

DEPÓSITO LEGAL ZU2020000153

ISSN 0041-8811

E-ISSN 2665-0428

# Revista de la Universidad del Zulia

Fundada en 1947  
por el Dr. Jesús Enrique Lossada



**Ciencias**  
**Exactas,**  
**Naturales**  
**y de la Salud**

**75**

**ANIVERSARIO**

**Año 13 N° 37**

**Mayo - Agosto 2022**

**Tercera Época**

**Maracaibo-Venezuela**

## Minería a microescala para el desarrollo regional sostenible: Análisis exergético de un caso en Guerrero, México

Anabel Real-Cornejo \*

Rayma Ileri Maldonado-Astudillo \*\*

Gabriel Plascencia \*\*\*

### RESUMEN

La minería a microescala o gambusina representa una oportunidad para el desarrollo social y económico de algunas comunidades rurales. Sin embargo, la naturaleza extractiva de esta actividad también representa impactos ambientales negativos. Este trabajo busca generar propuestas que respalden la producción gambusina bajo un esquema sostenible que pueda ser aplicado por los propios gambusinos. La investigación fue de naturaleza cuantitativa, aplicada y con alcance descriptivo. El estudio se desarrolló con un grupo de gambusinos ubicado en el distrito minero de Coyuca de Catalán, Guerrero, México, a partir del análisis de costos de exergía de las operaciones de extracción y refinación de oro, para conocer los costos ocultos que impactan la actividad minera de los gambusinos. Los resultados mostraron que el consumo de agua y mercurio son los elementos que más afectan a la comunidad. Finalmente, se generaron propuestas orientadas a reducir costos económicos e impactos ambientales negativos, al tiempo de propiciar el desarrollo económico y social de la comunidad.

PALABRAS CLAVE: sostenibilidad, exergía, ambiente, minería, desarrollo regional.

\*Maestra en Competitividad y Sostenibilidad. Licenciada en Administración de Empresas. Egresada de la Maestría en Competitividad y Sustentabilidad – Universidad Autónoma de Guerrero, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5727-4673>. E-mail: ana\_reco@hotmail.com Agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca 709836 otorgada para estudios de maestría.

\*\* Profesora investigadora adscrita al Centro de Innovación, Competitividad y Sostenibilidad (CICS) – Universidad Autónoma de Guerrero, México. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8880-4465>. Autora de correspondencia. E-mail: rimaldonado@uagro.mx

\*\*\* Profesor Investigador en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9425-5255>. E-mail: gabriel.plascencia@uteq.edu.mx

Recibido: 23/02/2022

Aceptado: 07/04/2022

## Micro-scale mining for sustainable regional development: Exergetic analysis of a case in Guerrero, Mexico

### ABSTRACT

Micro-scale or gambusina mining represents an opportunity for the social and economic development of some rural communities. However, the extractive nature of this activity also represents negative environmental impacts. This work seeks to generate proposals that support gambusino production under a sustainable scheme that can be applied by the gambusinos themselves. The research was quantitative, applied and descriptive in nature. The study was developed with a group of gambusinos located in the mining district of Coyuca de Catalán, Guerrero, Mexico, based on the analysis of exergy costs of gold extraction and refining operations, to discover the hidden costs that impact the activity. miner of the gambusinos. The results showed that the consumption of water and mercury are the elements that most affect the community. Finally, proposals were generated aimed at reducing economic costs and negative environmental impacts, while promoting the economic and social development of the community.

KEYWORDS: sustainability, exergy, environment, mining, regional development.

### Introducción

La minería gambusina es una de las principales fuentes de desarrollo económico para ciertas comunidades rurales, pues combate eficazmente la pobreza. Los pequeños productores de oro reciben como pago el 70 % o más de los precios internacionales del metal. Para el caso de México, esto representa alrededor de 5.4 salarios mínimos por gramo de oro, cifra mucho mayor en comparación con la obtenida por otras actividades de alto valor (PNUMA, 2012). No obstante, la naturaleza extractiva de la minería trae como consecuencia la generación de impactos negativos en el ambiente, además de perjudicar la salud de las personas.

Esta actividad primaria (minería a cielo abierto) depreda territorios de forma acelerada (Ontiveros y Bórquez, 2018). Esta característica particular de la pequeña minería permite establecer un proceso planeado de explotación. Sin embargo, en operaciones mineras de pequeña escala se carece de medidas de control adecuadas. Por ejemplo, la minería a microescala o

gambusina usa inadecuadamente recursos como el mercurio (metálico), el agua, la energía y la mano de obra.

Actualmente, existen esfuerzos enfocados a mejorar las condiciones de los pequeños mineros, como es el caso de Colombia, donde ha surgido el programa de 'oro verde', el cual permite atribuir a la actividad minera aspectos culturales y ecológicos que impulsan el desarrollo sostenible local mediante la producción minera a pequeña escala bajo la certificación Fairtrade-Fairmined (Sarmiento et al., 2013).

En México hay un alto potencial minero. Desde épocas precolombinas ya se desarrollaba la actividad minera, destacando el territorio del actual estado de Guerrero como uno de los centros mineros de importancia histórica (González-Sánchez y Camprubí, 2010). El Panorama Minero del estado de Guerrero confirma la riqueza mineral existente, atrayendo la inversión en el sector minero, la cual en el 2018 aportó un valor superior a los 880 mil dólares americanos (Servicio Geológico Mexicano, 2018). La mayoría de esta cifra es generada por compañías mineras extranjeras de explotación a gran escala.

Los contenidos de oro en el estado de Guerrero, aunado al incremento de la pobreza en sus comunidades más remotas, han promovido la actividad gambusina como alternativa de subsistencia. Dicha actividad cuenta con características similares a aquellas identificadas en otros países de Latinoamérica (Suárez, 2014), entre las que destacan la ausencia de medidas de control en los costos económicos y/o ambientales generados.

Este trabajo busca generar propuestas que respalden la producción gambusina bajo un esquema sostenible, a partir del análisis exergético de las operaciones de extracción y refinación de oro, reduciendo costos económicos y efectos ambientales adversos. Para lograr dicho objetivo se seleccionó a un grupo de gambusinos ubicado en el distrito minero de Coyuca de Catalán en el estado de Guerrero, México. A partir de los datos de extracción de oro, se obtuvo información de los costos económicos y ambientales en ciclos semanales de producción para identificar las áreas clave donde se pueden implementar mejoras orientadas a reducir costos, consumos de energía, agua y otros insumos, de forma práctica y factible para los gambusinos.

## 1. Materiales y métodos

La investigación fue de naturaleza cuantitativa, de tipo aplicada y con alcance descriptivo. El estudio se enmarca en el grupo La Pompeya, integrado por nueve gambusinos (edad promedio 45 años), cuya ubicación corresponde a la localidad de Puerto del Oro, en el distrito Minero de Coyuca de Catalán, Guerrero, México. El cuadro 1 muestra los indicadores de medición para cada una de las etapas del proceso de producción de oro (Au), el cual comprendió el ciclo completo de una semana, en horarios laborables de las 8 a 17 h.

Cuadro 1. Indicadores de medición por etapa del proceso de producción de oro (Au)

Etapa	Indicador de medición
Extracción	Cantidad de roca extraída, tamaño de roca, agua extraída en el desazolve, y horas hombre invertidas.
Molienda	Cantidad de roca ingresada, tamaño de la roca en la salida, tiempo de trituración, kw consumidos, agua consumida y horas hombre invertidas.
Amalgama	Cantidad de roca ingresada, mercurio de entrada y de salida, peso de la torta, tiempo del proceso, kw consumidos, agua ingresada y horas hombre invertidas.
Fundición	Cantidad de gas utilizado, calor aplicado, oro (Au) recuperado, mercurio recuperado y horas hombre invertidas.

Los equipos de medición utilizados (*Figura 1*) fueron:

- 1) Para medir el consumo de energía se utilizó un medidor de voltaje Extech, el cual se colocó en los motores para tomar los datos de consumo de corriente y voltaje en el arranque, procesamiento y apagado en cada uno de los procesos donde se utiliza corriente eléctrica; y un medidor de potencia marca kyoritsu Electrical, modelo kew 6305, número de serie 8177569 con el cual se midió y registró el consumo de energía de la unidad de alimentación trifásica, en el momento de encendido y apagado de los equipos conectados incluyendo

variación de voltaje, su demanda actual; frecuencia; factor de potencia; y active, reactivo, y potencia aparente y la energía.

- 2) Para el consumo de agua se utilizaron contenedores de 20 L de capacidad y un cronómetro digital estándar Casio. Se midió el flujo volumétrico de agua desde el desazolve, almacenamiento e ingreso del agua en cada uno de los procesos.
- 3) Para medir el consumo de mercurio se utilizó una báscula digital gramera Veros38. El procedimiento consiste en que los gambusinos miden las adiciones de mercurio con tapas de refresco. Para el desarrollo de este trabajo se pesó cada una de las tapas que se ingresaron en el proceso de amalgama, de igual forma se pesó el mercurio que salió después de exprimir la torta.
- 4) Para medir el peso de la roca ingresada en el proceso de molienda se utilizó un dinamómetro de metal Alamy.

Figura I. Equipos de medición utilizados en la recolección de datos.



- a) Báscula digital gramera Veros38; b) Pesa de metal Alamy; c) Contenedor plástico de 20 litros; d) medidor de potencia Marca kyoritsu Electrical, modelo kew 6305, número de serie 8177569; e) medidor de voltaje Extech.



Los costos específicos de exergía (SPECO) se obtuvieron mediante el registro sistemático de adiciones y eliminaciones de exergía de cada flujo de energía y material (Lazzaretto y Tsatsaronis, 2006). Se tomaron en cuenta tres etapas elementales: (1) Identificación de las fuentes de exergía, (2) Determinación de combustible y producto para cada componente del sistema, y (3) Asignación de ecuaciones de costo-equilibrio (Mabrouk et al., 2018).

## 2. Resultados

En la producción gambusina no se utilizan medidas de seguridad laboral y ninguno de los cooperativistas cuenta con seguridad social de algún tipo. El proceso de producción del grupo La Pompeya se distribuye en tres áreas de trabajo bien definidas: 1) zona de extracción, (comprende puntos subterráneos y afloramientos a tajo abierto), 2) zona de molienda (trituración y pulverizado) y 3) zona de arrastres, estos están dispersos; uno se encuentra a 8 m de la molienda y tres a 68 m. El proceso de fundición no tiene un lugar asignado por lo que la fusión se realiza en la casa de uno de los miembros ubicada en el pueblo de Placeres del Oro y se realiza los viernes al concluir el proceso de amalgamación.

### 2.1. Cadena de suministro

Las actividades del grupo La Pompeya parten de la extracción, sigue el procesamiento del metal y finaliza en la venta. El ciclo de suministro es lineal, comienza el lunes y concluye el viernes, siguiendo una lógica de corte semanal. La venta se realiza en el mercado local de la ciudad de Altamirano y los clientes son básicamente los joyeros locales. Se carece de asistencia técnica especializada y las técnicas implementadas en los procesos son rústicas. La maquinaria y herramientas requieren mantenimiento correctivo de modo constante.

### 2.2. Consumos en el proceso de producción

#### 2.2.1. Consumo y costos de agua

El agua se obtiene del subsuelo y se extrae directamente del tiro principal de la mina. Para saber el destino de toda el agua extraída se midió y aplicó la fórmula SPECO. El grupo La Pompeya actualmente extrae 259.5 m<sup>3</sup> de agua a la semana de los cuales únicamente utilizan 12

m<sup>3</sup> en sus procesos, y el resto se vierte en una barranca que normalmente no tiene agua fluyendo. Solo en tiempo de lluvias se convierte en arroyo temporal. Del total de agua extraída del subsuelo, solo 5 % se utiliza en el proceso de obtención de oro. Se carece de un mecanismo de aprovechamiento del agua que se extrae del subsuelo y que no tiene utilidad. Tampoco se cuenta con algún método de recuperación del agua que se utiliza en el proceso.

Para la obtención de costos se asignó un valor de 0.0049 dólares americanos por litro de agua, ya que es el precio que se paga por agua potable en los pueblos aledaños, dando como resultado un costo de \$1261.13 dólares americanos semanales (Tabla 1).

Tabla 1. Costos de agua del grupo La Pompeya

Actividad	Litros	Costo (USD\$)	Total (USD\$)	%
Desazolve	247,451.48	0.0048	1194.72	95.37
Molienda	8.00	0.0048	0.039	0.00
Amalgamación	12,000.00	0.0048	57.94	4.62
Total	259,459.48		1252.70	100.00

En minería, la utilización de agua es primordial para la separación de minerales durante la extracción y como agente lubricante, de refrigeración y limpieza al momento de la perforación (Panorama Minero, 2012). La pequeña minería no cuenta con un control en el manejo del agua (Chaparro Ávila, 2009). El uso y aprovechamiento eficiente del agua es la clave para continuar gozando de agua en temas de producción en la vida cotidiana de los gambusinos. Actualmente, la obtención del agua no ha representado un problema para el grupo La Pompeya, sin embargo, desconocen el efecto que están generando con la extracción continua del subsuelo, donde solo aprovechan para su actividad el 5 %.

### 2.2.2. Consumo y costo de energía



La energía que consume el grupo La Pompeya corresponde al uso de siete motores, cuatro de ellos se encuentran en los arrastres, otro se utiliza para el bombeo de agua, y los últimos dos activan una quebradora y una pulverizadora.

En la etapa de conminución es donde se consume la mayor cantidad de energía eléctrica. Las quebradoras (quijadas y martillos) consumen entre las dos 702.3 J; esta cifra representa 94 % del consumo de energía de todo el proceso. La maquinaria con la que se cuenta en el grupo es vieja y requiere mantenimiento frecuente, lo cual limita la productividad del proceso. Otro factor por considerar es que se opera intermitentemente para evitar el sobrecalentamiento de los motores. La roca que ingresa en la quebradora de martillos varía en tamaño de 10 a 15 cm, y sale con un tamaño promedio de 2.5 a 5 cm; este producto ingresa a la pulverizadora dando como resultado partículas de tamaño promedio de 0.3 a 0.5 cm, lista para ingresar a los arrastres.

La molienda actual da como resultado un tamaño de partícula relativamente grande para la amalgamación, lo cual genera mayor consumo de potencia por parte de los motores de esta parte del proceso de extracción para liberar las partículas de oro. El costo de energía corresponde a 2,665.39 Kw que se consumen semanalmente a un costo de \$0.12 dólares americanos; esto resulta en un costo de \$323.89 dólares americanos semanales por concepto de energía. Al conocer el costo real se pueden implementar medidas de optimización y utilización de energía de modo puntual (Chen y Hua, 1996).

### 2.2.3. Consumo y costos de horas hombre

Contrario al consumo de energía, el uso de horas hombre se concentra en el proceso de extracción, donde el 90 % del trabajo representa esfuerzo físico, ya que el gambusino extrae la roca directamente de la veta con herramientas manuales. Esto implica que el 67 % del tiempo se dedique a la extracción y otro 27 % al proceso de amalgama, la cual consiste en ingresar de modo manual la roca y el agua a los arrastres. El otro 6 % del tiempo se divide en las actividades de fusión y conminución. Las condiciones de extracción son muy rudimentarias, se carece de equipo de protección, y vestimenta apropiada para la manipulación de la roca, tampoco se cuenta con medidas de seguridad cuando se adentran en las cuevas, situación que incrementa el riesgo de accidentes.

Para obtener el costo de horas hombre invertidas en cada actividad, se asignó el valor de acuerdo con el salario mínimo del diario oficial \$5.99 dólares americanos (IDC online, 2020), el cual dividido en 8 horas de una jornada ordinaria da un costo por hora de \$0.75 dólares americanos, dando como resultado un costo de \$294.29 dólares americanos semanales. Sin embargo, los gambusinos actualmente no se pagan un salario establecido, su acuerdo de trabajo colectivo es de reparto de ingresos iguales después del pago de gastos corrientes.

#### 2.2.4. Consumo y costo de mercurio

Los gambusinos estiman la cantidad de mercurio necesario para la separación del oro que extraen mediante técnicas inducidas durante la colonia. No existen cálculos fundamentados en las características del mineral; por tanto, para efecto del levantamiento de datos de consumo solo se pesó el mercurio antes de ingresar en el proceso de amalgama y la salida en el momento de exprimir la torta. Actualmente los gambusinos del grupo La Pompeya destinan 4,200 kg de mercurio para la separación de oro durante cada ciclo de producción, del cual recuperan solo 66 % del metal alimentado al momento de exprimir la torta de cada arrastre, mientras que el 34 % restante se queda en la torta y en los jales. El costo que se atribuyó fue el que pagan los gambusinos por su adquisición: \$87.49 dólares americanos por kg. El consumo por proceso semanal es de \$123.45, ya que el mercurio recuperado se acumula para el proceso de la siguiente semana (Tabla 2).

Tabla 2. Costo de mercurio del grupo La Pompeya

Descripción	Masa (g)	Costo (USD\$)
Ingreso a los arrastres	4200.00	365.00
Recuperación al exprimir la torta	2789.00	242.38
Colas y torta	1411.00	122.62

### 2.2.5. Consumo y costo de gas licuado de petróleo (LP)

El área de trabajo para el proceso de fundición no está definida y depende de las condiciones climáticas y de la movilidad de los gambusinos. Normalmente se funde en la casa de un integrante del grupo y las condiciones son a campo abierto, con el uso de un soplete y un crisol, donde además de los gases de combustión, también se emite vapor de mercurio, el cual es altamente tóxico. En esta etapa no se recupera el mercurio. Actualmente, en el proceso de fundición se consumen 6 kg de gas LP para separar el oro de una torta mineral que en promedio pesa 0.2182 kg, dando como resultado un botón de oro de 0.0869 kg. Lo demás se descarga. El costo que se le atribuyó al combustible fue de \$1.22 dólares americanos por kg, dando un costo de \$7.29 dólares americanos a la semana.

### 2.3. Relación costo - beneficio de acuerdo con los datos de exergía

Se determinaron las corrientes de exergía a los insumos, agua, energía y horas hombre. Con esto, se conocieron los costos reales del proceso de extracción de oro por semana, identificando que los costos más altos se concentran en la extracción del agua, mano de obra y energía. Al aplicarse los costos de exergía, se identifica que el 56 % de los costos del proceso de producción comprende al agua que se extrae y que no se utiliza totalmente en el proceso (Tabla 3). Sin embargo, representa un costo ambiental alto para los gambusinos y pobladores que se benefician de esa agua subterránea.

Tabla 3. Distribución de costos por insumos en el proceso de extracción de oro de La Pompeya.

Concepto	Cantidad	Unidad de medida	Costo unitario (USD\$)	Total (USD\$)	%
Explosivos	30.00	Truenos	5.23	156.91	7.04
Mercurio	1.41	Kg	86.91	122.62	5.50
Mano de obra	9.00	Gambusinos	35.70	321.26	14.42
Gas LP	6.00	Kg	1.21	7.24	0.33
Gasolina	25.00	L	0.97	24.14	1.08
Energía	2,665.39	Kw	0.12	321.72	14.44
Agua	259,459.48	L	0.0048	1252.70	56.22
Roca Mineralizada	4.00	T.	5.43	21.73	0.98
			Total	USD \$2228.31	100

La asignación del costo a los insumos se realizó conforme los siguientes criterios: 1) agua: se le asignó el valor de \$0.0049 dólares americanos por litro, este costo es el que se paga en las comunidades aledañas por el suministro de agua en pipa; 2) roca: se le asignó el costo de \$5.47 dólares americanos por tonelada, este costo es el que se paga en promedio por cada tonelada de arena o grava destinado para la construcción en las comunidades aledañas; 3) energía: se consideró una tarifa de 0.12 dólares americanos por Kw/hr; 4) mano de obra: se tomó en cuenta el salario mínimo oficial de \$5.99 dólares americanos (IDC online, 2020), el cual dividido en 8 horas de una jornada ordinaria da un costo por hora de \$0.75 multiplicado por 6 días de la semana; 5) explosivos, mercurio, gas, gasolina: el costo de estos insumos es el monto que los gambusinos pagan a sus proveedores.

Los ingresos brutos reportados por la venta de 87 g de oro a la semana, a un precio de \$ 27.22 USD por gramo de oro, corresponden a un total de ingresos brutos de \$ 2368.09 USD. Después de gastos corrientes con costos externalizados los gambusinos reflejan un ingreso bruto de \$ 124.77 USD. Con esta utilidad los gambusinos se encuentran por debajo de los ingresos que se pueden obtener en otras actividades. Atribuyendo los costos reales de producción, es notable que el uso del agua sin una medida de reutilización impacta drásticamente. No obstante, como es un costo que hasta el momento no está contemplado, los gambusinos no pueden asumir de modo monetario el impacto generado.

#### 2.4. Áreas de oportunidad

La operación actual del grupo de gambusinos está inclinada en atender únicamente el aspecto económico que cubre sus necesidades inmediatas, dejando clara la ausencia de conocimientos y recursos económicos para la inversión en tecnología e innovación. Sin embargo, con los datos arrojados por la investigación se resaltan áreas donde se pueden aplicar medidas de mejora que no requieren gran inversión, más bien se depende directamente del compromiso e interés por parte de los gambusinos por mejorar sus condiciones actuales. Las áreas identificadas son:

- Proceso de amalgamación: crear mecanismos más efectivos para exprimir la torta y ser eficiente en la recuperación del mercurio.

- Proceso de fundición: adaptar un mecanismo (condensador) para recuperar el mercurio.
- Extracción del agua: 1) utilizar de modo eficiente el agua en los procesos; 2) utilizar el agua que se desecha o reintegrarla al manto freático donde no afecte el desazolve del tiro de la mina.

Las condiciones de explotación a pequeña escala permiten una planeación del proceso de acuerdo con las condiciones de inversión con la que cuentan los gambusinos, de tal forma que se induzca la explotación a una forma sostenible donde se beneficie directamente a los productores, procurando el menor daño posible al ambiente. Existen otras áreas y otros métodos para incidir en un cambio en la producción minera del estado de Guerrero. Sin embargo, las acciones sugeridas fueron seleccionadas bajo un criterio de opciones inmediatas, donde los gambusinos tienen la decisión de injerencia, ya que en la actualidad las autoridades locales y estatales han manifestado no contar con recursos etiquetados para el apoyo a la pequeña minería; por lo tanto, la decisión de generar cambios se encuentra directamente en los actores involucrados en primer plano: 'los gambusinos'. Considerando que los gambusinos son actores vulnerables y su actividad una actividad estratégica, su fortalecimiento puede generar cambios sociales que redunden en mayor justicia ambiental y social en sus territorios (Rodríguez et al., 2015).

### 3. Discusión

En la actualidad, para satisfacer las necesidades de las sociedades se requiere obtener recursos minerales a partir de cuerpos minerales cada vez más pobres. Intrínsecamente, procesar leyes más bajas de minerales requiere de mayores consumos de agua y energía. Como consecuencia del uso excesivo de estos dos recursos necesariamente hay una afectación para los asentamientos humanos cercanos a los sitios mineros.

Por otro lado, el procesamiento de minerales con baja ley metálica resulta en la generación de más residuos sólidos y más emisiones gaseosas tóxicas, además de posibles filtraciones hacia cuerpos de agua.

Esto supone diversos problemas derivados de la actividad adicionales a aquellos problemas técnicos asociados a los aspectos metalúrgicos. Para abordar esta problemática tan compleja, se ha sugerido en diversos reportes (Abadías Llamas et al., 2019; Alvarado et al., 2002;

Drielsma et al., 2016; Ignatenko et al., 2007; Klaasen et al., 2010; Norgate y Haque, 2010; Norgate y Jahanshahi, 2010; Norgate et al., 2007; Rankin 2017) la necesidad de implementar análisis de ciclo de vida y otras estrategias, para tener indicadores no solo técnicos sino también socioeconómicos y ambientales que permitan tener un mejor entendimiento de la problemática asociada al tratamiento de minerales a pequeña y gran escala.

De esto se deriva el uso de la exergía como un indicador útil que permite encontrar puntos de mejora en términos de generación de contaminantes y de minimización del consumo de energía. La exergía se puede definir como la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener, es decir la exergía representa la disponibilidad de energía para llevar a cabo transformaciones en sistemas abiertos y/o en sistemas cerrados (Riekert, 1974). De esta manera, la valoración de la exergía a lo largo de la ruta de proceso resulta un indicador de sustentabilidad que se debe atender.

Con el análisis exergético de las operaciones de extracción y refinación de oro del grupo La Pompeya surge una propuesta que puede dar respuesta al cumplimiento de los objetivos de la agenda mundial para el desarrollo sostenible 2030, la cual contempla la reducción de impactos ambientales, el aprovechamiento eficiente del agua y su recuperación, y en términos generales mejorar las condiciones de vida de los pobladores (World Economic Forum, 2018).

Según Georgescu-Roegen (2013), la minería no precisamente debe ser una actividad depredadora si se produce bajo un esquema sostenible, donde se incorpore el análisis económico, el ambiental y el accionar de las leyes de la termodinámica. De esta forma se abre el sistema de producción como un accionar que influye, interactúa e impacta en el entorno. Bajo esta consideración, la actividad gambusina al ser contemplada como un sistema abierto que comprende entradas, procesos y salidas donde se generan desechos, es posible analizarlo de modo propositivo, con el apoyo de los costos de exergía (Lozano y Valero, 1993).

Al incluir las reglas y herramientas teóricas de la exergía en el sistema productivo y la conversión de energía, se puede conocer la cantidad total de exergía requerida por un sistema productivo, permitiendo caracterizarlos y asignarles un costo económico (Valero y Torres, 2006). De esta forma, en la actividad gambusina es posible conocer los costos reales que se



generan por su actividad diaria, de tal forma que se puede hacer un comparativo entre costo/beneficio.

Al contar con esta información en la actividad del grupo La Pompeya es más fácil definir criterios para fines de optimización y diagnóstico. Al conocer a detalle el proceso de producción, sus costos de exergía se puede explicar con mayor profundidad y con la mayor simplicidad la función productiva de los subsistemas que incorporan su ciclo de producción (Lozano et al., 1994), permitiendo a los gambusinos identificar con mayor claridad dónde se están generando mayores costos tanto económicos como ambientales, abriendo la posibilidad de transformar su producción convencional en una actividad sostenible.

Aunque el levantamiento de datos de exergía no contempla toda la interacción de bienes y servicios que se desarrolla dentro de la cadena de suministro (Rocco, 2016), los datos que proporciona son de gran utilidad para reducir costos operativos y sobre todo de impacto ambiental; estos datos sirven como un perfecto complemento para el análisis de costo convencional, incorporando costos externalizados que, con una herramienta administrativa común no sería posible, de tal forma que en su conjunto se ofrecen alternativas de reducción de impactos innecesarios y generar opciones de mejora con un enfoque sostenible.

## Conclusiones y reflexiones finales

La producción gambusina del grupo La Pompeya cuenta con un fuerte potencial para desarrollarse de modo sostenible, mediante acciones que representan un bajo costo de inversión y que impactan en la reducción de costos económicos y ambientales. Esta investigación comprueba que la actividad gambusina del grupo La Pompeya es una fuente generadora de riqueza. Sin embargo, al no ser llevada a cabo de modo correcto, representa un riesgo latente para los gambusinos y sus familias.

Al ser considerados los datos obtenidos se pueden implementar acciones dirigidas a la reducción de costos, mejoras en la producción y aprovechamiento eficiente de los recursos sin necesidad de aplicar fuertes inversiones de capital.

Se reconoce que para generar cambios significativos se requiere: disponibilidad y conocimientos de los agentes involucrados, dejando la decisión en manos de los propios

gambusinos que desarrollan la actividad, con el propósito de mejorar las condiciones actuales de modo inmediato. No obstante, para generar un cambio representativo es importante la participación de los agentes de cambio: Universidad, sociedad civil, gobierno y empresas públicas.

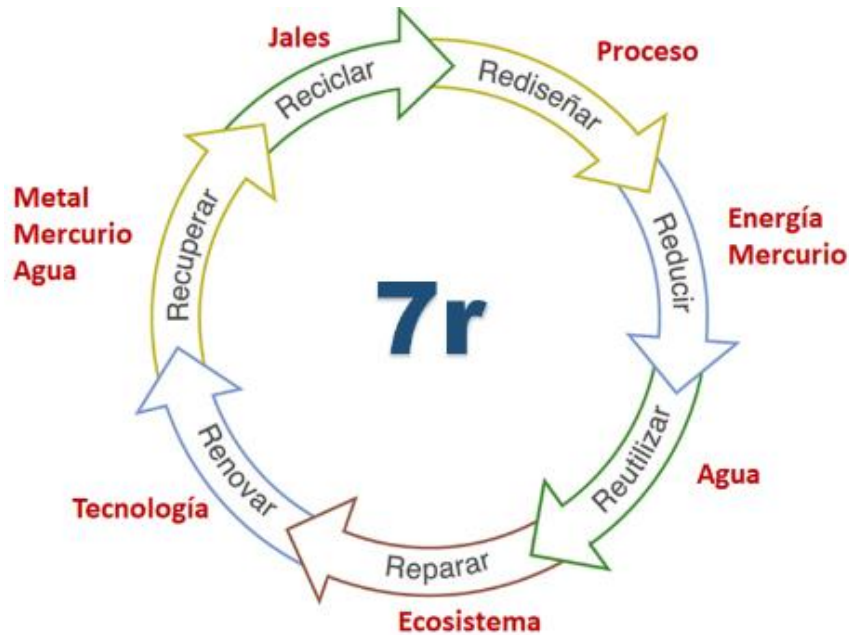
Las actividades económicas son muy complejas, por lo que es preciso hacer uso de todas las herramientas disponibles para analizar, diagnosticar y generar estrategias que permitan cumplir con los objetivos de una producción sostenible que garantice la permanencia de la producción en una línea de tiempo continua. Por lo que es prescindible complementar los datos de exergía con información del entorno, condiciones sociales, capacidad de inversión, costos administrativos, costos de las propuestas, etc., toda esta información adicional debe proporcionar un panorama más amplio en la toma de decisiones para garantizar la funcionalidad y puesta en marcha de las propuestas sugeridas.

#### -Aporte

Las propuestas emanadas del levantamiento de datos de exergía muestran de modo claro los costos que se generan por la actividad gambusina que desarrolla actualmente el grupo La Pompeya; de igual forma es fácil percibir los impactos generados por la actividad expresados de modo simple y económico, mostrando a los gambusinos en forma práctica lo que su actividad impacta al ambiente y a sus bolsillos, destacando la fuerte necesidad de implementar medidas de reducción de costos, mejorar los procesos y aprovechar de modo eficiente los recursos disponibles.

La realidad que enfrentan los gambusinos en las comunidades es el modo de vida que involucra factores sociales y políticos que forman parte de una realidad de las comunidades, ya sea por presencia de minería gambusina o gran minería (Ontiveros y Bórquez, 2018), donde la extracción de oro se ha convertido en una opción tangible de mejoramiento de las condiciones actuales, motivo por el cual es prescindible generar propuestas que contemplen una visión sostenible combatiendo la pobreza, con el menor de los impactos ambientales en el entorno. Se propone atender las acciones desde un enfoque de las 7r de la sostenibilidad (*Figura II*).

Figura II. 7r de la sostenibilidad sugerida para el grupo La Pompeya



Tomando como base las condiciones económicas del grupo La Pompeya y la importancia de los impactos generados en cada uno de los procesos, se sugiere una ruta crítica de acciones enfocadas a atender las necesidades de lo prioritario, lo importante y lo necesario, partiendo del mínimo de inversión requerida (Figura III). Las acciones sugeridas son recomendaciones, el orden se deja a consideración de los gambusinos.

Figura III. Ruta crítica sugerida para el grupo La Pompeya

1. Recuperación de mercurio en la fundición	1. Recuperación de mercurio en la amalgama	1. Recuperación del agua no utilizada	Lo prioritario
2. Rediseño de los procesos	2. Reutilización del agua	2. Reprocesamiento de jales mineros	Lo importante
3. Renovación de tecnología	3. Recuperación de otros materiales	3. Reparación del ecosistema	Lo necesario

## Referencias

- Abadías Llamas, A., Valero Delgado, A., Valero Capilla, A., Torres Cuadra, C., Hultgren, M., Peltomäki, M., Roine, A., Stelter, M., Reuter, M.A., (2019). Simulation-based exergy, thermo-economic and environmental footprint analysis of primary copper production. *Miner. Eng.* 131, 51–65. doi:10.1016/j.mineng.2018.11.007.
- Alvarado, S., Maldonado, P., Barrios, A. y Jaques, I. (2002). Long term energy-related environmental issues of copper production. *Energy* 27, 183–196. doi:10.1016/S0360-5442(01)00067-6
- Chaparro Ávila, E. (2009). Los procesos mineros y su vinculación con el uso del agua. *Santiago de Chile: CEPAL*.
- Chen, Q., y Hua, B. (1996). Application of exergoeconomics to the analysis and optimization of process systems. *Journal of Thermal Science*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/BF02663724>
- Drielsma, J.A., Russell-Vaccari, A.J., Drnek, T., Brady, T., Weihed, P., Mistry, M., Simbor, L.P., (2016). Mineral resources in life cycle impact assessment—defining the path forward. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 85–105. doi:10.1007/s11367-015-0991-7
- Georgescu-Roegen, N. (2013). *La ley de la entropía y el proceso económico*. Prensa de la Universidad de Harvard. Recuperado de <https://www.degruyter.com/document/doi/10.4159/harvard.9780674281653/html>
- González-Sánchez, F., y Camprubí, A. (2010). La pequeña minería en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 100-108. Recuperado de [http://scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-33222010000100006&script=sci\\_arttext](http://scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-33222010000100006&script=sci_arttext)
- Ignatenko, O., van Schaik, A., Reuter, M.A. (2007). Exergy as a tool for evaluation of the resource efficiency of recycling systems. *Miner. Eng.* 20, 862–874. doi:10.1016/j.mineng.2007.03.005
- IDC online. (2020). Salarios mínimos vigentes para 2020 | IDC. Retrieved March 19, 2020, Recuperado de <https://idconline.mx/laboral/2020/01/03/salarios-minimos-vigentes-para-2020>
- Klaasen, B., Jones, P.T., Durinck, D., Dewulf, J., Wollants, P., Blanpain, B. (2010). Exergy-based efficiency analysis of pyrometallurgical processes. *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.* 41 B, 1205–1219. doi:10.1007/s11663-010-9424
- Lazzaretto, A., y Tsatsaronis, G. (2006). SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, 31(8-9), 1257-1289. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.011>. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544205000630>
- Lozano, M. A., Bartolomé, J. L., Valero, A., y Reini, M. (1994, July). Thermo-economic diagnosis

of energy systems. In Flowers (Vol. 94, pp. 6-8). Recuperado de [http://publicationslist.org/data/miguel.a.lozano/ref-111/ar29\\_a29\(cp0078\).pdf](http://publicationslist.org/data/miguel.a.lozano/ref-111/ar29_a29(cp0078).pdf)

Lozano, M.A. y Valero, A. (1993). Theory of the exergetic cost. *Energy*, 18 (9), 939-960. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/036054429390006Y>

Mabrouk, A., Labidi, J., Rekik, A., y Jeday, M. R. (2018). Exergoeconomic analysis. In *Exergy for A Better Environment and Improved Sustainability 1* (pp. 895-904). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62572-0\\_57](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62572-0_57) Recuperado de [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62572-0\\_57](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62572-0_57)

Norgate, T. y Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *J. Clean. Prod.* 18, 266–274. doi:10.1016/j.jclepro.2009.09.020

Norgate, T. y Jahanshahi, S. (2010). Low grade ores - Smelt, leach or concentrate? *Miner. Eng.* 23, 65–73. doi:10.1016/j.mineng.2009.10.002

Norgate, T.E., Jahanshahi, S., Rankin, W.J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. *J. Clean. Prod.* 15, 838–848. doi:10.1016/j.jclepro.2006.06.018

Ontiveros, L. S., y Bórquez, L. C. (2018). La “re-existencia” desde los territorios comunitarios y el patrimonio biocultural frente a la mega-minería a cielo abierto en México. *Revista de Geografía (Recife)*, 35(2), 388-411. Recuperado de <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/234400/29089>

Panorama Minero. (2012). La industria minera, hacia un consumo más eficiente de agua. Recuperado el 18 de marzo de 2020, de <http://panorama-minero.com/noticias/la-industria-minera-hacia-un-consumo-mas-eficiente-de-agua/>

PNUMA Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente. (2012). *Guía Práctica: Reducción del uso de mercurio en la minería de oro artesanal y de pequeña escala*. Recuperado de [www.artisanalgoldcouncil.org](http://www.artisanalgoldcouncil.org)

Rankin, W.J. (2017). Sustainability—the role of mineral processing and extractive metallurgy. *Trans. Institutions Min. Metall. Sect. C Miner. Process. Extr. Metall.* 126, 3–10. doi:10.1080/03719553.2016.1264164

Riekert, L (1974). The efficiency of energy-utilization in chemical processes. *Chem Eng Sc.* 29 (7), 1613 – 1620. doi: 10.1016/0009-2509(74)87012-0

Rocco, M. V. (2016). *Primary exergy cost of goods and services: an input-output approach*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43656-2>. Recuperado de <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-43656-2>

Rodríguez, I., Inturias, M. L., Robledo, J., Sarti, C., Borel, R. y Melace, A. C. (2015). Abordando

la Justicia Ambiental desde la transformación de conflictos: experiencias con Pueblos Indígenas en América Latina. *Revista de Paz y Conflictos*, 8(2), 97-128. <https://doi.org/10.30827/revpaz.v8i2.3311>. Recuperado de <https://revistaseug.ugr.es/index.php/revpaz/article/view/3311>

Sarmiento, M., Ayala, H., Urán, A., Giraldo, B., Perea, J., y Mosquera, A. (2013). Legitimidad e innovación en la minería: el caso del Programa Oro Verde. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 284-303. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.14.2013.1005>. Recuperado de <https://revistas.flacsoandes.edu.ec/letrasverdes/article/view/1005>

Servicio Geológico Mexicano (2018). *Panorama Minero del Estado de Guerrero 2018*. Recuperado de <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/GUERRERO.pdf>

Suárez, L. G. (2014). La minería manual en Colombia: Una comparación con América Latina. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (35), 37-44. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4919951>

Valero, A., y Torres, C. (2006). Application of thermoeconomics to operation diagnosis of energy plants. *Exergy, Energy System Analysis and Optimization*, 2, 146-161.

World Economic Forum. (2016). *Mapping Mining to the Sustainable Development Goals: An Atlas*. Recuperado de [http://unsdsn.org/wp-content/uploads/2016/11/Mapping\\_Mining\\_SDGs\\_An\\_Atlas.pdf](http://unsdsn.org/wp-content/uploads/2016/11/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas.pdf)