído, no hay limitaciones de proceso y los recursos pueden seguir un proceso de evolución hacia el estado muerto, por lo que se requiere un estado de referencia completo.

4.4.6.2. Entornos de referencias integrales

Entre los entornos de referencia completos o integrales, diferentes autores coinciden en dividir las sustancias de referencia (Reference Substances **R.S**) que componen el **A.R.** en componentes gaseosos, componentes sólidos de la capa externa de la corteza terrestre y componentes moleculares del agua de mar.

Szargut, por ejemplo, propone un **A.R.** basado en la abundancia y estabilidad de la sustancia en la tierra, donde entre un grupo de sustancias razonablemente abundantes, se elegirá la más estable, siempre y cuando cumpla con el "criterio de similitud de la tierra". Es decir, si la estabilidad de las posibles sustancias de referencia diferentes para un elemento específico

(medido en términos de la energía de Gibbs de la formación) está dentro de un cierto umbral, entonces se elige la **R.S.** más abundante. Pero si las diferencias exceden este umbral, la sustancia más estable se tomará como **R.S.** por lo que mientras no se contradiga el "criterio de similitud de la tierra". El umbral de estabilidad no tiene un valor fijo y depende de cada elemento considerado, ya que está sujeto a incertidumbres geológicas. Así, por ejemplo, en el caso de Sb, la sustancia Sb_2S_3 es más abundante que Sb_2O_5 , sin embargo, según el criterio de Szargut, Sb_2O_5 , que es mucho más estable, se tomará como sustancia de referencia [1] [4] [2].

Por otra parte, se tiene el criterio de abundancia de Ranz [42]. Quien propone una nueva **A.R.** muy cerca del entorno real basado en la abundancia y siguiendo la metodología de Szargut. Entabla que las especies de referencia sólidas que conforman este ambiente son las mismas que las de los tipos más abundantes que se encuentran en la corteza continental superior de la tierra. *"Un problema con la propuesta de Ranz de A.R. Es que, si asignamos exergía cero a las sustancias más abundantes, estamos disminuyendo arbitrariamente el capital natural, porque muchos minerales abundantes como los sulfuros evolucionan naturalmente a los óxidos más estables"* [1]. Por lo tanto, se debe volver al criterio de Szargut, de usar la sustancia más estable, dentro de los límites fijados por el "criterio de similitud de la tierra".

4.5. La Exergía de los recursos minerales

La autora A. Valero [1], resume las principales metodologías utilizadas para calcular las propiedades termodinámicas de los minerales más abundantes en la corteza superior de la tierra en la *Figura 15*. En la cual solo se nombra el método, se le asigna un número de consecutivo y se dan los errores máximos supuestos asociados a cada método.

Method	Nr.	±Error, %
Calculation of ΔH_f^0 or ΔG_f^0 from s^0	1	0
The ideal mixing model	2	1
Thermochemical approximations for sulfosalts and complex oxides	3	1
The method of corresponding states	4	1
The method of Chermak and Rimstidt for silicate minerals	5	1
The ΔO^{-2} method	6	1
The ΔO^{-2} method for hydrated clay minerals and for phyllosilicates	7	0,6
The ΔO^{-2} method for different compounds with the same cations	8	1
Assuming ΔS_r , zero	9	5
The element substitution method	10	5
The addition method for hydrated minerals	11	5
The decomposition method	12	10

Figura 15. Resumen de las metodologías usadas para calcular las propiedades termodinámicas de los minerales [1].

De la Figura 15 se recalca que, con el modelo de mezclas ideales se puede calcular la exergía del capital natural de la corteza superficial terrestre, este modelo se describe en el apartado de 4.4.4 Exergía química. Donde “el error asociado al supuesto del mineral como una solución sólida e ideal, varía con mineral considerado y disminuye con el desorden entre los componentes, asumiendo un error máximo de $\pm 1\%$.” [1].

4.5.1. Análisis Termo-económico y Exergo-económico

Un análisis termo-económico es aquel que combina el análisis exergético y los conceptos económicos, en especial los costos de las materias primas, los recursos energéticos y los productos. Mientras que un análisis exergo-económico es aquel que solo emplea los costos exergéticos; donde se pretende mediante factores adimensionales de exergía $\left[\frac{\text{Exergía}}{\text{Exergía}}\right]$ cargar a los productos la exergía destruida del proceso, mostrando así, que tan costoso son en términos exergéticos y económicos, los productos útiles.

Desde el punto de vista de los procedimientos de modelado, simulación y optimización de los sistemas de energía, el análisis termo-económico o el análisis exergo-económico agrega básicamente, dos conjuntos de ecuaciones: los saldos de costos para componentes, equipos o procesos y los criterios de partición de costos basados en exergía [41]. El análisis se realiza en tres pasos:

- Análisis de exergía detallada y análisis económico de los componentes y del sistema en general
- Costes de exergía
- Evaluación exergoeconómica de cada componente y del sistema global.

Es de recalcar que cuanto más detallados sean los balances de costos, mejores serán los resultados proporcionados por el análisis termo-económico o exergo-económico. También es de mencionar que la información generada por el análisis termo-económico, es diferente de la provista por los métodos tradicionales utilizados para evaluar la viabilidad económica de los proyectos de ahorro de energía, como los que determinan, el valor presente neto (**VAN**), la tasa interna de rendimiento (**TIR**), y el periodo de amortización. El análisis termo-económico permite determinar los costos de producción en función de la calidad de los procesos de conversión de energía utilizando un criterio racional de distribución de costos a lo largo de los procesos, que es el valor termodinámico de cada producto o su exergía [41]. Igualmente se recalca que el análisis exergo-económico se puede interpretar como un análisis previo al termo-económico, ya que el primero solo valora el sistema en términos exergéticos sin agregar ningún valor económico al sistema.

4.5.2. Balance de costos termo-económicos.

El balance de costos en termo-economía se puede explicar mediante volumen de control, donde se tiene un proceso operando en estado estable [41].

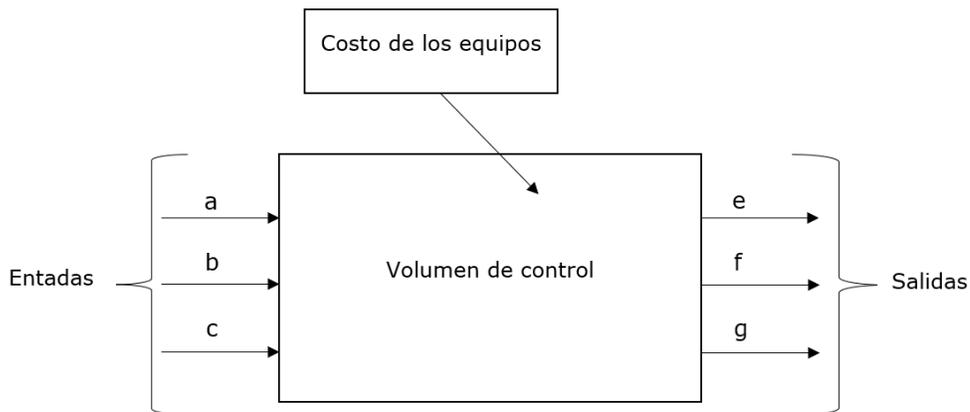


Figura 16. Volumen de control para el balance de costos [41]

En la Figura 16 representa un volumen de control que incorpora el costo de los equipos del proceso, con las entradas a, b y c (insumo como; combustibles, electricidad, agua, aire, materias primas, etc.) y los productos e, f y g (productos como; vapor, agua refrigerada, electricidad, potencia mecánica, etc.) el balance de costos se realiza mediante la siguiente ecuación.

$$C_a + C_b + C_c + C_{equipo} = C_e + C_f + C_g \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde cada termino en la Ecuación 7. tiene la dimensión de costo por unidad de tiempo (\$/s). Como ocurre para los balances de masa, energía y exergía en condiciones de estado estable, el costo unitario promedio, c_i , esta de finido por la siguiente ecuación.

$$c_i = \frac{C_i}{N_i} \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde N_i puede ser una cantidad como flujo másico, flujo volumétrico, tasa de energía, tasa de exergía. Por lo que al despejar los costos (C_i) y reemplazar la Ecuación 8 en Ecuación 7 se obtiene la Ecuación 9.

$$c_a N_a + c_b N_b + c_c N_c + C_{equipo} = c_e N_e + c_f N_f + c_g N_g \quad \text{Ecuación 9.}$$

Cuando el sistema presenta más de un producto, como se muestra en la Figura 17, los valores de C_e , C_f y C_g no pueden determinarse solo por la ecuación de balance de costos, por lo que son necesarias ecuaciones adicionales basadas en un criterio de partición de costos como:

- Los productos son de uso exclusivo para el sistema a analizar.
- Los productos serán vendidos en el mercado.
- Un proceso se considera "producto primario" del proceso.
- se considera que un producto es un "subproducto" del proceso, etc.

Para el caso en el que solo hay un producto en el proceso, el balance de costos determina el valor de los costos promedios unitarios.

En el caso de exergo-economía, se plantea el mismo análisis con la diferencia de que no se piensa en términos económico, solo en costo exergético. Pero las bases de cálculo son similares a las empleadas en esta sección de balance de costos, por lo que los valores unitarios vienen dados por unidades adimensionales de exergía/exergía.

4.5.3. Balance de costos exergeticos.

La exergía necesaria para fabricar un producto funcional dependerá del proceso de fabricación. Por lo que el costo exergetico se entiende como la cantidad real de exergía necesaria para obtener dicho producto, por lo que en este balance no se tienen en cuenta los costos monetarios del proceso.

Por tanto, para todo producto se cumple que:

$$\text{Costo Exergetico } (BC_i) > \text{Exergía } (B_i) \quad \text{Ecuación 10.}$$

Dada la similitud en el balance de costos Exergo-económico y Termo-económico, se puede usar la Figura 16 como volumen de control sin considerar los costos monetarios de operación, solo en términos de entradas y salidas de exergía, por lo que a ecuación de costos exergeticos viene dada por:

$$BC_a + BC_b + BC_c = BC_e + BC_f + BC_g \quad \text{Ecuación 11.}$$

Es de notar en la Ecuación 11 no considera la destrucción de exergía, ya que el costo exergetico del producto contienen las ineficiencias del sistema.

$$K_i = \frac{BC_i}{B_i} \quad \text{Ecuación 12.}$$

Donde K_i es el costo exergetico Unitario adimensional, por lo que al despejar el costo exergetico de la Ecuación 12 y sustituirla en la Ecuación 11 se tiene que:

$$(K_a) * (B_a) + (K_b) * (B_b) + (K_c) * (B_c) = (K_c) * (B_c) + (K_d) * (B_d) + (K_g) * (B_g) \quad \text{Ecuación 13.}$$

De la Ecuación 13, solo que se conoce la exergía de cada flujo por lo que para determinar los costos exergeticos unitarios se debe de tener en cuenta los criterios de partición de costos.

En conclusión, el concepto de costo exergético lleva implícito la eficiencia del uso de la exergía al atravesar un equipo o sistema dentro del proceso, por lo que un análisis de costo exergético muestra la cantidad total de exergía gastada en el proceso.

4.5.4. Criterio de partición de costos basados en exergía.

Cuando se aplica un análisis termo-económico, se pretende utilizar criterios de partición de costos basados en exergía para la determinación de los costos de producción en equipos, componentes o procesos de varios productos. Un enfoque simple y efectivo para este problema consiste en utilizar el método de igualdad o el método de extracción. Igualmente se tiene que, para simplificar, aquellas salidas que son residuos o vertimientos del proceso sus costos unitarios son iguales a cero, ya que económicamente estos flujos no cuentan con un valor comercial para el mismo. Algo similar ocurre con los insumos que se extraen de los recursos naturales, como el aire, gravas, entre otros. Cuyo costo unitario es 1, ya que, aunque no generan un costo económico para el proceso, si contienen un valor exergético útil.

❖ Método de igualdad

En este método, el equipo, componente o proceso analizado debe satisfacer todas las demandas de exergía y en consecuencia, todos los productos tienen el mismo costo promedio de exergía.

❖ Método de extracción

En este método, el equipo, componente o proceso estudiado tiene una sola función y a el producto de esta función se encarga de sus costos de capital, operativos y de mantenimiento. De esta manera, el usuario de este producto pagará la tasa de exergía gastada, así como el capital, el mantenimiento y otros costos operativos.

La economía da valor a los bienes naturales considerando sus costos de extracción y no sus costos de reemplazo, promoviendo la extracción y no la recuperación o el reciclaje, mejorando así la eficiencia de los procesos de extracción en lugar de guardar esos recursos para las generaciones futuras [1]. Por lo que el costo termo-económico está cuantificado en el valor económico (monetario) de las materias primas y costos de operación, mientras que el balance exergo-económico cuantifica el costo exergético, basado en la lógica de la naturaleza, que le cuesta al planeta para producir un producto.

4.6. Destrucción de la exergía y su principio de disminución.

El principio del incremento de la entropía afirma que la variación de la entropía para un sistema aislado siempre es positiva dado que esta puede ser creada, pero nunca destruida. Análogamente, existe el principio de la disminución de la exergía, el cual afirma que, para un sistema aislado que evoluciona de un estado 1 para un estado 2, sin ninguna interacción del tipo trabajo o calor con los alrededores, su exergía siempre disminuye. Por ende la exergía del sistema aislado siempre disminuye y así la energía siempre se degrada, es decir, la exergía siempre es destruida [40]. Este concepto sirve como criterio adicional al principio del aumento de la entropía para determinar si un proceso es reversible, real o imposible:

$$B_{dest} = \begin{cases} > 0 & \text{proceso real} \\ = 0 & \text{proceso reversible} \\ < 0 & \text{proceso imposible} \end{cases} \quad \text{Ecuación 14.}$$

4.7. Rendimientos exergéticos e indicadores de exergía.

La utilización de este parámetro permite diferenciar las pérdidas hacia el ambiente de las irreversibilidades internas, además de proporcionar un punto de comparación más racional del desempeño de un componente con base en el límite máximo impuesto por la Segunda Ley. Sin embargo, la proposición de una definición general de la eficiencia exergética de las operaciones unitarias de una planta industrial no es simple. Eso se debe en cierta medida a las grandes cantidades de exergía química y física en tránsito de los combustibles, las sustancias inertes y las materias primas que involucran una gran cantidad de especies químicas. Además, aun cuando muchos estudios enfocados en el cálculo de la eficiencia exergética afirman efectivamente medir la relación entre la exergía transformada y la exergía consumida de un proceso [39] [4] [40].

En consecuencia, esto lleva a confusiones cuando varios procesos son comparados en una forma cuantitativa, haciendo siempre necesaria la definición de la eficiencia utilizada. La definición de la eficiencia exergética puede ser clasificada en dos grupos, principalmente: basada en (i) entradas y salidas (*input-output*) y en (ii) consumos y productos (*consumed-produced*) [40] [4]. Términos como 'entrada', 'salida', 'pérdida', 'combustible', 'gasto', 'producto útil', 'entrada no-exergética' o 'en tránsito' son inherentes a dicha clasificación. En el primer tipo, se considera la relación entre la exergía de todos los flujos que dejan el volumen de control y los que ingresan, mientras que en el segundo tipo existe un interés en diferenciar la exergía efectivamente consumida (o producida) por el sistema de la exergía en tránsito, por

medio de cálculo de la variación de la exergía de determinadas sustancias a lo largo del proceso.

Por lo que, en términos generales, y para efectos de esta tesis, el rendimiento se puede definir como la relación entre el beneficio que se obtiene y lo que se invierte para obtenerlo. Matemáticamente el rendimiento útil de exergía se puede calcular mediante:

$$\eta_{B,I} = \frac{\sum B_U}{B_{Entradas}} \quad \text{Ecuación 15.}$$

Donde $\eta_{B,I}$ es el rendimiento exergético, B_U es la exergía útil y $B_{Entradas}$ es la exergía de las entradas o exergía bruta.

Dada la complejidad de definir la eficiencia exergética y para efectos de esta investigación, ya que hay una mezcla mineral que se va a extraer o separar de su mezcla, se puede emplear la definición de rendimiento utilizada por Velásquez [43] que propone una relación que compara la diferencia entre la exergía de las sustancias separadas (B_s) y su mezcla inicial (B_m) dividida por los recursos o suministros de exergía invertidos (B_r) para tal separación.

$$\eta_{B,II} = \frac{\sum B_s - B_m}{B_r} \quad \text{Ecuación 16.}$$

La diferencia entre el rendimiento de exergía útil (Ecuación 15) y el rendimiento de exergía de separación (Ecuación 16) radica en su interpretación. La primera se enfoca en el flujo de exergía útil de salida en comparación con toda la exergía de flujo de entrada; mientras que la segunda se enfoca en la exergía de separación en comparación con el flujo de suministros de exergía en cada proceso.

De igual manera, en este documento se plantean otros indicadores que contribuyen a la interpretación de los resultados, debido a la complejidad de los procesos unitarios que están presentes en la minería a cielo abierto y los altos flujos de exergía. El primer indicador en la Ecuación 17 expresa las salidas de exergía del flujo que contienen oro en cada proceso, que es una mezcla de mineral, oro y agua, en comparación con los suministros.

$$I_1 = \frac{B_{\text{productos utiles}}}{B_r} \quad \text{Ecuación 17.}$$

El segundo indicador, Ecuación 18, expresa el flujo de exergía de oro B_{Au} , que se extrae o está presente en el flujo útil, en comparación con los suministros.

$$I_2 = \frac{B_{Au}}{B_r} \quad \text{Ecuación 18.}$$

Este indicador habla sobre la cantidad de oro que se extrae en cada proceso, mientras que el indicador en la Ecuación 17 habla sobre la cantidad de mineral que se procesa por unidad de suministro requerida.

4.8. Indicador de Demanda Acumulada de Exergía CExD

El indicador Cumulative Exergy Demand (**CExD**) se introduce para representar la eliminación total de exergía de la naturaleza para proporcionar un producto, resumiendo la exergía de todos los recursos necesarios. Este evalúa la calidad de la demanda de energía e incluye la exergía de los portadores de energía, así como de los materiales no energéticos [44].

Por lo que, para cuantificar la demanda de exergía del ciclo de vida de un producto, el indicador **CExD** se define como la suma de la exergía de todos los recursos necesarios para proporcionar un proceso o producto. Donde al igual que el termino propuesto por Szargut en 2005, **CExD** cuantifican el requisito de exergía total de un producto sumando el requisito de exergía total de un proceso durante un período de tiempo. Por lo que la aparición de bases de datos para el **ACV**, como ecoinvent, permite y facilita un enfoque específico del producto, ya que dichas bases de datos proporcionan la demanda de recursos para cada proceso. Por lo tanto, se pueden calcular mejores puntajes del **CExD** que indiquen directamente la demanda de exergía de un solo producto dimensionando el **CExD** en MJ- equivalentes, para resaltar que es un indicador de evaluación de impacto y no un flujo elemental de inventario [44]. Donde la ecuación característica para su cálculo viene dada por:

$$CExD = \sum m_i * Ex_{(ch),i} + \sum n_j * r_{ex-e(k,p,n,r,t),j} \quad \text{Ecuación 19.}$$

$CExD$: Demanda acuminada de exergía por unidad de producto o proceso (MJ)

m_i : Masa de los recursos i (Kg)

$Ex_{(ch),i}$: Exergía por kg de sustancia i (MJ-eq/Kg)

n_j : Cantidad de energía del portador j (MJ)

$r_{ex-e(k,p,n,r,t),j}$: Relación de exergía a energía del portador j (MJ-eq/MJ)

ch, k, p, n, r, t : Exergía química, cinética, potencial, nuclear, radioactiva, térmica.

En otras palabras, el **CExD** evalúa el agotamiento de recursos provocado por un producto dado, por lo que es necesario tener en cuenta las exergías de todos los recursos que participan en el proceso que va desde las materias primas que se encuentran en el medio ambiente hasta el producto dado (la cadena de suministro en un proceso de fabricación) y se puede determinar como una medida de la cantidad total de exergía agotada del medio en la producción del producto. No es un atributo del producto en sí, sino del proceso que conduce al producto a partir de sus componentes naturales [44].

5. Resultados.

En esta sección se muestran los diferentes resultados en la aplicación del **ACV** y el análisis exergético; considerando el proceso como un sistema abierto que no acumula masa ni energía, un sistema en estado estable. Igualmente, para los diferentes flujos y mezclas de sustancias se consideran como ideales, donde no hay reacciones químicas que generen nuevos productos; por lo que el modelo solo dependerá de las concentraciones en cada flujo analizado y no de su reacción química.

5.1. Modelado en Umberto del ACV.

Para llegar a los resultados del análisis de ciclo de vida, se modela el proceso de extracción en sus 4 etapas descritas en la sección 2.2 (minería, beneficio, fundición y tratamiento) y se adiciona la etapa de material de entrada, que es la etapa que contiene la cadena de procesos para la producción de las materias primas y maquinaria utilizadas en el caso de estudio.

Para estar acorde a la norma ISO y poder modelar el **ACV** en Umberto NXT, se tiene que:

- i. El modelo se escribió en inglés, dado el lenguaje en el que se instaló el software.
- ii. El nombre de las circunferencias ( entradas,  salidas y  conexiones) se escriben con la letra inicial en mayúscula
- iii. Los nombres de los materiales a crear se escriben con letras en minúscula
- iv. Los nombres de los procesos o subproceso ( Procesos) se escriben en letras minúsculas.
- v. Las entradas  y salidas  se crean de manera genérica y representan reservorios y sumideros respectivamente, que indica de donde viene el material o a donde se dirige.
- vi. Las conexiones  son símbolos que interconectan los procesos que intercambian materia o energía.

La Figura 17 representa el sistema de extracción en sus entradas y salidas, como fue modelado en el software Umberto NXT, donde las conexiones representadas con el símbolo  indica las corrientes por las cuales este proceso está conectado a otro ya sea anterior o posterior. Por ejemplo, la entrada P8 es la salida del proceso market for diesel que pertenece a la base de datos de Ecoinvent 3.1 y contiene el impacto ambiental de la producción del Diesel común, siendo este insumo la entrada al proceso de extracción y la salida del mercado de Diesel por lo que P8 sería un punto en común.

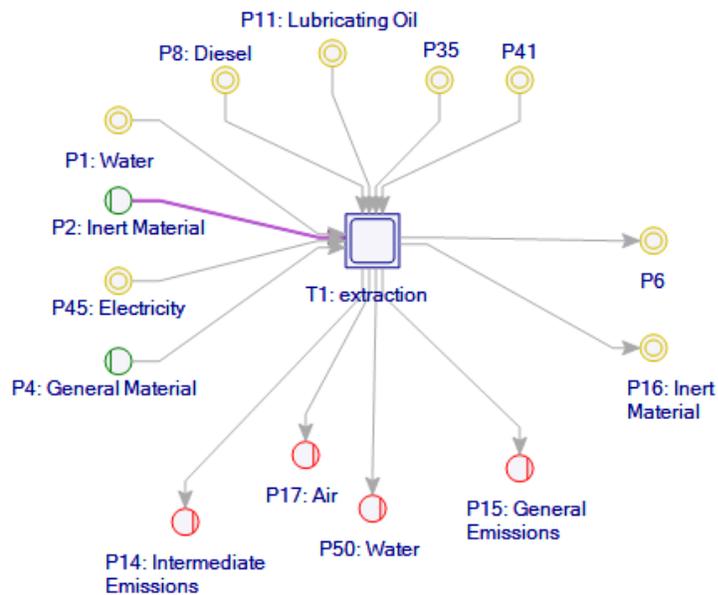


Figura 17. Modelo en Umberto del proceso de extracción a modo de resumen.

Para P6 por su parte, es considerado el punto en común que conecta el proceso de trituración con extracción y por el cual pasa el material excavado que se dispone a la primera molienda. Los demás símbolos en la figura anterior, hacen alusión a las entradas y salidas del proceso ya sea una entrada de una base de datos que contiene materiales o una emisión directa al agua, aire etc. Es de recalcar que la Figura 17 solo contempla el proceso de extracción a modo de ejemplo del modelado en Umberto NXT; por lo que la cadena de proceso es la unión de varios modelos, una subred, con el que se determina el impacto ambiental del dicho proceso en base a su producto, que a su vez es la entrada a otro proceso, aumentando así la red.

La Figura 18 por su parte muestra la red necesaria para caracterizar el proceso de extracción en una versión más ampliada; siguiendo la lógica, la red se va expandiendo a medida que se continua con el proceso hasta finalizar el lingote de oro como producto principal y plata como subproducto del proyecto extractivo.

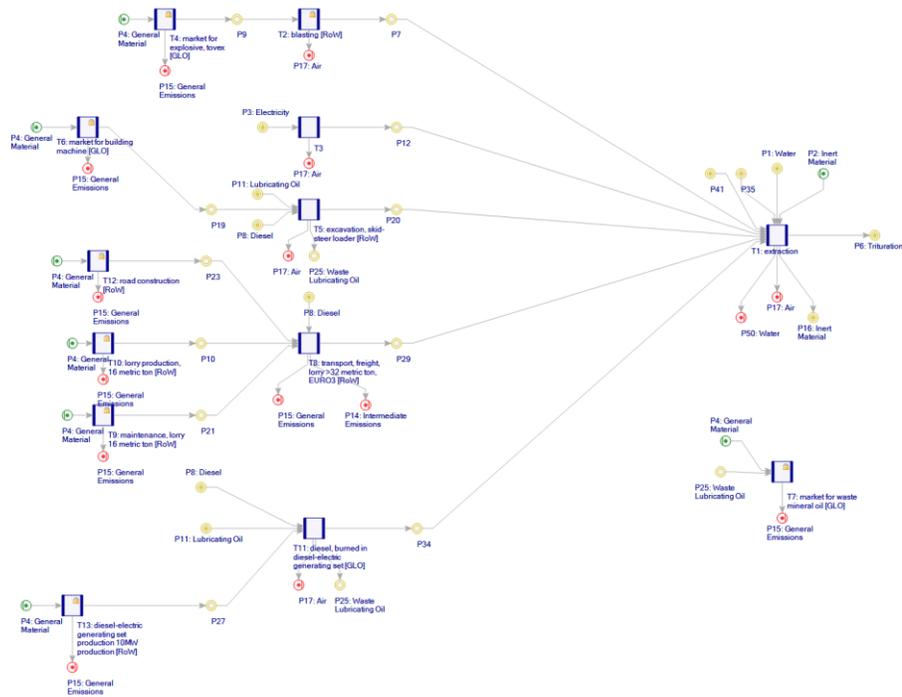


Figura 18. Subred necesaria para caracterizar el proceso de extracción.

Los indicadores de impacto ambiental utilizados del método ReCiPe mindpoints se muestran en la Tabla 8, donde solo se escogen aquellos indicadores donde hay mayor impacto según lo observado en los resultados.

Tabla 8. Indicadores de impacto ambiental, ReCiPe mindpoints, utilizados para la agrupación del inventario del ACV.

Indicador de impacto ambiental	Unidades equivalentes.
Natural land transformation, NLTP	[m ²]
Photochemical oxidant formation, POFP	[kg NMVOC]
Particulate matter formation, PMFP	[kg PM10-Eq]
Human toxicity, HTPinf	[kg 1,4-DCB-Eq]
Urban land occupation, ULOP	[m ²]
Fossil depletion, FDP	[kg oil-Eq]
Agricultural land occupation, ALOP	[m ²]
Climate change, GWP100	[kg CO2-Eq]
ReCiPe Midpoint (H) w/o LT - metal depletion w/o LT, MDP w/o LT	[kg Fe-Eq]

La lectura de los impactos ambientales resulta compleja ya que en una gráfica se están comparando diferentes unidades equivalentes (ver Tabla 8), pero ayuda a modo visual a enfocarse en un indicador que sobresale por su tamaño, color o participación. Es importante mencionar que cada indicador se debe analizar de manera individual según sea el interés particular de cada caso de estudio y así tomar acciones para lograr mitigarlo actuando directamente en la etapa o proceso con mayor participación en él.

5.1.1. Resultados del ACV.

Recordando que los resultados para este caso de estudio se calculan para el **ACV** de cuna a puerta, por lo que se consideran los procesos asociados a la extracción de materias primas, pero no a al uso o disposición final de los productos útiles. De igual manera se comparan los resultados con otros casos de estudio en el mundo y cuyos resultados se encuentran en la base de datos de ecoinvent 3.1.

Es de recalcar que la unidad de referencia para este análisis es la producción de 1 kg de oro como producto principal y 1,13kg de plata como subproducto por lo que por el modelo el impacto se carga al producto principal dándole un menor peso de valor al subproducto.

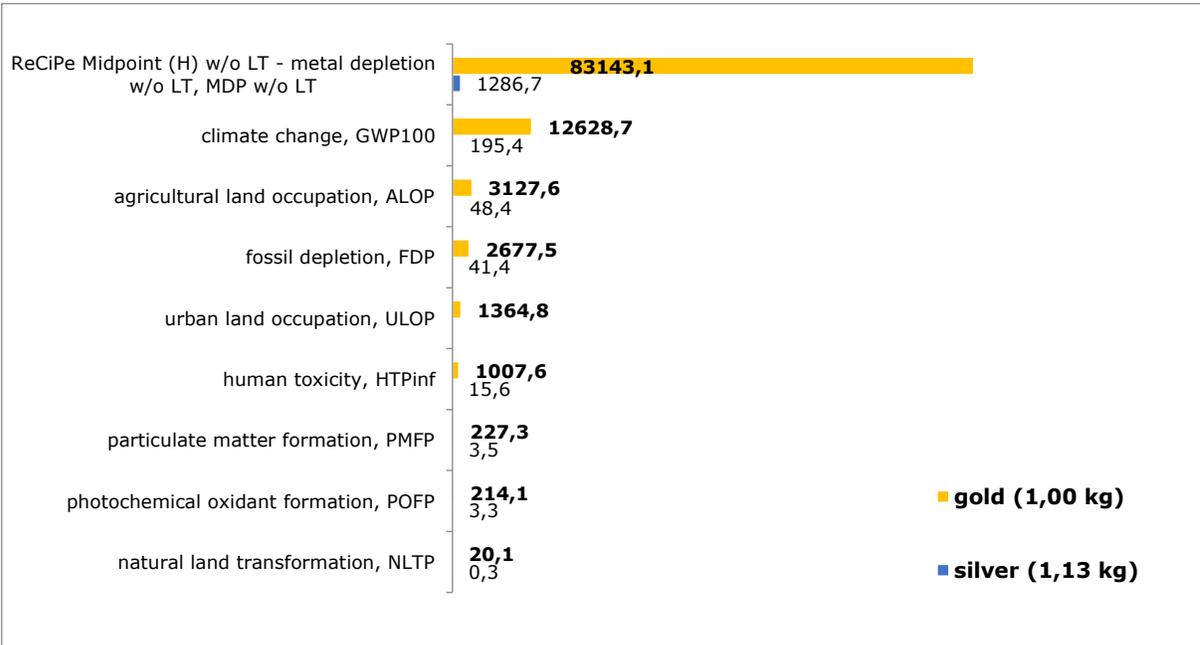


Figura 19. Indicadores del impacto ambiental en la producción de 1 kg de oro, desde los productos. (gráfica en inglés según la convención estipulada para los resultados del ACV).

De la Figura anterior se puede concluir que al ser el oro el producto principal y de interés en el **ACV**, el impacto ambiental se carga en su mayoría a su producción. Por otro lado, se observa que el indicador agotamiento de metales sobresale con 83.143 kilogramos de hierro equivalente [kg Fe-eq] seguido del indicador de cambio climático y ocupación de territorio agrícola, donde las barras doradas corresponden al impacto por la producción de oro y las azules a los niveles de impacto por la producción de plata.

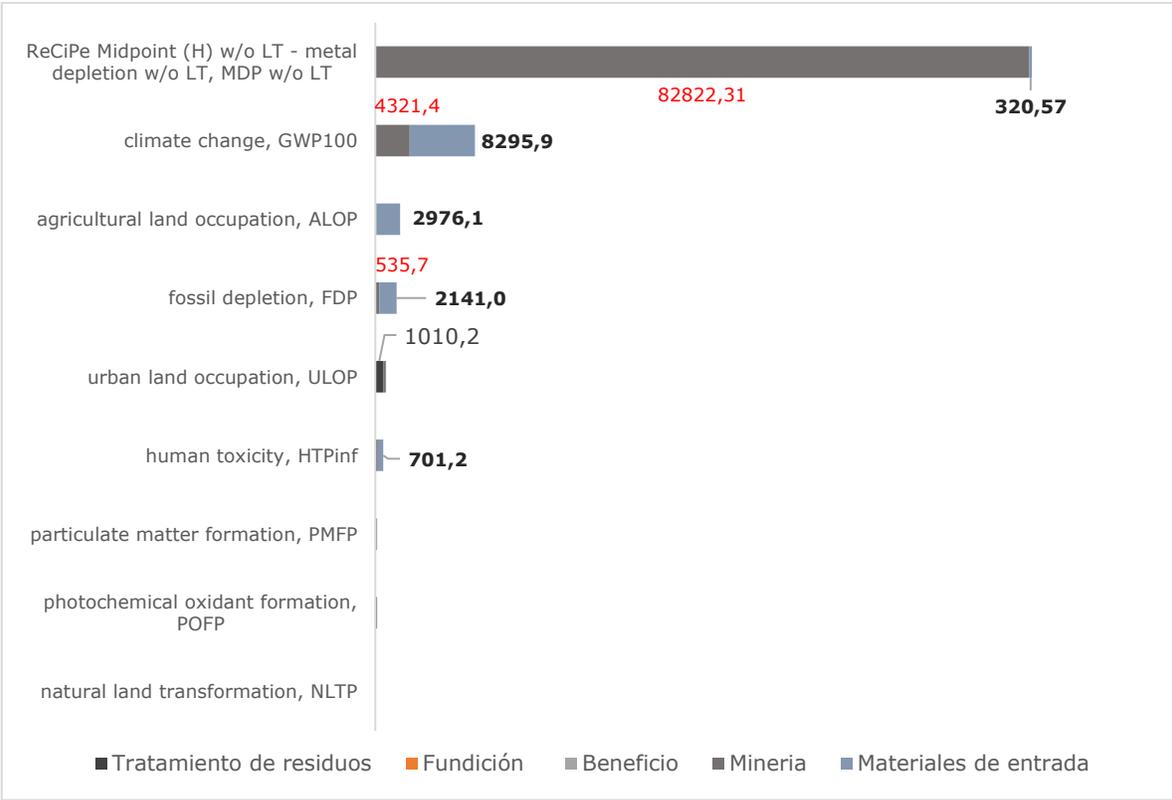


Figura 20. Indicadores del impacto ambiental en la producción de 1kg de oro, desde las etapas. (grafica en ingles según la convección estipulada para los resultados del ACV).

La Figura 20 por su parte se puede evidenciar los niveles de impacto ambiental desde las etapas del proyecto minero donde se puede ver en su mayoría que la matriz de impactos ambientales está constituida por la etapa de materiales de entrada (valores en rojo), minería (valores en negrita) y tratamiento de residuos (valores). Dando a entender que en la etapa de minería se tiene un impacto directo en el agotamiento de los metales, algo que tiene sentido dada la naturaleza del proceso de extracción. Mientras que el aporte al cambio climático está determinado en esencia por la etapa de minería y materiales de entrada; otra etapa que

sobresale en la gráfica es la de tratamiento de residuos con un notable impacto en la ocupación del suelo urbano (ULOP por sus siglas en ingles).

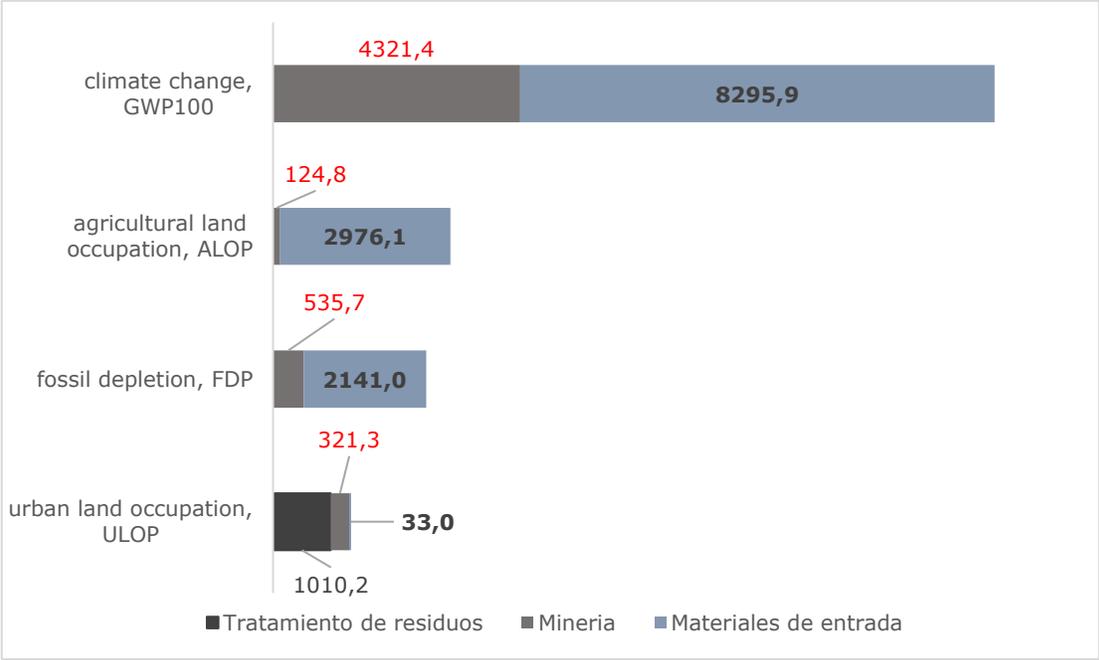


Figura 21. Indicadores del impacto ambiental en la producción de 1kg de oro, para las etapas, minería, tratamiento de residuos y materiales de entrada en los índices de interés. (gráfica en ingles según la convección estipulada para los resultados del ACV).

La Figura 21 detalla para las etapas de tratamiento de residuos, minería y materiales de entrada en cuatro impactos ambientales. Donde las etapas de minería y materiales de entrada presentan mayor participación para tres de los cuatro impactos seleccionados convirtiéndolos en puntos de interés en la toma de acciones. Se concluye igual manera que cada que se hace detalle en una etapa o un impacto particular este amplía el aspecto de agentes que interfieren en su valor.

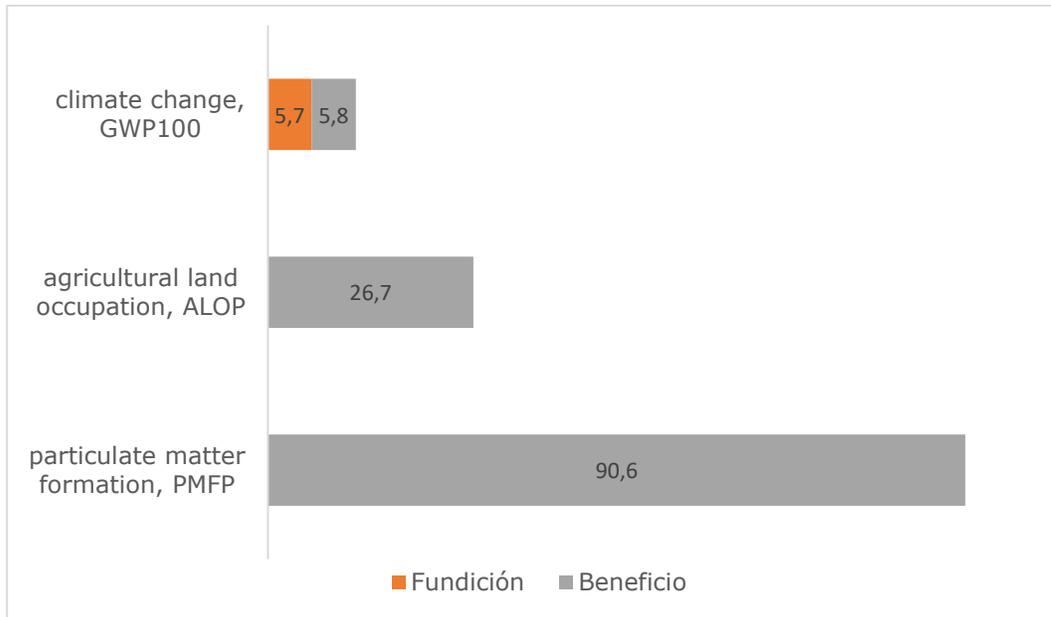


Figura 22. Indicadores del impacto ambiental en la producción de 1kg de oro, para las etapas de fundición y beneficio en los índices más representativos. (gráfica en inglés según la convección estipulada para los resultados del ACV).

En la Figura 22 por su parte se pueden ver las etapas de fundición y beneficio, evidenciándose en esta última etapa una alta participación en la formación y emisión de material particulado.

5.1.2. Comparación de resultados con proceso registrados en la base de datos de ecoinvent 3.1.

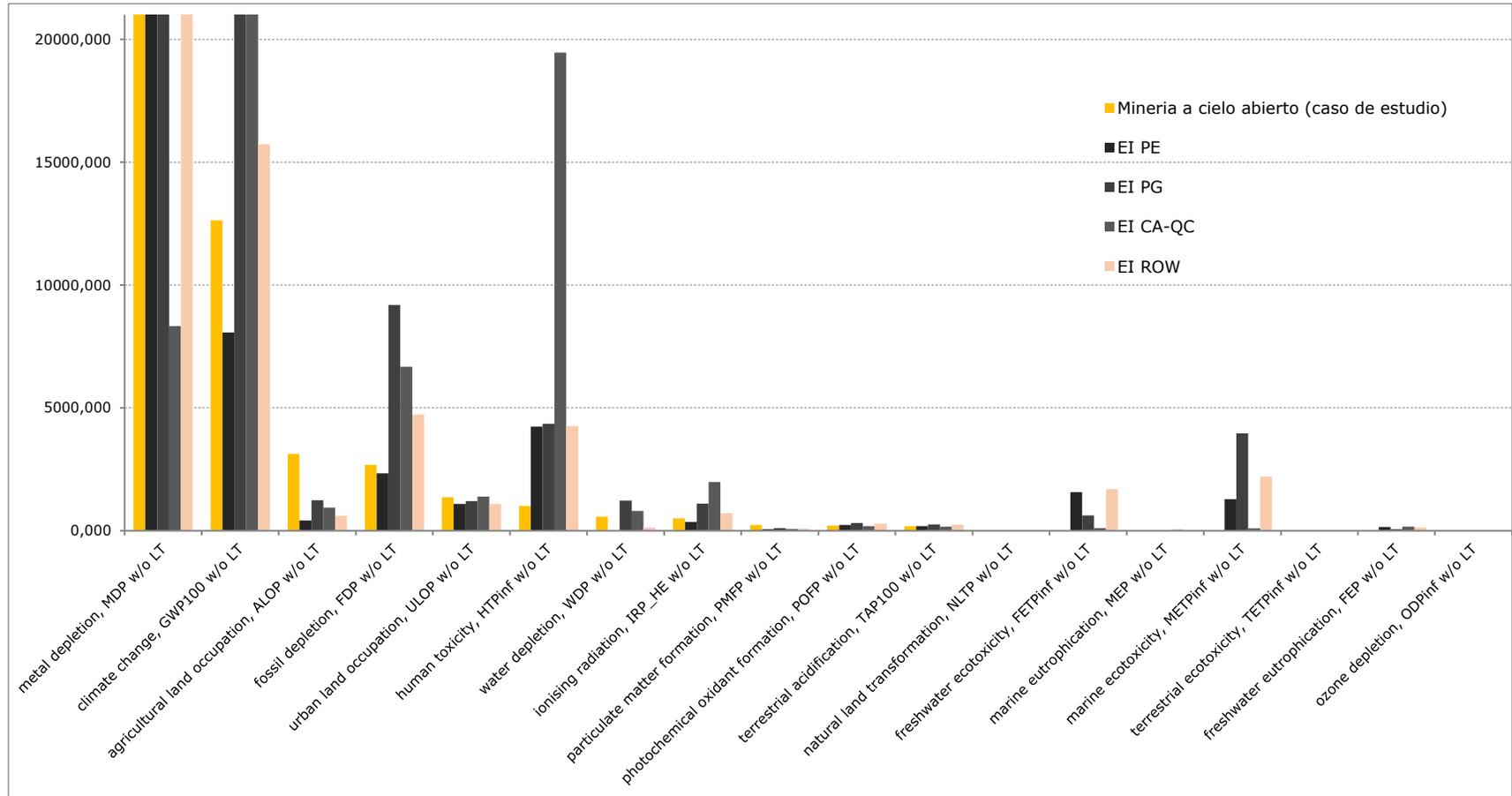


Figura 23. Comparación de diferentes ACV existentes en la base de datos ecoinvent 3.1 vs caso de estudio. (grafica en ingles según convención estipulado para los resultados).

La Figura 23 se comparan varios procesos de extracción de oro dentro de la base de datos de ecoinvent 3.1 para la producción de 1 kg de oro; dando así un contexto al **ACV** del caso de estudio donde:

- El **PE**; proyecto minero de extracción de oro que opera en **Perú**.
- El **PG**; proyecto minero de extracción de oro que opera en **Papua Nueva Guinea**.
- El **CA-QC**; proyecto minero de extracción de oro que opera en **Canadá / Quebec**.
- El **ROW**; promedio de proyectos mineros de extracción de oro en el **Mundo**.

De la Figura 23 los impactos de agotamiento de metales, cambio climático, agotamiento de recursos fósiles, toxicidad humana, ecotoxicidad del agua dulce y ecotoxicidad del agua marina; son los que resaltan de la gráfica. La importancia de la Figura 23 radica en que compara diferentes plantas mineras en su desempeño en las categorías de impacto de ReCiPe Midpoint sin efectos a largo plazo. Se observa que el caso de estudio se mantiene por debajo del promedio ROW a excepción de las categorías ocupación de tierras agrícolas y en la formación de material particulado. Mientras que si se compara con lo demás procesos mineros se presentan resultados diversos, dando a entender que cada **ACV** para un proyecto es único debido a la naturaleza de sus proceso y nivel de detalle, por lo que en cada caso deben tomarse medidas diferentes para la mitigación de sus impactos en sus estrategias de planeación y desarrollo.

En un análisis generalizado y comparando los resultados con los de otros autores en diferentes procesos de extracción de minerales, se puede afirmar que:

- El autor [45] en su artículo "A Life Cycle Assessment Study of Iron Ore Mining" menciona que en las categorías de impacto uso del suelo, el 43.05% del impacto es generado por las materias primas, mientras que el 67.13% del impacto proviene del proceso unitario de tratamiento de mineral de hierro, afectando a la categoría de impacto del cambio climático. Por lo tanto, al compararse con los resultados obtenidos en este documento, se afirma que la ocupación de las tierras agrícolas, el 95.16% es aportado por los materiales de entrada, mientras que, en la categoría de cambio climático, el 33.97% del impacto es generado por la etapa de explotación.
- Los autores del artículo [46] " Life Cycle Inventories of Gold Artisanal and Small-Scale Mining Activities in Peru " analizan dos procesos de extracción: a) caso aluvial y b) actividades mineras artesanales, encontrando que el primero genera un impacto en la categoría de emisión de aire de 16191 kg CO₂eq (kg de equivalente de dióxido de

carbono), mientras que en este último, la emisión generada es de 61969 kg CO₂eq, colocando el caso de estudio sobre estos valores con una emisión de 12628 kg CO₂eq.

- Los autores su texto [47] "Using life cycle assessment to evaluate some environmental impacts of gold production" compara el "efecto del grado de mineral sobre las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de oro (mineral no refractario)", que muestra una relación inversa entre El kg CO₂eq / kgAu vs. grado mineral (gAu / t) para los procesos de extracción de oro sin uso de mercurio. Por lo que el autor sugiere que para un tenor en el depósito de 0,6 la proporción de kg CO₂eq / kgAu es aproximadamente 80000, Situando el caso de estudio por debajo de este valor con 61969 kg CO₂eq / kgAu.

Es importante mencionar que para este **ACV** no se realiza un análisis del impacto a largo plazo, causado por posibles fugas en grupos de colas o de los depósitos de tratamientos. Por lo tanto, solo se tienen en cuenta cuando se lleva a cabo la actividad minera y no mientras se desmantela; lo que es importante considerar ya que la remediación de los relaves sólidos o la infiltración de agua después del desmantelamiento de las instalaciones, puede ser técnicamente difíciles de eliminar o mitigar en términos ambientales o riesgos, sin considerar la prevención o propagación de contaminantes y fallas de la presa.

5.1.3. Indicador de demanda acumulada de exergía CEXD.

A continuación, se muestra el indicador **CEXD**, para la producción de 1 kg de oro; determinado para 10 fuentes de consumo:

- ✓ Solar, renewable energy resources, solar, converted
- ✓ Primary forest, non-renewable energy resources, primary forest
- ✓ Wind, renewable energy resources, kinetic (in wind), converted
- ✓ Minerals, non-renewable material resources, minerals
- ✓ Metals, non-renewable material resources, metals
- ✓ Nuclear, non-renewable energy resources, nuclear
- ✓ Biomass, renewable energy resources, biomass
- ✓ Water resources, renewable material resources, water
- ✓ Water, renewable energy resources, potential (in barrage water), converted
- ✓ Fossil, non-renewable energy resources, fossil

Los indicadores de **CExD** anteriormente mencionados, muestran la diferencia entre recurso como materia o energía (renovable/no-renovable). Por ejemplo “*Water, renewable energy resources, potential (in barrage water converted)*” indica el agua como potencial generado en planta hidroeléctrica (energía potencial renovable) y que es consumida para la producción de 1 kg de oro; Mientras que para “*Metals, non-renewable material resources, Metals*” induce al consumo de elementos metálicos como materiales no renovables. Es de mencionar que, aunque se hable de materiales o energías renovables, se están comparando sus formas de energía en MJ dando uniformidad al momento de comparar los resultados ya que se puede hablar de cual fuente consume más exergía sin entrar en la particularidad del caso y al tratarse de un **CExD** estos contienen las cadenas de consumos anteriores.

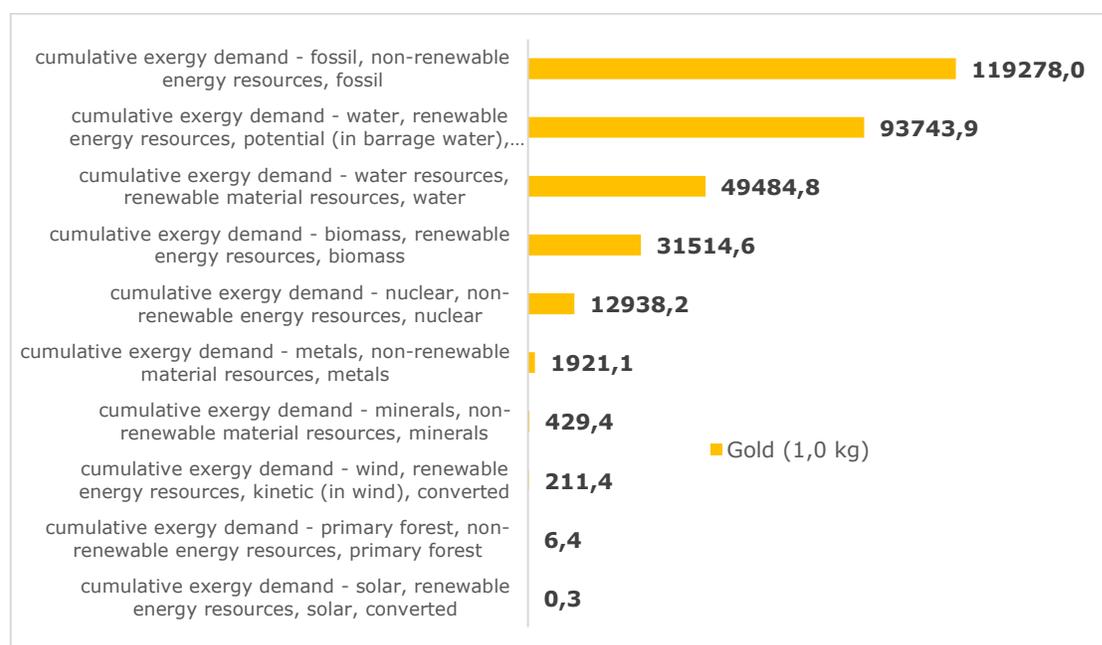


Figura 24. **CExD** para la producción de 1 kg de oro. [MJ]

En la Figura 24 se muestran los **CExD** para la producción de un kg de oro en los indicadores medidos, siendo el de mayor consumo el Fossil, non-renewable energy resources como 119.278 MJ seguido de Water, renewable energy resources, potential (in barrage water), converted con 93.743,9 MJ.

Por otra parte, en las Figura 25 y Figura 26 se pueden ver la demanda acumulada de exergía por las etapas de la operación minera aurífera a cielo abierto; donde la Figura 25 muestra en totales los **CExD** y la Figura 26 la participación en porcentaje de cada etapa para los diferentes recursos de consumo o indicadores de **CExD**.

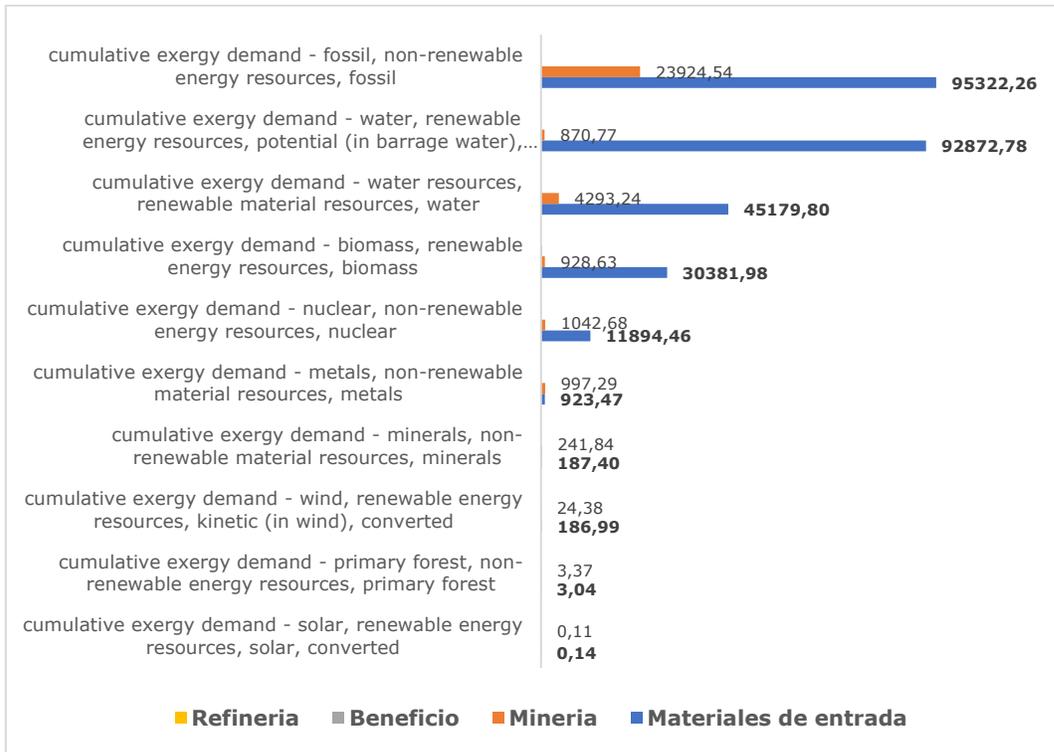


Figura 25. CEXD para la producción de 1 kg de oro por etapas del proceso. [MJ]

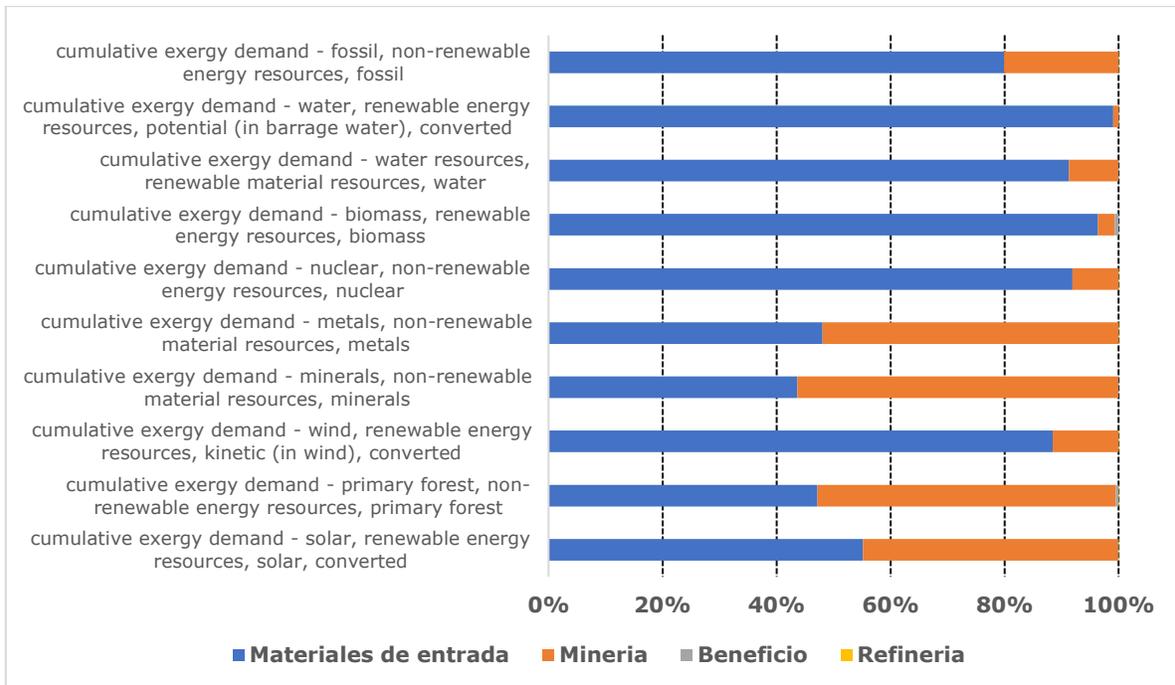


Figura 26. Figura 25. CEXD para la producción de 1 kg de oro por etapas del proceso. [% de participación en MJ]

De las Figura 25 y Figura 26 se puede concluir que las etapas de minería y materiales de entrada son las que más participación tienen en el **CExD** convirtiendo estas etapas del proceso extractivo aurífero a cielo abierto, como focos tanto para el **ACV** como para el **CExD**.

Se resalta de las Figura 25 y Figura 26 el consumo de energía nuclear como elemento no renovable de energía y aunque en Colombia no hay generación eléctrica a partir de fuentes nucleares, este indicador hace alusión a la exergía acumulada de los insumos importados los cuales se produjeron en el exterior y se importaron, como lo son elementos de construcción, maquinaria, infraestructura o elementos químicos.

5.2. Resultados del análisis exergético.

A continuación, se muestran los resultados que se obtuvieron del análisis de exergía en cinco secciones: la primera se refiere al balance de exergía en cada etapa del proceso. la segunda hace alusión a los resultados obtenidos, en el tercero se aplica el rendimiento de exergía y los indicadores para cada proceso vistos en el capítulo 4.7. El cuarto muestra los resultados obtenidos en un análisis de sensibilidad, cuyo objetivo es mostrar cómo se ve afectado el rendimiento general del proceso, si se aumenta la producción de oro utilizando los mismos insumos. Una quinta sección donde se calcula el coste exergético.

Por otra parte se recalca que el análisis exergético se basa en la metodología propuesta por la autora Alicia Valero [1]. En su tesis doctoral ella propone la evaluación exergética del capital de la tierra a partir de sus minerales, como una mezcla no reactiva homogénea. Allí el capital de la tierra se calcula como la exergía química de una solución o mezcla, combinada con un análisis de exergía tradicional.

La Tabla 9 muestra la exergía química estándar y el peso molecular de las sustancias se extraen de los autores Alicia Valero "Exergy Evaluation of the Mineral Capital on Earth: Influence of the Reference Environment" [1], Szargut "Exergy method: technical and ecological applications" [2], Szargut "Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes" [4]. Datos útiles para establecer las condiciones de referencia del depósito, necesarios para los cálculos de exergía. Igualmente se establecen condiciones ambientales $T_0 = 298,15 \text{ K}$, $P_0 = 101,325 \text{ kPa}$ y se toma la constante universal de los gases como $R_u = 8,314472 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol} \times \text{K}} \right]$.

Tabla 9. Condiciones estándar del depósito minero [1] [2] [4].

Sustancia	Peso molecular $[\frac{kg}{kmol}]$	Exergía química estándar $[\frac{kJ}{mol}]$
SiO ₂	60,08	1
Al ₂ O ₃	101,96	200,4
Fe ₂ O ₃	159,69	16,5
MgO	40,30	62,1
CaO	56,08	110,2
Na ₂ O	61,9790	296,2
TiO ₂	79,88	24,7
MnO	70,9375	119,4
H ₂ O	18,04348	0,9
Ag	107,87	69,7
Au	196,97	51,5

5.2.1. Balances de exergía.

El análisis de exergía se realiza haciendo uso de la exergía química estándar vista en la sección 4.4 en conjunto con los conceptos generales de exergía; considerando el proceso como un sistema en estado estable con entradas y salidas que mantienen su conservación de la masa, donde se pueden despreciar las exergías físicas, potenciales y cinéticas; por lo que la Ecuación 1. $B^T = B^P + B^K + B^{PH} + B^{CH}$ se resumen en $B^T = B^{CH}$ dando a entender que la exergía del proceso solo depende la exergía química de los flujos.

A modo de ejemplo y para mostrar cómo se realizó el cálculo de exergía, se tiene el proceso unitario de explotación que pertenece a la etapa de minería:



Figura 27. Diagrama proceso de Explotación, entradas y salidas.

El balance de exergía del proceso viene dado por ($B_{entradas} = B_{salidas} + B_{destruida}$):

$$B_5 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9 = B_{10} + B_{11} + B_{des}$$

Por lo que hay que determinar la exergía química de cada corriente; es de recalcar que los balances se realizaron haciendo uso del software EES por lo que la mayoría de los procedimientos a continuación se tomaron directamente del mismo como imágenes.

- **Corriente 5:** Agua líquida.

$$m_{H_2O_5} = 161,1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$B_5 = m_5 \cdot \frac{b\text{chmol}_{H_2O}}{p\text{mol}_{H_2O}}$$

$$B_5 = 8047,4 \text{ kW}$$

Donde $b\text{chmol}_i$ es la exergía química estándar y $p\text{mol}_i$ es el peso molecular de la sustancia.

- **Corriente 6:** Diesel

$$m_6 = 0,77 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$B_6 = m_6 * PCI_{\text{Diesel}} * Fi_{\text{Diesel}}$$

$$B_6 = 32155 \text{ kW}$$

Donde PCI_{Diesel} y Fi_{Diesel} son el Poder calorífico inferior y el factor exergético de combustibles fósiles del Diesel tomado del libro de Szargut [4].

- **Corriente 7:** Electricidad

$$B_7 = E_7 = 2560 \text{ kW}$$

Donde E_7 es el contenido energético de la electricidad ya que esta se puede considerar como exergía pura a causa de ser una fuente organizada de energía.

- **Corriente 8:** Dinamita.

Para este cálculo se toma la dinamita como Anfo, la cual consta de una mezcla de sustancias NH_4NO_3 al 0,9 y $C_{12}H_{16}$ al 0,1 de concentración másica

$$m_8 = 0,446 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$x_{NH_4NO_3} = 0,9 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$$

$$x_{C_{12}H_{16}} = 0,1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$$

$$n_{NH_4NO_3} = m_8 \cdot \frac{x_{NH_4NO_3}}{pmol_{NH_4NO_3}}$$

$$n_{C_{12}H_{16}} = m_8 \cdot \frac{x_{C_{12}H_{16}}}{pmol_{C_{12}H_{16}}}$$

$$y_{NH_4NO_3} = \frac{n_{NH_4NO_3}}{n_{NH_4NO_3} + n_{C_{12}H_{16}}}$$

$$y_{C_{12}H_{16}} = \frac{n_{C_{12}H_{16}}}{n_{NH_4NO_3} + n_{C_{12}H_{16}}}$$

Donde la exergía de la corriente 8 viene dada por.

$$B_8 = n_{NH_4NO_3} \cdot (bchmol_{NH_4NO_3} + Ru \cdot T_0 \cdot \ln(y_{NH_4NO_3})) + n_{C_{12}H_{16}} \cdot (bchmol_{C_{12}H_{16}} + Ru \cdot T_0 \cdot \ln(y_{C_{12}H_{16}}))$$

$$B_8 = 1521 \text{ kW}$$

Donde x_i, n_i, y_i son la fracción másica, número de moles y fracción molar respectivamente de una sustancia en la mezcla.

- **Corriente 9:** Flujo principal o corriente PP.

$$m_9 = 2314 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Las fracciones másicas de la mezcla en el depósito están determinadas en la Tabla 6 y siguiendo el procedimiento se tiene que:

$$\begin{array}{l} n_{9\text{SiO}_2} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{SiO}_2}}{p_{\text{molSiO}_2}} \\ n_{9\text{Al}_2\text{O}_3} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{Al}_2\text{O}_3}}{p_{\text{molAl}_2\text{O}_3}} \\ n_{9\text{Fe}_2\text{O}_3} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{Fe}_2\text{O}_3}}{p_{\text{molFe}_2\text{O}_3}} \\ n_{9\text{MgO}} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{MgO}}}{p_{\text{molMgO}}} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} n_{9\text{CaO}} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{CaO}}}{p_{\text{molCaO}}} \\ n_{9\text{Na}_2\text{O}} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{Na}_2\text{O}}}{p_{\text{molNa}_2\text{O}}} \\ n_{9\text{TiO}_2} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{TiO}_2}}{p_{\text{molTiO}_2}} \\ n_{9\text{MnO}} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{MnO}}}{p_{\text{molMnO}}} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} n_{9\text{H}_2\text{O}} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{molH}_2\text{O}}} \\ n_{9\text{Au}} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{Au}}}{p_{\text{molAu}}} \\ n_{9\text{Ag}} = m_9 \cdot \frac{x_{9\text{Ag}}}{p_{\text{molAg}}} \end{array} \right.$$

Donde x_i, n_i, y_i son la fracción másica, número de moles y fracción molar respectivamente de una sustancia en la mezcla, igualmente el número de moles totales de la mezcla viene dado por:

$$n_{\text{tot}_9} = n_{9\text{SiO}_2} + n_{9\text{Al}_2\text{O}_3} + n_{9\text{Fe}_2\text{O}_3} + n_{9\text{MgO}} + n_{9\text{CaO}} + n_{9\text{Na}_2\text{O}} + n_{9\text{TiO}_2} + n_{9\text{MnO}} + n_{9\text{H}_2\text{O}} + n_{9\text{Au}} + n_{9\text{Ag}}$$

Procediendo así al cálculo de las fracciones molares.

$$\begin{array}{l}
 y_{9_{\text{SiO}_2}} = \frac{n_{9_{\text{SiO}_2}}}{n_{\text{tot}_9}} \\
 y_{9_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = \frac{n_{9_{\text{Al}_2\text{O}_3}}}{n_{\text{tot}_9}} \\
 y_{9_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} = \frac{n_{9_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}}{n_{\text{tot}_9}} \\
 y_{9_{\text{MgO}}} = \frac{n_{9_{\text{MgO}}}}{n_{\text{tot}_9}}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 y_{9_{\text{CaO}}} = \frac{n_{9_{\text{CaO}}}}{n_{\text{tot}_9}} \\
 y_{9_{\text{Na}_2\text{O}}} = \frac{n_{9_{\text{Na}_2\text{O}}}}{n_{\text{tot}_9}} \\
 y_{9_{\text{TiO}_2}} = \frac{n_{9_{\text{TiO}_2}}}{n_{\text{tot}_9}} \\
 y_{9_{\text{MnO}}} = \frac{n_{9_{\text{MnO}}}}{n_{\text{tot}_9}}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 y_{9_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{n_{9_{\text{H}_2\text{O}}}}{n_{\text{tot}_9}} \\
 y_{9_{\text{Au}}} = \frac{n_{9_{\text{Au}}}}{n_{\text{tot}_9}} \\
 y_{9_{\text{Ag}}} = \frac{n_{9_{\text{Ag}}}}{n_{\text{tot}_9}}
 \end{array}$$

Donde la exergía de la mezcla 9, viene dada por la suma de las exergías de las fracciones masicas de cada elemento presentes en la mezcla.

$$\begin{aligned}
 B[9] = & n_{9_{\text{SiO}_2}} * (\text{bchmol}_{\text{SiO}_2} + Ru * T_0 * \ln(y_{9_{\text{SiO}_2}})) + n_{9_{\text{Al}_2\text{O}_3}} * (\text{bchmol}_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \\
 & Ru * T_0 * \ln(y_{9_{\text{Al}_2\text{O}_3}})) + n_{9_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} * (\text{bchmol}_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + Ru * T_0 * \ln(y_{9_{\text{Fe}_2\text{O}_3}})) + \\
 & n_{9_{\text{MgO}}} * (\text{bchmol}_{\text{MgO}} + Ru * T_0 * \ln(y_{9_{\text{MgO}}})) + n_{9_{\text{CaO}}} * (\text{bchmol}_{\text{CaO}} + Ru * T_0 * \ln(\\
 & y_{9_{\text{CaO}}})) + n_{9_{\text{Na}_2\text{O}}} * (\text{bchmol}_{\text{Na}_2\text{O}} + Ru * T_0 * \ln(y_{9_{\text{Na}_2\text{O}}})) + n_{9_{\text{TiO}_2}} * (\\
 & \text{bchmol}_{\text{TiO}_2} + Ru * T_0 * \ln(y_{9_{\text{TiO}_2}})) + n_{9_{\text{MnO}}} * (\text{bchmol}_{\text{MnO}} + Ru * T_0 * \ln(y_{9_{\text{MnO}}})) + \\
 & n_{9_{\text{H}_2\text{O}}} * (\text{bchmol}_{\text{H}_2\text{O}} + Ru * T_0 * \ln(y_{9_{\text{H}_2\text{O}}})) + n_{9_{\text{Au}}} * (\text{bchmol}_{\text{Au}} + Ru * T_0 * \ln(\\
 & y_{9_{\text{Au}}})) + n_{9_{\text{Ag}}} * (\text{bchmol}_{\text{Ag}} + Ru * T_0 * \ln(y_{9_{\text{Ag}}}))
 \end{aligned}$$

$$B_9 = 1529160 \text{ kW}$$

Siendo B9 la exergía del flujo 9 en kilo watts.

- **Corriente 10:** corriente PP

Dado que esta corriente es una mezcla de sustancias, el procedimiento para determinar su exergía es similar al anterior, teniendo en cuenta que la corriente 10 también se encuentra constituida con mezcla de la corriente 5 y la corriente 9.

$$B_{10} = 683972 \text{ kW}$$

- **Corriente 11:** Residuos al ambiente.

Esta corriente se compone en su mayoría por arenas, gravas y arcilla que se emiten directamente al ambiente

$$B_{11} = 845508 \text{ kW}$$

Por lo que al remplazar en la ecuación de balance y despejando se puede determinar la exergía destruida.

$$8047 + 32155 + 2560 + 1520 + 1529160 = 683972 + 845508 + B_{des}$$

$$B_{des} = 43065 \text{ kW}$$

- Cálculo del rendimiento exergético e indicadores de exergía, resolviendo los flujos de entradas y salidas en cada proceso.
 - Rendimiento útil (Ecuación 15)

$$n_{B;2} = \frac{B_{10}}{B_5 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9}$$

- Rendimiento de separación (Ecuación 16)

$$n_{2B;2} = \frac{B_{10} + B_{11} - B_9}{B_5 + B_6 + B_7 + B_8}$$

- Indicador 1 (Ecuación 17)

$$I_{1;2} = \frac{B_{10}}{B_5 + B_6 + B_7 + B_8}$$

- Indicador 2 (Ecuación 18)

$$I_{1;2} = \frac{B_{10}}{B_5 + B_6 + B_7 + B_8}$$

Tabla 10. Tabla de resultados para el proceso de explotación en sus rendimientos e indicadores.

$n_{B,I}$ (%)	$n_{B,II}$ (%)	I_1	I_2
77,16	1,71	213	$8,41 \cdot 10^{-7}$

Un proceso de cálculo similar ocurre con el demás proceso unitarios y a continuación se mostrarán los balances de exergía de cada proceso, junto con su entrada, salida y exergía destruida.

5.2.2. Resultados del balance exergético.

Tabla 11. Balance de exergía.

Proceso	Flujo de exergía de las entradas [kJ/s]		Flujo de exergía de las salidas [kJ/s]		Flujo de exergía destruida [kJ/s]
	Corriente principal	Insumos	Corriente principal/corriente útil	Residuos	
Descapote	1454	12515	1454	-	12515
Minería o explotación	1529160	44285	683972	845509	43965
Trituración	683972	2480,5	529635	154380	2438
Molienda	1042712	99971	1052597	-	90085,7
Separación gravimétrica	522070	13314,6	513145	-	22239,6
Flotación	530672	10465	29209	504915	7013
Lixiviación	29063	3766,8	19260	12695	874
Adsorción	19260	3144	2807	19337	260
Elución y regeneración	2875	2461	2889	1201	1246
Fundición	0,58	296	0,60	-	296
Detoxificación y colas	538148	169986	75241	532416	100477
Minería a cielo abierto en condiciones de operación, balance general	1530614	284556	0,6	532416	1282756

En la Tabla 11 se muestran las entradas, salida y la exergía destruida; en las estradas se muestra tanto la corriente principal como los insumos requeridos del proceso (electricidad, Diesel, agua, sustancias químicas, entre otra.) Las salidas por su parte, muestra la corriente principal y la corriente útil que sale de cada proceso. En algunos casos la corriente útil no contiene oro, pero tiene un valor para la planta ya sea para la recuperación de agua, carbón activado etc. De igual manera en las salidas se muestra la exergía de los residuos generados, donde para cada proceso estos residuos contienen un valor exegético; mientras que los desechos de colas se pueden, dependiendo del caso de análisis, establecer como exergía

destruida debido a que estos terminan almacenados en grandes piscinas sin realizar ningún trabajo útil.

Para el caso de descapote, toda la exergía de los insumos se utilizó para almacenar una gran cantidad de material inerte; por lo que al final de la vida útil del proceso este material termina en equilibrio con el ambiente, considerándose así, como exergía destruida. Algo similar ocurre en los casos de explotación y trituración, donde el residuo generado se puede considerar como exergía destruida ya que este flujo termina en equilibrio con ambiente.

De igual manera se evidencia en la Tabla 11, que la exergía destruida de los procesos descapote, minería, trituración, molienda, separación gravimétrica, flotación y fundición, tienen magnitudes similares a la exergía de los insumos, mostrando con esto un panorama desfavorable ya que da a entender que no hay un uso eficiente de los insumos por parte de estos procesos y estos terminan como exergía destruida. Para los demás procesos lixiviación, adsorción, elución no existe una brecha cercana entre la exergía destruida y los suministros, pero si generan residuos a tratar con alta exergía.

Otros aspectos relevantes de la Tabla son los grandes flujos de exergía, de un orden de magnitud de hasta 1×10^7 kW, que pasan por los procesos minería, trituración, molienda y separación gravimétrica, dando a entender que estos son los procesos del sistema que más cantidad de material procesan antes de ser desechados al medio.

En la cadena de producción, particularmente en el proceso de fundición, se evidencia la baja cantidad de material principal a fundir con una exergía de 0,58 kW, mientras que el material extraído cuenta con una exergía de 1529160 kW, lo que indica que el restante de material termina en el medio o en su defecto en las piscinas de relaves.

En términos totales y tomando los desechos de exportación y trituración como exergía destruida, se tiene que la exergía destruida y la exergía de los desechos almacenados es casi igual a la exergía de entrada, esto se puede ver en la Figura 28.

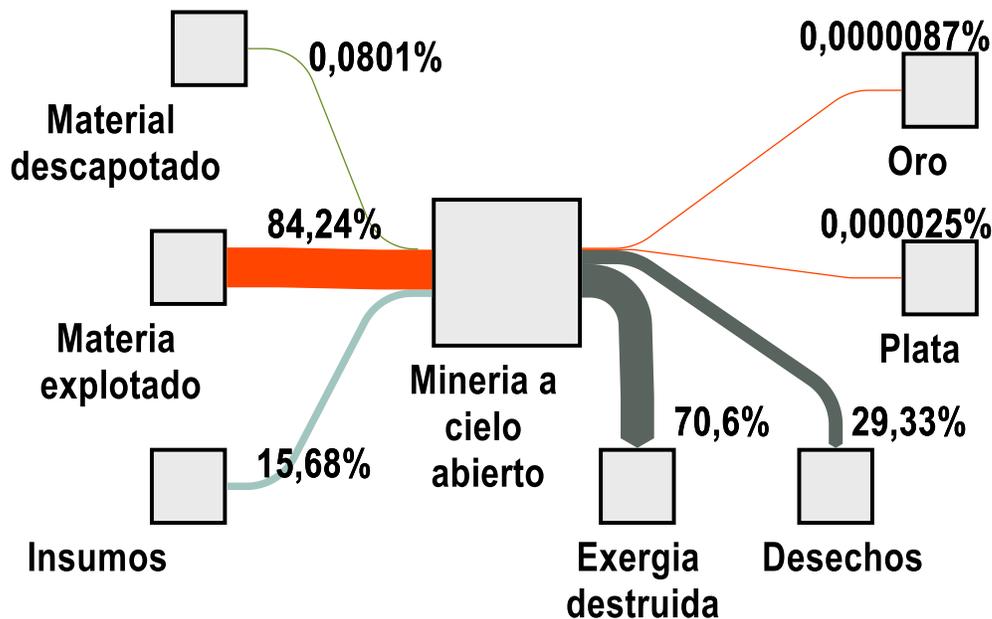


Figura 28. Diagrama Grassmann del Balance general de la actividad extractiva Aurífera a Cielo Abierto con base de cálculo 1.8151.771 kW.

La Figura anterior es una representación gráfica del balance exegético del proceso y cuya base de cálculo en porcentaje, se realiza a partir de la exergía del total de las entradas netas del sistema, $B_{entradas} = 1.8151.771$ kW. Estas equivalen a la suma de las entradas en el balance total de la Tabla 11. Se observa en la Figura 28 que la exergía destruida es casi igual a la magnitud de la exergía del depósito, por lo que se infiere que la exergía es utilizada para desplazar grandes cantidades de material de un lado a otro sin generar flujos útiles con contenido de dore.

La Figura 29 es una representación detallada del balance de exergía por procesos unitarios, donde los insumos contienen las recirculaciones de agua, productos de la detoxificación y colas, cuya base de cálculo es la misma que en el caso anterior. En este diagrama se aprecia que la mayor cantidad de exergía proviene del material extraído, donde los procesos de separación física, como la explotación, trituración y molienda, presentan los flujos con mayor destrucción de exergía, mientras que el flujo de residuos como material acumulado en colas es considerado como exergía destruida, ya que se almacena en grandes estanques de relaves aumentando las ineficiencias en el sistema.

En la Figura 29, los flujos de exergía son mayores en los flujos principales que vienen desde el depósito hasta separación gravimétrica y flotación, corroborando lo dicho en la Tabla 11; la mayor pérdida de exergía se da en el proceso de explotación, equivalente al 49% de las entradas netas. Mientras que los procesos de lixiviación, adsorción, elución y función presentan menores flujos principales de exergía.

Los procesos de lixiviación y adsorción son necesarios para la extracción de mayor cantidad de oro y plata, ya que, si se hace a modo directo desde separación gravimétrica hasta elución y regeneración, solo se extraería el 0,0037% de flujo útil, sin el aporte del 0,15% proveniente de adsorción. Pero hay que recalcar que estos flujos no representan en contenido de oro en la sustancia, solo representa el flujo como un contenido útil que sale de un proceso, por lo que se requiere de un indicador como lo es el indicador 2 para mostrar el aporte de oro en cada proceso.

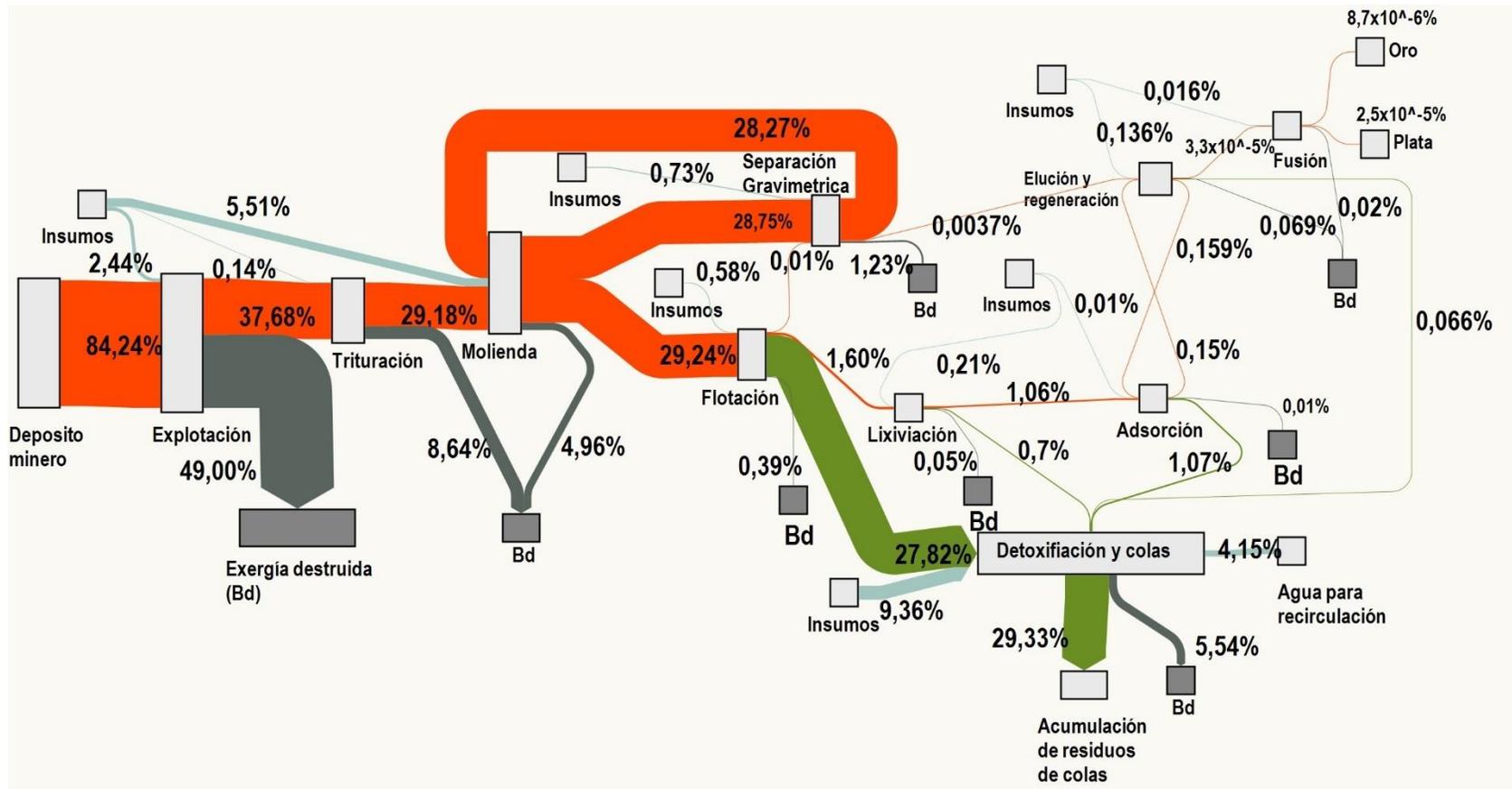


Figura 29. Balance de procesos unitarios en un diagrama de Grassmann con base de cálculo 1.8151.771 kW

Se evidencia igualmente en la figura anterior que la recirculación de agua que se obtienen en el proceso de detoxificación se cuenta como un producto útil y se reutiliza como suministro en algunos procesos; por lo que esta exergía en términos globales no sale del sistema y en términos unitarios solo se tiene en cuenta como suministro en los procesos que la consumen.

Involucrar el capital natural en un análisis de exergía, facilita el análisis en el proceso extractivo ya que a la salida hay una sustancia útil que se separó por medio de reacciones químicas y proceso físicos, logrando así un panorama de intervención de sistemas críticos que requiere expandir su nivel de detalle. Recalcando que para la Figura 29 el tamaño de la flecha en los diagramas de Grassmann son una representación de la magnitud del flujo, pero en algunos casos este tamaño se modificó para que gráficamente fuesen observados a causa de sus bajos valores en comparación con los demás.

5.2.3. Rendimientos e indicadores exergeticos.

En la Tabla 12 se muestran tanto los rendimientos como los indicadores de eficiencia, donde el rendimiento de exergía útil ($n_{B,I}$) compara la exergía de los flujos útiles en la salida de cada proceso en relación con la entrada, mientras que el rendimiento exergetico de separación ($n_{B,II}$) por su parte, muestra como los procesos utilizan los insumos para para separar el oro y la plata de la mezcla. Por otro lado, el indicador I_1 compara la exergía de los flujos útiles en relación con los insumos y el Indicador I_2 compara la exergía del oro dentro de la mezcla de cada flujo con los insumos requeridos para su separación.

Tabla 12 Comparación entre rendimiento útil, rendimiento de separación y los indicadores exergeticos.

Proceso	$n_{B,I}$ (%)	$n_{B,II}$ (%)	I_1	I_2
Explotación*	43,47	0,72	15,44	$4,71 \cdot 10^{-6}$
Trituración*	77,16	1,71	213	$8,41 \cdot 10^{-7}$
Molienda*	92,12	9,89	10	$7,00 \cdot 10^{-9}$
Separación Gravimétrica*	95,85	8	38	$1,50 \cdot 10^{-8}$
Flotación'	5,40	32,989	2,7	$2,24 \cdot 10^{-6}$
Lixiviación'	58,67	76,78	5,11	$1,01 \cdot 10^{-7}$
Adsorción'	12,53	91,72	0,8	$4,89 \cdot 10^{-6}$
Elución y Regeneración'	54,15	49,38	1,17	$6,41 \cdot 10^{-5}$
Fundición'	0,21	0,01	0,002	$5,34 \cdot 10^{-4}$
Detoxificación y colas'	10,63	40,89	0,16	-
Balance general	$3,37 \cdot 10^{-5}$	1,11	$2,15 \cdot 10^{-6}$	$5,54 \cdot 10^{-7}$

Los procesos de separación física marcados con (*) explotación, trituración, molienda y separación gravimétrica son buenos para procesar la corriente principal, pero son ineficientes para separar el oro de la mezcla. En otras palabras, esos procesos destruyen la exergía para mover o cambiar el tamaño del material extraído. Mientras que los demás procesos denominados procesos de separación química ('), tienen un alto rendimiento para al separar el oro, pero son ineficientes al momento de procesar materia. A excepción de Lixiviación, elución y regeneración que mantienen una brecha relativamente baja, entre el rendimiento útil y de separación.

En términos generales, el Rendimiento de Exergía Útil es $3,37 \cdot 10^{-5}\%$ y el Rendimiento de Exergía de Separación es 1,11%. Lo que indica que la minería a cielo abierto es una operación que cumple su objetivo de separación de oro, pero en ambos casos sus valores de eficiencia son muy bajos. Respecto a los indicadores, en especial el I_2 , se puede observar en la Tabla 12 que para cada proceso el valor exergetico de oro que se obtiene es muy pequeño en comparación con los suministros invertidos. En el caso de la desintoxicación, este indicador

no se puede aplicar ya que genera una corriente útil (como lo es el agua de recirculación) pero este proceso es incapaz de recuperar el oro.

5.2.4. Análisis de sensibilidad.

Esta sección tiene como objetivo mostrar los cambios y que tan sensible es el sistema a mayores producciones de oro mantenido el consumo actual de material y energía. En otras palabras, se pretende mostrar el cambio en los rendimientos de exergía, en comparación con la etapa actual de la mina si produce más oro con los mismos insumos, explotando al máximo las condiciones del depósito. En la Figura 30 se compara I_1 y I_2 en la operación minera con la suposición de que se podría extraer más oro utilizando los mismos insumos. Para tal supuesto, la concentración mínima operable requerida es de $1,63 \times 10^{-8}$ kg de oro / kg de mineral y la máxima concentración operable posible es de $5,29 \times 10^{-8}$ kg de oro / kg de mineral llegando al 96.4% del valor posible explotado en el depósito. Mostrando como resultado que, aunque se extraiga más oro, no habrá cambios significativos en ambos indicadores de desempeño de exergía. La flecha roja en la Figura 3 muestra la condición de operación real de la planta minera.

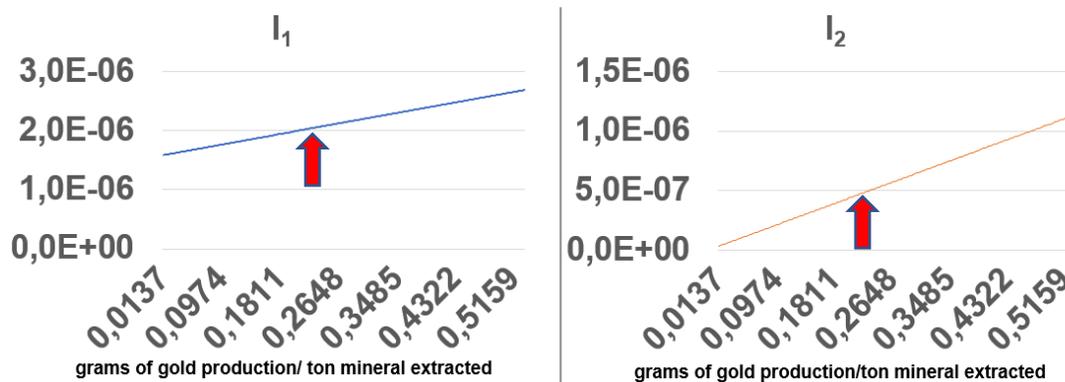


Figura 30 comparación entre los indicadores en el caso hipotético de usar los mismos insumos para extraer más oro.

Entablando un caso hipotético en el que se puedan seleccionar las vetas de oro del depósito con la mayor cantidad de oro, se reduciría el procesamiento de grandes cantidades de material. Por lo que se plantea un caso hipotético donde el material extraído se reduce en un 40%, y al hacerlo, el consumo de insumos disminuye en un 25%, en consecuencia, el tenor de oro en el depósito incrementa a 0,875 g de oro/t de material extraído.

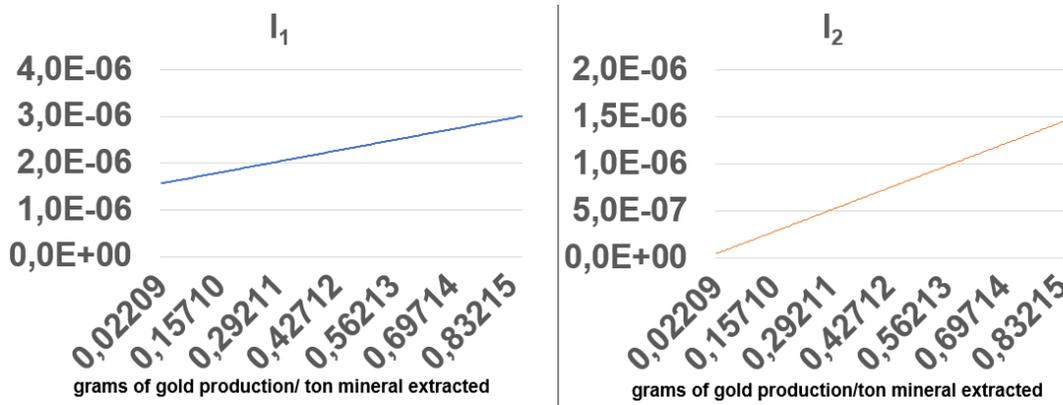


Figura 31. comparación entre los indicadores en el caso hipotético de realizar una minería selectiva.

En la Figura 28 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad concluyendo en las circunstancias antes entabladas, mostrando que no hay cambios significativos en los indicadores I_1 y I_2 . Concluyendo con esto, que el consumo de exergía es muy alto y que el proceso no es sensible al contenido de oro.

5.2.5. Costos exergéticos.

En la Figura 32 se muestran los resultados de las ecuaciones del balance de costos exergéticos (indicados en **negrita**); Donde al comparar el costo exergético de los insumos valorados en su contenido de exergía, que asciende a 284.556 kW, respecto al costo exergético del oro y la plata producidos, evaluados en 1.801.202 kW, se observa un aumento significativo a las irreversibilidades de la operación y en consecuencia si la plata no fuese un subproducto del proceso, el costo exergético de 1.801.202 kW estaría cargado netamente al oro.

Para un análisis en términos de costo exergético unitario (valor en color gris en el gráfico) se pudo observar el gran aumento en el costo Exergético Unitario de los productos. Comparando los insumos cuyo costo unitario es aproximadamente 350, en relación con el costo exergético unitario para el oro y la plata cuyos valores son 2.944.072, da a entender que las ineficiencias del proceso se cargan a los productos útil.

Se observa que la Figura 32, que el costo exergético del oro y la plata es mayor que el costo exergético del material extraído del depósito, algo acorde con lo determinado en la sección 4.5.1. Donde el costo exergético del producto es mayor al costo exergético de las entradas.

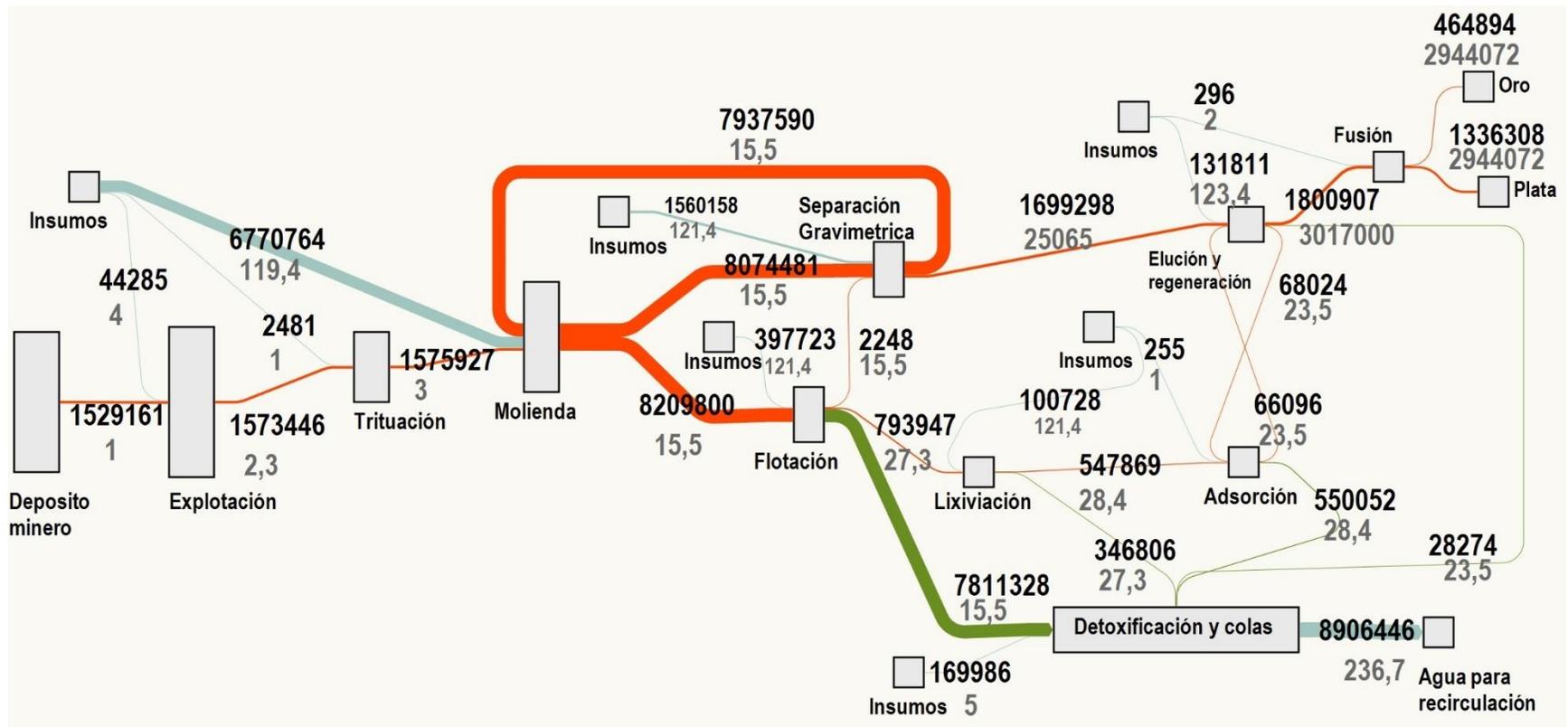


Figura 32. Diagrama del flujo de costos exergéticos por proceso [kW].

6. Conclusiones.

Del análisis de Ciclo de Vida se puede concluir que:

- El indicador de **CExD** evalúa el agotamiento de recursos provocado por un producto dado, por lo que es necesario tener en cuenta las exergías de todos los recursos que participan en el proceso que va desde las materias primas que se encuentran en el medio ambiente hasta el producto dado (la cadena de suministro en un proceso de fabricación) y se puede determinar como una medida de la cantidad total de exergía agotada del medio en la producción del producto. Los procesos de extracción, trituración y consecución de las materias primas son considerados críticos a causa de su alto Demanda Acumulada de Exergía.
- La comparación de la actividad minera aurífera a cielo abierto con otros proyectos en el mundo, sitúa el caso de estudio por debajo de la media ROW, en la valoración ReCiPe mindpoint.
- Agotamiento de metales, cambio climático, uso del suelo y ocupación de tierras agrícolas, son las categorías de impacto con mayor valor en el caso de estudio.
- Las etapas de materias primas y minería, son las etapas que mayor impacto ambiental generan en el proceso, por lo que requiere un foco para cambios significativos al momento de mitigar los impactos ambientales.

Del análisis de exergía se puede concluir que:

- El Rendimiento de Exergía Útil ($n_{B,I}$) que compara la exergía de los flujos útiles en la salida de cada proceso en relación con la entrada, muestra un mejor comportamiento para los procesos de separación física (explotación, trituración, molienda y separación gravimétrica), en comparación con el rendimiento de separación.
- El Rendimiento de Exergía por Separación ($n_{B,II}$) muestra cómo los procesos utilizan los suministros para separar el oro y la plata, muestra un mejor comportamiento en los procesos de separación química.
- Lixiviación con un rendimiento útil y de separación de 58,64 y 76,78% respectivamente, muestra alta eficiencia en el proceso tanto para el procesamiento de corriente útil, como el de separación de sustancias.
- Elución y regeneración con un rendimiento útil y de separación de 54,15 y 49,38% respectivamente, muestra alta eficiencia en el proceso tanto para el procesamiento de corriente útil, como el de separación de sustancias.

- En términos generales, aunque la minería a cielo abierto cumple con el objetivo y cuenta con un rendimiento de separación alto en comparación con el útil, ambos valores son pequeños, mostrando un proceso ineficiente.
- Involucrar el capital natural en un análisis de exergía, facilita el análisis en el proceso extractivo, ya que a la salida hay una sustancia útil que se separó de por medio de reacciones químicas y maquinaria. por lo que no se tienen en cuenta las eficiencias de los equipos, sino su capacidad de procesa la mezclas, logrando así un panorama de intervención de sistemas críticos que requiere expandir su nivel de detalle.
- Los indicadores exergéticos, en especial el indicador 2, muestra un panorama desfavorable, ya que en contenido exergético de oro es muy pequeño dentro del corriente en comparación con los insumos invertíos para su separación.
- Del análisis de sensibilidad se puede concluir que el sistema mantiene las ineficiencias independientes del contenido de oro extraído.
- El Costo Exergético Unitario para el valor de oro y plata es de 2.944.072 kW.
- Las ineficiencias del sistema se manifiestan en impactos directos al ambiente, por lo que a mayores ineficiencias mayor es el impacto ambiental.

7. Referencias

- [1] A. Valero, A. Valero, y A. Martínez, “Exergy Evaluation of the Mineral Capital on Earth: Influence of the Reference Environment”, 2008, núm. July, pp. 235–242. doi: 10.1115/imece2005-79715.
- [2] Jan. Szargut, *Exergy method : technical and ecological applications*. WIT Press, 2005.
- [3] D. IBRAHIM y M. A. ROSEN, *Exergy, energy, enviroment and sustainable development*, EISEVIER. 2007.
- [4] J. Szargut, D. R. Morris, y F. R. Steward, *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- [5] Ministerio de Minas y Energía, “Plan Nacional de Desarrollo Minero con horizonte a 2025”, vol. 1, p. 174, 2017.
- [6] “Así es nuestra Colombia minera | Agencia Nacional de Minería ANM”. <https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-nuestra-Colombia-minera> (consultado el 6 de enero de 2023).
- [7] Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO), “Información estadística minera”. <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/paginas/informacion-estadistica-minera.aspx> (consultado el 6 de enero de 2023).
- [8] GOV.CO, “Agencia Nacional de Minería ANM | Administración, Fomento, Promoción y Fiscalización de la Minería Nacional”. <https://www.anm.gov.co/> (consultado el 6 de enero de 2023).
- [9] Viceministerio de Minas, “Colombia Diversidad Minera”. [En línea]. Disponible en: www.anm.gov.co
- [10] Subdirección de minería - UPME, “Boletín. Coyuntura mensual de minerales”, núm. 69. 2019.
- [11] “World Gold Council | The Authority on Gold”. <https://www.gold.org/> (consultado el 11 de junio de 2019).

- [12] Departamento Nacional de Planeación, “Bases Plan de Desarrollo Nacional 2014-2018”, *Documento CONPES 3582*, p. 69, 2009, doi: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/La%20poltica%20generacin%20de%20ingresos/Cartilla%20Plan%20de%20Desarrollo%20Territorial.pdf>.
- [13] Departamento Nacional de Planeación, “Bases del plan nacional de desarrollo 2018-2022: Pacto por Colombia, pacto por la equidad”. Bogotá, p. 1660, 2019. doi: Departamento Nacional de Planeación.
- [14] S. Yirenkyi, “Surface Mining and its Socio-Economic Impacts and Challenges”, *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 181–202, 2008, [En línea]. Disponible en: http://www.saimm.co.za/Conferences/SurfaceMining2008/181-202_Yirenkyi.pdf
- [15] M. G. Nelson, “Evaluation of Mining Methods and Systems”, *SME mining engineering handbook*, pp. 340–348, 2011.
- [16] E. Bohnet, “Comparison of Surface Mining Methods”, *SME Mining Engineering Handbook*, pp. 405–413, 2011.
- [17] Ministerio de minas y energía, Unidad de Planeación Minero Energética, y Universidad de Córdoba, “Incidencia real de la minería del carbón, del oro y del uso del mercurio en la calidad ambiental con énfasis especial en el recurso hídrico - diseño de herramientas para la planeación”, p. 663, 2015, [En línea]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/Incidencia_real_de_la_mineria_sobre_recurso_hidrico.pdf
- [18] OCMAL, “Colombia | Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina”. <https://www.ocmal.org/category/noticias/colombia/> (consultado el 11 de junio de 2019).
- [19] R. Misión Jurídica, “Las problemáticas socio-ambientales generadas por la explotación minera en los páramos de Colombia Socio-environmental issues caused by mining activity in the Colombian moorlands”, vol. 10, pp. 367–379, 2017, doi: 10.25058/1794600X.625.
- [20] D. Chavarro, I. Vélez, G. Tovar, I. Montenegro, A. Hernández, y A. Olaya, “Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia y el aporte de la ciencia, la tecnología

y la innovación”, *Colciencias, Subdirección General, Diseño de políticas*, vol. 1, pp. 1–30, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.31118.87368.

- [21] C. C. on S. Investment, S. D. S. Network, U. N. D. Program, y W. E. Forum, “Cartografía de la minería en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible : un atlas”, 2016, [En línea]. Disponible en: [http://www.undp.org/content/dam/undp/library/Sustainable Development/Extractives/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas_SP.pdf](http://www.undp.org/content/dam/undp/library/Sustainable%20Development/Extractives/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas_SP.pdf)
- [22] Gobierno de Colombia; Departamento Nacional de Planeación, “El sector privado y su contribución a los ODS: un viaje hacia la recolección de datos mediante el reporte de sostenibilidad empresarial en Colombia.”, *United Nations Conference on Sustainable Development*, p. 12, 2018, [En línea]. Disponible en: <http://colombia.unwomen.org/es/noticias-y-eventos/articulos/2018/10/progreso-mujeres-2018>
- [23] J. Toro y R. Martínez, “Métodos de Evaluación de Impacto Ambiental en Colombia”, *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)*, vol. 4, núm. 2, pp. 43–53, 2015, [En línea]. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/revista1/index.php/riaa/article/view/990>
- [24] M. I. V. Villegas, L. Cadavid, y G. Awad, *Methodology for Environmental Impact Assessment for Infrastructure Projects in Colombia*, vol. 28, núm. 2. 2018. doi: 10.18359/RCIN.2941.
- [25] R. Herrington, “Geological Features and Genetic Models of Mineral Deposits”, *SME Mining Engineering Handbook*, pp. 1–22, 1995, [En línea]. Disponible en: <http://www.nhm.ac.uk/resources-rx/files/geological-features-and-genetic-models-of-mineral-deposits-119816.pdf>
- [26] G. Rodríguez-García y C. M. Celada-Arango, “Basaltos de San Pablo: un bloque de un arco de islas en el norte de la cordillera Central de Colombia. Caracterización petrográfica y química”, *Revista Boletín de Geología*, vol. 40, núm. 2, pp. 69–85, 2018, doi: 10.18273/revbol.v40n2-2018004.
- [27] ISO, “Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Ginebra”, *International Organization for Standardization*, 2006, Consultado: el 25 de

- febrero de 2019. [En línea]. Disponible en:
<https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- [28] SETAC ORG., “Society of Environmental Toxicology and Chemistry”, 2015.
<https://www.setac.org/>
- [29] A. Anton vallejo, “Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo”, *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*, p. 231, 2004, [En línea]. Disponible en:
<https://www.tesisenred.net/handle/10803/6827%0Ahttp://www.tdx.cat/handle/10803/6827>
- [30] Comisión Europea, “Más inteligente y más limpio. Consumo y producción sostenibles”. p. 28, 2010. doi: 10.2779/26465.
- [31] E. Ruiz, “El análisis de Ciclo de Vida. Metodología de decisión y evaluación ambiental en el sector de la edificación.”, Bogota, 2016.
- [32] M. Carrillo, “Análisis del Ciclo de Vida: Herramienta de Gestión Ambiental”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.gestiopolis.com/wp-content/uploads/2018/05/analisis-ciclo-vida-itzel.pdf>
- [33] M. T. Romero Díaz de ávila, “Análisis de ciclo de vida (ACV) Herramienta de Gestión ambiental”, *eoí Escuela de negocios*, vol. 3, p. 16.
- [34] ISO, “Ntc-Iso 14040”, *Icontec*, núm. 571, pp. 1–24, 2007.
- [35] I. Zabalza Bribian, “Adaptacion de la metodologia del analisis del ciclo de vida para la evaluacion y la mejora del impacto energetico y ambiental de la edificacion en España”, p. 464, 2011.
- [36] “Eco-efficiency software – Umberto NXT Universal Software”.
<https://www.ifu.com/en/umberto/umberto-nxt-universal/> (consultado el 30 de octubre de 2017).
- [37] ecoRaee, “Informe de Resultados del ACV del proceso”, p. 115, 2013, [En línea]. Disponible en: <http://www.life-ecoraee.eu/es/files/B1InformeResultadosACVProcesoCompleto.pdf>

- [38] “LCIA: the ReCiPe model - RIVM”. http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/ReCiPe (consultado el 23 de octubre de 2017).
- [39] T.J.Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Krieger Pu. Malabar, Florida, 1995.
- [40] M. J. Moran y H. N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 6th ed. 2009.
- [41] Silvio de Oliveira, *Exergy production, cost and renewability*. Sao Paulo: Springer, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-32735-3_7.
- [42] L. Ranz, “Análisis de los costes exergéticos de la riqueza mineral terrestre. Su aplicación para la gestión de la sostenibilidad”, Universidad de Zaragoza, 1999.
- [43] H. Arredondo, “Avaliação exergética e exergo-ambiental da produção de biocombustíveis”, *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.*, vol. Tese (Dout, núm. São Paulo, p. 212, 2009.
- [44] M. E. Bösch, S. Hellweg, M. A. Huijbregts, R. Frischknecht, y G. Rebitzer GeraldRebitzer, “LCA Methodology Cumulative Exergy Demand 181 LCA Methodology Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the ecoinvent Database* Cumulative Exergy Demand LCA Methodology 182 Int J LCA 12 12 12 12 12 (3) 2007”, *Int J LCA*, vol. 12, núm. 3, pp. 181–190, 2007, doi: 10.1065/lca2006.11.282.
- [45] H. Ferreira y M. G. P. Leite, “A Life Cycle Assessment study of iron ore mining”, *J Clean Prod*, vol. 108, pp. 1081–1091, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.140.
- [46] S. M. Valdivia y C. M. L. Ugaya, “Life cycle inventories of gold artisanal and small-scale mining activities in Peru: Toward indicators for South America”, *J Ind Ecol*, vol. 15, núm. 6, pp. 922–936, 2011, doi: 10.1111/j.1530-9290.2011.00379.x.
- [47] T. Norgate y N. Haque, “Using life cycle assessment to evaluate some environmental impacts of gold production”, *J Clean Prod*, vol. 29–30, pp. 53–63, jul. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.01.042.

8. Apéndice A. Balance del costo exergetico.

Partiendo de que la operación cuenta con la caracterización completa de los flujos en base exergetica, se tiene que.

✓ Descapote.

$$(K_1 * B_1) + (K_2 * B_2) + (K_3 * B_3) = (K_4 * B_4)$$

$K_1 = 1$; Por ser un insumo

$K_2 = 1$; Por ser un insumo

$K_3 = 1$; Por ser un insumo

✓ Explotación.

$$(K_5 * B_5) + (K_6 * B_6) + (K_7 * B_7) + (K_8 * B_8) + (K_9 * B_9) = (K_{10} * B_{10}) + (K_{11} * B_{11})$$

$K_5 = 1$; Por ser un insumo

$K_6 = 1$; Por ser un insumo

$K_7 = 1$; Por ser un insumo

$K_8 = 1$; Por ser un insumo

$K_9 = 1$; Por ser un insumo

$K_{11} = 0$; Por ser un residuo

✓ Trituración.

$$(K_{10} * B_{10}) + (K_{12} * B_{12}) = (K_{13} * B_{13}) + (K_{14} * B_{14})$$

$K_{12} = 1$; Por ser un insumo

$K_{14} = 0$; Por ser un residuo

✓ Molienda.

$$(K_{13} * B_{13}) + (K_{15} * B_{15}) + (K_{16} * B_{16}) + (K_{17} * B_{17}) = (K_{18} * B_{18}) + (K_{19} * B_{19})$$

$K_{16} = 1$; Por ser un insumo

$K_{19} = K_{18}$; Producto de molienda, criterio de repartición de costos

$K_{17} = K_{56}$; Agua recirculada, criterio de repartición de costos

✓ Separación gravimétrica.

$$(K_{19} * B_{19}) + (K_{20} * B_{20}) + (K_{21} * B_{21}) + (K_{22} * B_{22}) + (K_{23} * B_{23}) + (K_{24} * B_{24}) \\ = (K_{25} * B_{25}) + (K_{15} * B_{15})$$

$K_{21} = 1$; Por ser un insumo

$K_{21} = 1$; Por ser un insumo

$K_{24} = 1$; Por ser un insumo

$K_{20} = K_{56}$; Agua recirculada, criterio de repartición de costos

✓ **Flotación.**

$$(K_{18} * B_{18}) + (K_{26} * B_{26}) + (K_{27} * B_{27}) + (K_{28} * B_{28}) + (K_{29} * B_{29}) \\ = (K_{30} * B_{30}) + (K_{23} * B_{23}) + (K_{31} * B_{31})$$

$K_{27} = 1$; Por ser un insumo

$K_{28} = 1$; Por ser un insumo

$K_{29} = 1$; Por ser un insumo

$K_{26} = K_{56}$; Agua recirculada, criterio de repartición de costos

$K_{15} = K_{23}$; Criterio de extracción, no es una corriente útil

✓ **Lixiviación.**

$$(K_{30} * B_{30}) + (K_{32} * B_{32}) + (K_{33} * B_{33}) + (K_{34} * B_{34}) + (K_{35} * B_{35}) \\ = (K_{36} * B_{36}) + (K_{37} * B_{37})$$

$K_{32} = 1$; Por ser un insumo

$K_{33} = 1$; Por ser un insumo

$K_{34} = 1$; Por ser un insumo

$K_{35} = K_{56}$; Agua recirculada, criterio de repartición de costos

✓ **Adsorción.**

$$(K_{36} * B_{36}) + (K_{38} * B_{38}) + (K_{39} * B_{39}) = (K_{40} * B_{40}) + (K_{41} * B_{41})$$

$K_{39} = 1$; Por ser un insumo

✓ **Elución y regeneración.**

$$(K_{25} * B_{25}) + (K_{41} * B_{41}) + (K_{42} * B_{42}) + (K_{43} * B_{43}) + (K_{44} * B_{44}) + (K_{45} * B_{45}) \\ + (K_{46} * B_{46}) + (K_{47} * B_{47}) = (K_{48} * B_{48}) + (K_{49} * B_{49}) + (K_{38} * B_{38})$$

$K_{42} = 1$; Por ser un insumo

$K_{43} = 1$; Por ser un insumo

$K_{44} = 1$; Por ser un insumo

$K_{45} = 1$; Por ser un insumo

$K_{47} = 1$; Por ser un insumo

$K_{46} = K_{56}$; Agua recirculada, criterio de repartición de costos

✓ **Fundición**

$$(K_{48} * B_{48}) + (K_{50} * B_{50}) + (K_{51} * B_{51}) = (K_{52} * B_{52}) + (K_{53} * B_{53})$$

$K_{50} = 1$; Por ser un insumo

$K_{51} = 1$; Por ser un insumo

$K_{52} = K_{53}$ Por ser un insumo

✓ **Colas.**

$$(K_{37} * B_{37}) + (K_{40} * B_{40}) + (K_{49} * B_{49}) + (K_{54} * B_{54}) + (K_{58} * B_{58}) + (K_{59} * B_{595}) \\ + (K_{31} * B_{31}) + (K_{55} * B_{55}) + (K_{60} * B_{60}) \\ = (K_{35} * B_{35}) + (K_{56} * B_{56}) + (K_{57} * B_{57})$$

$K_{54} = 1$; Por ser un insumo

$K_{58} = 1$; Por ser un insumo

$K_{59} = 1$; Por ser un insumo

$K_{55} = 1$; Por ser un insumo

$K_{60} = 1$; Por ser un insumo

$K_{57} = 0$; Por ser un desecho
 $K_{18} = K_{23}$; Criterio de extracción
 $K_{18} = K_{31}$; Criterio de extracción
 $K_{30} = K_{37}$; Criterio de extracción
 $K_{36} = K_{40}$; Criterio de extracción
 $K_{41} = K_{49}$; Criterio de extracción
 $K_{38} = K_{49}$; Criterio de extracción

- **Costo exergéticos**

$CB_1 = (K_1 * B_1)$
 $CB_2 = (K_2 * B_2)$
 $CB_3 = (K_3 * B_3)$
 $CB_4 = (K_4 * B_4)$
 $CB_5 = (K_5 * B_5)$
 $CB_6 = (K_6 * B_6)$
 $CB_7 = (K_7 * B_7)$
 $CB_8 = (K_8 * B_8)$
 $CB_9 = (K_9 * B_9)$
 $CB_{10} = (K_{10} * B_{10})$
-
-
-
 $CB_{58} = (K_{58} * B_{58})$
 $CB_{59} = (K_{59} * B_{59})$
 $CB_{60} = (K_{60} * B_{60})$