

Valorando los Recursos Minerales de América Latina

Appraising the mineral resources in Latin America

Jose-Luis Palacios¹, Guiomar Calvo², Alicia Valero³, Antonio Valero⁴

¹ Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Mecánica, Quito - Ecuador. jose.palacios@epn.edu.ec

² Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), Universidad de Zaragoza, Zaragoza- España. gcalvose@unizar.es

³ Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), Universidad de Zaragoza, Zaragoza- España. aliciavd@unizar.es

⁴ Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), Universidad de Zaragoza, Zaragoza- España. valero@unizar.es

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 15-10-2018

Fecha de aceptación: 13-03-2019

Resumen

Desde tiempos de la colonia, América Latina ha sido una región que tradicionalmente ha suministrado materias primas que han servido para el desarrollo económico y productivo de otras regiones del mundo. Minerales de América Latina, como hierro, aluminio, oro, plata y cobre, entre otros, han llegado a ser “commodities” altamente valorados en un mundo globalizado. Aparte de los conflictos sociales, ambientales, políticos, etc., que ha generado la explotación de recursos minerales en la región, su extracción también implica la pérdida de capital mineral. En este trabajo recogemos resultados de investigaciones realizadas respecto a la evaluación cuantitativa de la pérdida de capital mineral desde un enfoque no-tradicional en veinte países de América Latina y el Caribe (AL&C). Los estudios han sido fundamentados en la Segunda Ley de la Termodinámica y han permitido identificar aspectos que no son apreciables con análisis tradicionales. El principal resultado muestra que la pérdida de capital mineral en AL&C para el año 2013 no fue compensada con los ingresos económicos de la venta de minerales. Esto plantea un desafío para la región, que cuenta con la suficiente reserva de minerales que la sociedad moderna requiere para mantener su estándar de vida. Si se busca una producción minera más sustentable en la región, se necesitará un cambio hacia una visión más soberana de sus recursos.

Palabras clave: América Latina, explotación minera, costo exergético de reposición, pérdida de capital mineral, Segunda Ley de la Termodinámica

Abstract

Since colonial times, Latin America has had a tradition for supplying raw materials, which have contributed strongly to the economic development of other regions. Non-fuel minerals from Latin America, such as, iron, aluminum, gold, silver and copper have become high-value commodities in a globalized market. The exploitation of mineral resources in the region has produced social, environmental and political issues. This exploitation also implies the loss of mineral wealth in the region. The current work gathers information related to investigations about the quantitative assessment of the loss of mineral wealth from a non-traditional approach in twenty countries in Latin America and the Caribbean (AL&C). This research has been based on the Second Law of Thermodynamics and has enabled to identify aspects that are hidden in traditional analysis. The main result shows that the loss of mineral wealth in AL&C in 2013 was not compensated by the revenues coming from the sales of minerals in that year. This fact establishes a challenge for the region that maintains a considerable reserve of minerals required in a modern society for keeping today's standard of living. A change towards a more sovereign positions on mineral resources in the region would be required if a more sustainable production of minerals is being sought in the region.

Keywords: exergy replacement cost, exploitation of non-fuel minerals, Latin America, loss of mineral wealth, Second Law of Thermodynamics

1. INTRODUCCIÓN

No solo los artefactos eléctricos y electrónicos que utilizamos en nuestra vida diaria se encuentran diseñados y contruidos con minerales. Los requerimientos del estilo de vida de la sociedad actual han hecho que se amplíe su rol, por lo que, en la declaración realizada por las Naciones Unidas en Johannesburgo en el año 2002, se resaltó la necesidad de los minerales para sostener la sociedad moderna [1]. El consumo de algunos minerales ha aumentado tanto que para cubrir la demanda creciente, la producción ha tenido que aumentar significativamente. Un ejemplo de aquello es el cobre, cuya producción en los últimos diez años ha sido equivalente a la producción del 25% de cobre en toda la historia de la humanidad [2].

América Latina tiene un rol protagonista en la producción mundial de minerales. En el presente estudio se ha realizado el análisis en veinte países de América Latina (AL&C 20). Esta región tiene reservas importantes de minerales a nivel mundial como: niobio, litio, renio, cobre, plata y estaño, entre los seis primeros puestos con base en la información publicada por Stephen et al. [3], Figura 1. De igual manera, AL&C es un productor destacado a nivel mundial de niobio, renio, litio, plata, cobre y molibdeno, entre otros, Figura 1.

En los acuerdos de la COP 21 en Paris se estableció la necesidad del uso de tecnologías de energías renovables para mitigar los efectos del cambio climático[4]. En este sentido, se han publicado varios reportes sobre escenarios energéticos con un aumento considerable de energías renovables para cumplir con los objetivos de la COP 21 [5]–[7]. En una publicación reciente, Valero y colegas [8] reportan que abandonar la dependencia de los combustibles fósiles, especialmente en la generación de energía eléctrica, necesariamente implicaría pasar a una dependencia de materias primas. En el estudio se señalan como minerales clave para las tecnologías de energías renovables al aluminio, hierro y cobre, entre otros. Se resalta también que el sector del transporte sería uno de los que más requerimientos de minerales, como litio, cobalto, etc., necesitará para la fabricación de baterías [8]. América Latina es actualmente uno de los principales productores de estos minerales (ver Figura 1). Así que la región tendrá un rol más importante en los próximos años para garantizar el cambio hacia las tecnologías renovables.

Según cifras de la Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL), en el 2016 el aporte de la minería al producto interno bruto (PIB) para los países de América Latina y el Caribe fue del 4.7% [9]. Un informe de la CEPAL sobre la inversión extranjera en América Latina y el Caribe indica que entre el 2003 y 2015 fueron anunciados más de 500 proyectos en minería metálica con un monto superior a los US\$ 150 mil millones [10]. La gran mayoría de estos proyectos corresponden a la explotación de oro y plata.

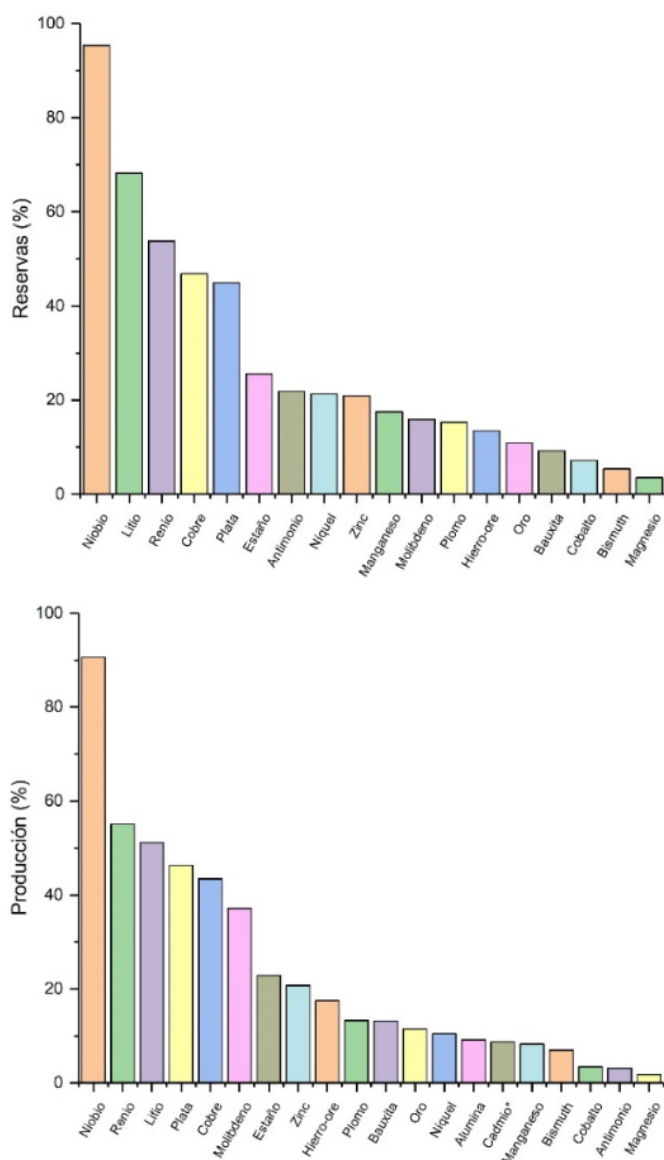


Figura 1: Producción y reservas de minerales en América Latina y el Caribe (AL&C) en 2016 a nivel mundial. (con base en: [3])

Sin embargo, las actividades mineras han generado una serie de conflictos sociales, ambientales, políticos, etc., en la región. En el portal del Observatorio del Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL) se registran más de 240 conflictos [11]. En el Atlas de Justicia Ambiental se identifican problemas relacionados con la minería en América Latina y el mundo [12]. Su número es considerable en los países de América del Sur.



Figura 2. Conflictos mineros reportados en la plataforma de OCMAL (Fuente: [11])

Un problema serio en la región es también la producción ilegal de oro. En el 2013 se estimó que dicha producción fue equivalente a 158 toneladas. Los países en los cuales se registró una mayor producción ilegal de oro fueron Venezuela, Colombia y Ecuador [13]. En un informe sobre los flujos financieros ilícitos de la minería en Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia ascendieron a un valor acumulado de US\$ 5478 millones en catorce años (2000-2014). Este valor equivaldría al 2% de las exportaciones mineras [14].

Ciertos minerales son esenciales para el funcionamiento de artefactos electrónicos y simplemente no podrían ser reemplazados por otros minerales [15]–[17]. Por este motivo, desde la perspectiva de los países industrializados han sido publicados estudios sobre las restricciones de suministro de minerales [18]–[23]. Así por ejemplo, los Estados Unidos dentro del programa “National Defense Stockpile (NDS Program)” en el reporte sobre materiales críticos en 2015, se identifica por su posible déficit de suministro al óxido de aluminio y antimonio provenientes de Venezuela y México, respectivamente [23]. El Servicio Geológico Británico (BGS por sus siglas en Inglés) [24] publicó una lista de elementos químicos en riesgo considerados como esenciales para su economía y para mantener el estilo de vida actual. En dicha lista se identifica a México, Chile y Brasil como un riesgo medio de suministro de plata, renio y niobio, respectivamente. Chile aparece con un riesgo bajo para el suministro de cobre [24]. En el mismo contexto, la Comisión Europea en su reporte sobre “Critical Raw Mate-

rials”, México y Brasil fueron identificados como los países de suministro principal de niobio y fluorita [25], [26]. Estos informes evidencian la importancia que tienen los minerales provenientes de América Latina para mantener las economías y el estilo de vida en países industrializados. En cierta forma estos países valoran más, desde sus propios intereses, estos recursos minerales que la propia América Latina.

Investigaciones sobre minería en la región se centran en tratar temas económicos, sociales o de sostenibilidad ambiental, etc. Sin embargo, ninguna de estas investigaciones logra estimar de manera cuantitativa la pérdida de capital mineral en la región producto de la explotación minera. En tal sentido, en esta publicación recogemos los resultados más importantes de las investigaciones que han sido publicadas por el grupo de trabajo en el Centro de Investigación de Recursos Energéticos (CIR-CE) sobre América Latina y la pérdida de capital mineral.

2. MINERALES Y TERMODINÁMICA

Existe la necesidad de evaluar de manera cuantitativa los recursos minerales. Dicha evaluación puede realizarse tomando en cuenta análisis en términos másicos, económicos o considerando propiedades físicas. Revisando análisis en masa, algunos autores han realizado estudios de “Material Flow Analysis (MFA)” considerando a América Latina en su conjunto [27] o de países individuales, como Chile [28], Colombia [29], Ecuador [30], Brasil [31] y Argentina [32], por mencionar algunos. La desventaja de los análisis fundamentados en masa es que no se consideran aspectos importantes de los minerales, como su escasez geológica. Así por ejemplo, una tonelada de hierro puede ser comparada en términos másicos con una tonelada de oro, pero el enfoque de masa no considera que el oro es más escaso y su proceso de producción requiere más energía que el hierro. Otra forma de evaluar los minerales es en términos de los precios de los minerales en el mercado. La desventaja intrínseca que presenta esta forma de evaluación es que los precios de los metales son volátiles por naturaleza [33]–[35] y existen muchos factores que influyen sobre ellos [33], [36]. Una alternativa para la evaluación adecuada de los minerales es considerando leyes físicas. En tal sentido, Valero [37] plantea una disciplina llamada “Geonomía Física” para la evaluación cuantitativa de los minerales. El concepto clave en esta evaluación es el Costo Exergético de Reposición (ERC por sus siglas en Inglés) que se fundamenta en la Segunda Ley de la Termodinámica [38], [39]. ERC estima la energía necesaria para recuperar los minerales una vez que han sido utilizados y dispersados completamente, a sus condiciones iniciales empleando las tecnologías actuales. En la Tabla 1 se ordenan en forma descendente según su valor de ERC los principales minerales producidos en AL&C.

Tabla 1. Costo exergético de reposición para algunos minerales comerciales en GJ por tonelada de elemento (Fuente: [18]).

Elemento	Mineral	ERC (GJ/ton)
Oro	Oro nativo	553,250
Plata	Argentita	7,371
Zinc	Esfarelita	1,627
Aluminio	Gibbsita	627
Cobre	Calcopirita	292
Hierro	Hematites	18

Con el concepto de ERC la evaluación de los minerales es más adecuada, así por ejemplo el oro presenta un valor superior al del hierro. Valores elevados de ERC identifican minerales con mayor calidad Termodinámica por su escasez y mayor dificultad en el proceso de extracción y refinación. El ERC también expresa cierta relación (aunque no buscada) con los precios de los minerales, el precio del oro en 2015 fue de \$37.4 millones USD/t, mientras que el hierro de mina fue de \$81 USD/t [40].

Investigaciones publicadas por el grupo de investigación en CIRCE han empleado el concepto de ERC para evaluar la pérdida de capital mineral en Colombia [41], España [42], [43] y la Región Andina [44]. En las últimas publicaciones acerca de América Latina [45], [46], el uso del ERC ha permitido identificar aspectos que no son apreciables en un análisis fundamentado en masa o términos de precio de los minerales. En la siguiente sección se mencionan los principales resultados de los estudios realizados para AL&C.

3. LA PÉRDIDA DE CAPITAL MINERAL EN AMÉRICA LATINA

Cuando un determinado mineral es extraído de una mina y después es sometido a procesos de molienda, trituración y refinación para obtener el metal deseado, nunca podrá ser devuelto a sus condiciones originales [38], [45]. Esta pérdida es lo que se identifica como “pérdida de capital mineral” y es la que se evalúa mediante el ERC.

En una publicación reciente [41], se evaluó la pérdida de capital mineral en AL&C, combinando el ERC con el precio de mercado de los minerales se estimó el costo que tendría la reposición hipotética de minerales a su condición inicial en las minas. Esta reposición se supone con fuentes de energía de menor valor comercial (LBP) y otra de mayor valor (UBP). Después, estableciendo una comparación entre el costo de recuperación con el PIB total de cada país, se estimó el costo que representó la explotación de minerales para el 2013. Esta metodología permitió llevar a cabo una comparativa para poder analizar si los costos de reposición (LBP y UBP) están siendo compensados por los beneficios mineros obtenidos por cada país medido por la razón entre el $GDP_{extractive}/GDP_{total}$. La metodología completa para la estimación de la pérdida capital mineral en la región puede encontrarse en [41].

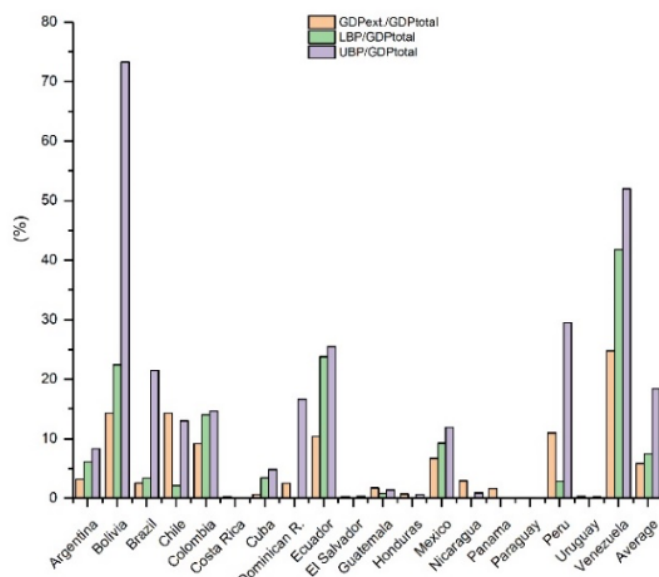


Figura 3. Resumen de la evaluación de la pérdida de capital mineral para veinte países de América Latina (AL&C) en 2013. (con base en: [41])

En la Figura 3 se indican los valores para establecer la comparación para estimar la pérdida de capital mineral en la región. Como se puede observar los valores de recuperación de los minerales (LBP/GDPtotal and UBP/GDPtotal) es superior a los ingresos de la venta de los minerales ($GDP_{extractive}/GDP_{total}$). Por lo tanto, en términos generales y desde el punto de vista termodinámico, la pérdida de capital mineral no fue compensada por los ingresos económicos recibidos por la venta de minerales en 2013 [41].

Con la utilización del ERC también se determinaron las rutas de exportaciones de minerales de AL&C en el 2013 [46], Figura 3. Los principales socios comerciales para la región fueron China y Estados Unidos. El empleo del ERC permitió visualizar la ruta de minerales de poca masa, pero con alto valor de ERC por su escasez y mayor dificultad en el proceso de extracción y refinación, como el aluminio y el oro que fueron exportados a América del Norte (principalmente Estados Unidos). Se resalta también que la pérdida de capital mineral en la región es mayor debido a la extracción de estos minerales de mayor calidad Termodinámica en lugar de otros como el hierro que tiene mayor masa. En un estudio fundamentado en análisis másico, el oro y la plata serían desapercibidos, debido a las bajas cantidades de exportación. En el estudio se determinó también que AL&C produce más minerales de los que consume internamente.

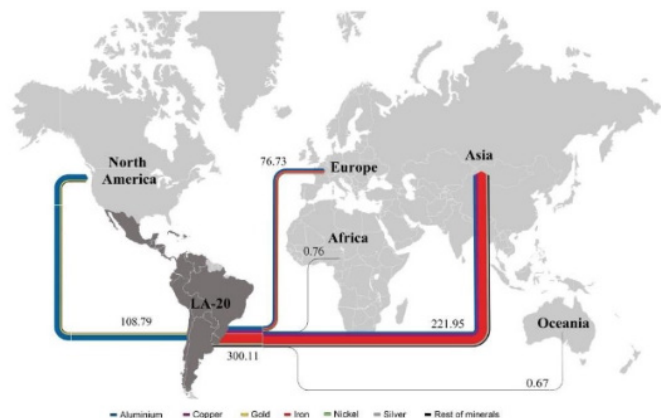


Figura 4. Rutas de exportación de minerales en ERC (Mtoe) desde veinte países de América Latina y el Caribe (AL&C) en 2013. Debido a la escala solo algunos minerales han sido incluidos. (Fuente: [46])

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

América Latina desde tiempos de la colonia ha jugado un rol importante en el suministro de materias primas a nivel mundial. En el caso de minerales, la región es una de las principales en la producción de hierro, aluminio, cobre y de metales preciosos como oro y plata. La explotación de los recursos minerales conlleva la aparición de conflictos de orden económico, social, ambiental, político, etc. Un aspecto que no se trata en publicaciones científicas es la pérdida de capital mineral. Cuando los recursos minerales son extraídos en un país o en la región de una mina, estos nunca podrán ser recuperados a su condición original, a esto se denomina como pérdida de capital mineral. Precisamente en esta publicación se han recogido los resultados más importantes de las investigaciones realizadas por el grupo de investigación en el Centro de Investigación de Recursos Energéticos (CIRCE) sobre la pérdida de capital mineral en veinte países de América Latina y el Caribe (AL&C). En la estimación de la pérdida de capital mineral en la región se siguió un enfoque no tradicional fundamentado en leyes físicas. Esta aproximación ha permitido identificar aspectos que son comúnmente ignorados en análisis fundamentados en masa (toneladas) o precios de los minerales en el mercado (dólares por tonelada).

Los resultados de las investigaciones realizadas indican que los ingresos económicos provenientes de la venta de minerales, no compensó la pérdida de capital mineral en la AL&C en 2013. Es decir, que las condiciones actuales del mercado no permiten el resarcimiento de los recursos minerales en la región. Lo que plantea una interrogante para establecer mecanismos que permitan determinar el “precio justo” de los minerales. Informes de instituciones de otras regiones del mundo establecen como prioritarios ciertos minerales provenientes de la región para mantener sus industrias y sus economías. Lo que muestra que otras regiones del mundo, desde sus intereses particulares, valoran mucho más los recursos minerales provenientes de América Latina.

El aumento de las tecnologías renovables para mitigar los efectos del cambio climático requerirá necesariamente más materias primas, minerales. Muchos de estos minerales son producidos en la región e identificados como críticos por los países industrializados. Si se busca una producción más sustentable en la producción minera en la región, se necesitará un cambio sustancial hacia una visión más soberana de sus recursos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] United Nations (UN), “Plan of Implementation of the World Summit on Sustainable Development Contents,” Johannesburg plan of implementation, 2002. [Online]. Available: http://www.un.org/esa/sustdev/documents/WSSD_POI_PD/English/WSSD_PlanImpl.pdf. [Accessed: 02-Jan-2017].
- [2] L. Meinert, G. Robinson, and N. Nassar, “Mineral Resources: Reserves, Peak Production and the Future,” *Resources*, vol. 5, no. 1, p. 14, 2016.
- [3] Stephen M. Jasinski, *Mineral Commodities Summaries*, U.S. Geological Survey. 2017.
- [4] U. N. (UN), “United Nations Framework Convention on Climate Change,” 2015. [Online]. Available: http://unfccc.int/meetings/paris_nov_2015/meeting/8926.php. [Accessed: 12-Jun-2017].
- [5] International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies To 2050*. 2010.
- [6] International Energy Agency, “Energy Technology Perspectives 2016,” p. 412, 2016.
- [7] World Energy Council, “World Energy Scenarios 2016,” 2016.
- [8] A. Valero, A. Valero, G. Calvo, A. Ortego, S. Ascaso, and J.-L. Palacios, “Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonization pathways,” *Energy*, Jun. 2018.
- [9] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), *Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe Statistical*. 2018.
- [10] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), “La Inversión Extranjera Directa en América Latina y el Caribe,” Santiago, Chile, 2016.
- [11] Observatorio del Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL), “Conflictos Mineros en América Latina (Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina / OCMAL):” [Online]. Available: https://mapa.conflictosmineros.net/ocmal_db-v2/. [Accessed: 28-Jun-2018].

- [12] Leah Temper, D. del Bene, and J. M.-Alier, "Mapping the frontiers and frontlines of global environmental justice: the EJAtlas," *J. Polit. Ecol.*, vol. 22, no. 266642, pp. 255–278, 2015.
- [13] The Global Initiative Against Transnational Organized Crime, "Organized Crime and Illegally Mined Gold in Latin America," Geneva, 2016.
- [14] M. Hanni and A. Podestá, "Flujos financieros ilícitos en los países andinos: Una mirada al sector minero," pp. 1–3, 2017.
- [15] A. J. Hurd, R. L. Kelley, R. G. Eggert, and M.-H. Lee, "Energy-critical elements for sustainable development," *MRS Bull.*, vol. 37, no. 4, pp. 405–410, 2012.
- [16] M. Stürmer, "150 Years of Boom and Bust-What Drives Mineral Commodity Prices?," Bonn, Germany, 2013.
- [17] V. Zepf, J. Simmons, A. Reller, M. Ashfield, and C. Rennie, "Materials critical to the energy industry," London, UK, 2014.
- [18] G. Calvo, A. Valero, and A. Valero, "Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 125, 2017.
- [19] European Commission, "Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Critical raw materials factsheets," 2017.
- [20] T. E. Graedel and B. K. Reck, "Six Years of Criticality Assessments: What Have We Learned So Far?," *J. Ind. Ecol.*, vol. 20, no. 4, pp. 692–699, Aug. 2016.
- [21] Y. Jin, J. Kim, and B. Guillaume, "Review of critical material studies," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 113, pp. 77–87, Oct. 2016.
- [22] R. Cunningham, C.G., Zappettini, E.O., Vivallo S., Waldo, Celada, C.M., Quispe, Jorge, Singer, D.A., Briskey, J.A, Sutphin, D.M., Gajardo M., Mariano, Diaz, Alejandro, Portigliati, Carlos, Berger, V.I., Carrasco and K. . Schulz, "Quantitative mineral resource assessment of copper, molybdenum, gold, and silver in undiscovered porphyry copper deposits in the Andes Mountains of South America," Prepared and published jointly by the geological surveys of Argentina, Chile, Colombia, Peru, and the United States, 2008.
- [23] U.S. Department of Defense, "Strategic and critical materials. 2015 Report on stockpile requirements.," 2015.
- [24] National Environmental Research Council, "Risk List 2015 - An update to the supply risk index for elements or element groups that are of economic value," *Br. Geol. Surv.*, vol. 1, p. 11, 2015.
- [25] "Critical Raw Materials - European Commission," 2018. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_es. [Accessed: 18-Jan-2018].
- [26] Deloitte Sustainability, British Geological Survey (BGS), Bureau de Recherches Géologiques et Minières, and Netherlands Organization for Applied Scientific Research, "Study on the review of the list of critical raw materials. Final Report," Brussels, Belgium, 2017.
- [27] J. West and H. Schandl, "Material use and material efficiency in latin america and the caribbean," *Ecol. Econ.*, vol. 94, pp. 19–27, 2013.
- [28] D. Vexler, M. Bertram, A. Kapur, S. Spatari, and T. E. Graedel, "The contemporary Latin American and Caribbean copper cycle: 1 Year stocks and flows," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 41, no. 1, pp. 23–46, 2004.
- [29] M. A. Perez-Rincon, "Colombian international trade from a physical perspective: Towards an ecological 'Prebisch thesis,'" *Ecol. Econ.*, vol. 59, no. 4, pp. 519–529, Oct. 2006.
- [30] M. C. Vallejo, "Biophysical structure of the Ecuadorian economy, foreign trade, and policy implications," *Ecol. Econ.*, vol. 70, no. 2, pp. 159–169, 2010.
- [31] A. H. Tanimoto, X. Gabarrell Durany, G. Villalba, and A. C. Pires, "Material flow accounting of the copper cycle in Brazil," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 1, pp. 20–28, 2010.
- [32] A. Allesch and P. H. Brunner, "Material flow analysis as a decision support tool for waste management: A literature review," *J. Ind. Ecol.*, vol. 19, no. 5, pp. 753–764, 2015.
- [33] A. K. Frankel, J.A.Rose, "Determinants of Agricultural and Mineral Commodity Prices," Massachusetts, USA, 2010.
- [34] M. L. C. M. Henckens, E. C. van Ierland, P. P. J. Driessen, and E. Worrell, "Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations," *Resour. Policy*, vol. 49, pp. 102–111, 2016.
- [35] Y. Li, N. Hu, and D. Chen, "Forecasting Mineral Commodity Prices with Multidimensional Grey Metabolism Markov Chain," in *Advances in Swarm Intelligence ICSI*, 2012, pp. 310–317.
- [36] A. Deaton and G. Laroque, "On the Behaviour of Commodity Prices," *Rev. Econ. Stud.*, vol. 59, no. 1, p. 1, Jan. 1992.
- [37] A. Valero, "Thermoeconomics as a conceptual basis for energy-ecological analysis," *Adv. Energy Stud.*, no. Energy Flows in Ecology and Economy, pp. 415–444, 1998.

[38] A. Valero and A. Valero, *Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources. A thermodynamic cradle-to-cradle assessment*. Singapore: World Scientific Press, 2014.

[39] A. Valero, A. Valero, and A. Domínguez, "Exergy Replacement Cost of Mineral Resources," *J. Environ. Account. Manag.*, vol. 1, no. 2, pp. 147–158, Jun. 2013.

[40] T. D. Kelly and G. R. Matos, "Historical statistics for mineral and material commodities in the United States (2016 version): U.S. Geological Survey Data Series 140," 2016. [Online]. Available: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/%0A>. [Accessed: 10-Jan-2018].

[41] L. Gabriel Carmona, K. Whiting, A. Valero, and A. Valero, "Colombian mineral resources: An analysis from a Thermodynamic Second Law perspective," *Resour. Policy*, vol. 45, pp. 23–28, Sep. 2015.

[42] G. Calvo, A. Valero, L. Carmona, and K. Whiting, "Physical Assessment of the Mineral Capital of a Nation: The Case of an Importing and an Exporting Country," *Resources*, vol. 4, no. 4, pp. 857–870, 2015.

[43] G. Calvo, A. Valero, A. Valero, and Ó. Carpintero, "An exergoecological analysis of the mineral economy in Spain," *Energy*, vol. 88, pp. 2–8, 2015.

[44] J.-L. Palacios, G. Calvo, A. Valero, and A. Valero, "La Explotación Minera en la Región Andina: Un Enfoque Termodinámico," in *El Extrativismo en América Latina: Dimensiones Económicas, Sociales, Políticas y Culturales*, 2017, p. 12.

[45] J.-L. Palacios, G. Calvo, A. Valero, and A. Valero, "The cost of mineral depletion in Latin America: An exergoecology view," *Resour. Policy*, 2018.

[46] J.-L. Palacios, G. Calvo, A. Valero, and A. Valero, "Exergoecology Assessment of Mineral Exports from Latin America: Beyond a Tonnage Perspective," *Sustainability*, vol. 10, no. 3, p. 723, 2018.