

# CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

## MATERÍAS PRIMAS CRÍTICAS

Los límites del desarrollo.







**Autor Principal:** Jesús Serrano Burruezo

**Otros autores:** Asunción M<sup>a</sup> Hidalgo Montesinos (Universidad de Murcia)

## ÍNDICE

1. Listado de abreviaturas
2. Título
3. Palabras Clave
4. Resumen
5. Introducción
6. Metodología
7. Antecedentes
8. Resultados
9. Discusión
10. Conclusiones
11. Bibliografía

## LISTADO DE ABREVIATURAS

- AZO** Óxido de zinc dopado con aluminio.
- CFC** Compuestos de fibra de carbono.
- CIGS** Material semiconductor compuesto de cobre, indio, galio y selenio.
- CIS** Grupo de semiconductores formador por cobre, indio, galio, sulfuro o selenio.
- CRM** Del inglés “Critical Raw Material” que quiere decir materias primas críticas.
- FTO** Óxido de estaño dopado con flúor.
- HREEs** Del inglés “Heavy Rare Earth Elements” que quiere decir elementos de las tierras raras pesados.
- ITO** Óxido de litio dopado con estaño.
- LREEs** Del inglés “Light Rare Earth Elements” que quiere decir elementos de las tierras raras ligeros.
- PGMs** Del inglés “Platino Group of Metals” que quiere decir grupo de metales del platino.
- REEs** Del inglés “Rare Earth Elements” que quiere decir elementos de las tierras raras.
- RAEE** Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
- TCO** Óxidos conductores transparentes.

## MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS

### Los límites del desarrollo

## PALABRAS CLAVE

Materias primas, agotamiento de materiales, tabla periódica de los elementos, generación de residuos, límites del crecimiento, transición energética, elementos en peligro de extinción, alternativas.

## RESUMEN

El consumo de las materias primas en los países desarrollados crece anualmente, además, este aumento se produce de manera exponencial cuando las materias primas forman parte de la lista de materiales de las últimas innovaciones tecnológicas. Este consumo está impulsado por la demanda insaciable de la sociedad actual de nuevos productos, cuya complejidad aumenta con cada nueva versión o modelo que sale al mercado, necesitando un mayor número de materiales para su fabricación y volviendo obsoletos a los modelos anteriores con mayor rapidez. Ello origina como consecuencia que las reservas de materias primas de algunos materiales que antes apenas eran extraídos, hoy se encuentren en riesgo de agotamiento. A su vez la complejidad de los productos hace imposible su recuperación al final de su vida útil, lo que provoca la dispersión de estos materiales a través de la superficie terrestre generando residuos altamente contaminantes. Igualmente supone un desafío para la transición energética hacia fuentes limpias y sostenibles, ya que las energías renovables requieren de muchos de estos elementos denominados "críticos" para funcionar. La preocupación actual y en la que se centra este trabajo de estudio, es la de conocer cómo afecta el crecimiento ininterrumpido de la demanda sobre el planeta y discernir cuales son los elementos que o bien por su uso o por sus escasas reservas en la corteza terrestre su abastecimiento puede verse comprometido. Para tratar de cuantificar y dar valores que respalden estos conceptos se ha realizado un estudio más detallado sobre los elementos del cobalto, grafito, indio, litio y el grupo de elementos de las tierras raras. Se han estudiado alternativas al uso de estos elementos, así como métodos de recuperación de material como posibles soluciones al problema entre las que se encuentra la economía circular. Se han realizado 5 fichas que recogen la información obtenida de la búsqueda bibliográfica para cada uno de los elementos. Los resultados obtenidos de la investigación apuntan a la ineficacia de los métodos de recuperación y reciclado actuales dentro de un marco de economía circular. Igualmente, el estudio reveló que las alternativas de uso son económicamente inviables y puso de manifiesto dos posibles escenarios para la transición energética; con y sin medidas de mitigación.

## INTRODUCCIÓN

Durante la revolución industrial, cuando el hombre consiguió dominar los procesos de producción. El avance científico y el estudio de los elementos permitió descubrir nuevos materiales con propiedades únicas, que darían lugar a inventos revolucionarios como fueron el termómetro de mercurio (Fahrenheit 1714), la batería eléctrica (Volta 1799), la dinamo (Faraday 1831) o el electroimán entre otros (Sturgeon 1825), que desencadenarían la llamada revolución tecnológica [21].

En marzo de 1869, Dmitri Mendeleev propuso su ley periódica y presentó su famosa tabla periódica (figura 1A). La tabla periódica ha sido como una brújula para los químicos que buscan nuevos elementos en el mar ilimitado de la química. También les ayudó a descubrir casi una docena de elementos nuevos, predichos anteriormente por Dmitri Mendeleev. Con el progreso de la ciencia, la tabla periódica ha sufrido muchas transformaciones e incorporación de nuevas ideas. La versión moderna de la tabla periódica (figura 1B) fue creada por el Premio Nobel Glenn Seaborg durante la quinta década del siglo XX. Es elegante en su simplicidad, pero potente en cuanto a la información que nos revela [9].

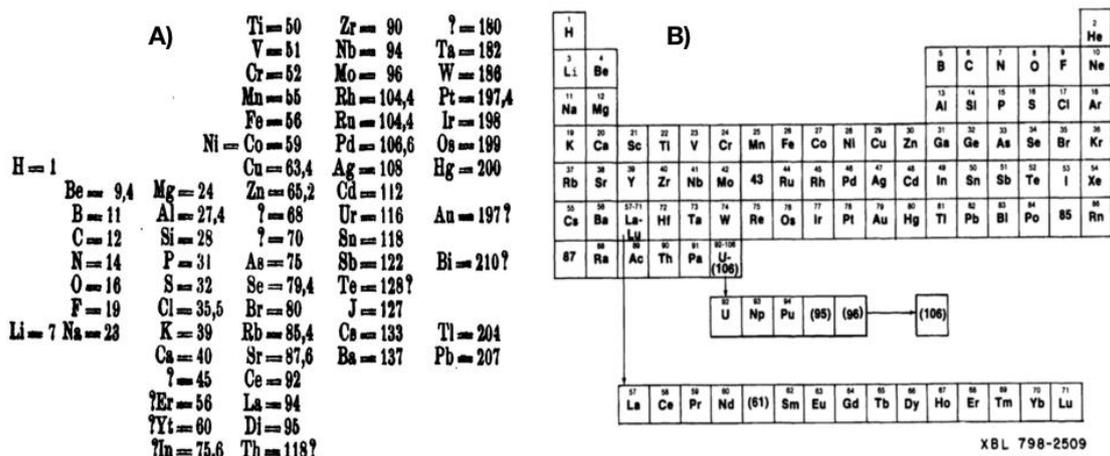


Figura 1. A) Primera tabla periódica de Mendeleev B) Tabla periódica moderna de Seaborg. (Elaboración propia)

Gracias a los nuevos avances en las tecnologías del transporte como el barco a vapor y el ferrocarril, las materias primas eran extraídas de todas partes del mundo y transportadas allí donde se necesitaban. En la edad contemporánea los periodos de grandes conflictos bélicos como la primera y la segunda guerra mundial o las guerras sucesivas fueron motores que impulsaron el desarrollo tecnológico. Del mismo modo la primera crisis del petróleo fue un punto de inflexión para redescubrir la energía y abrirse paso hacia nuevas y mejores fuentes como las energías renovables [16].

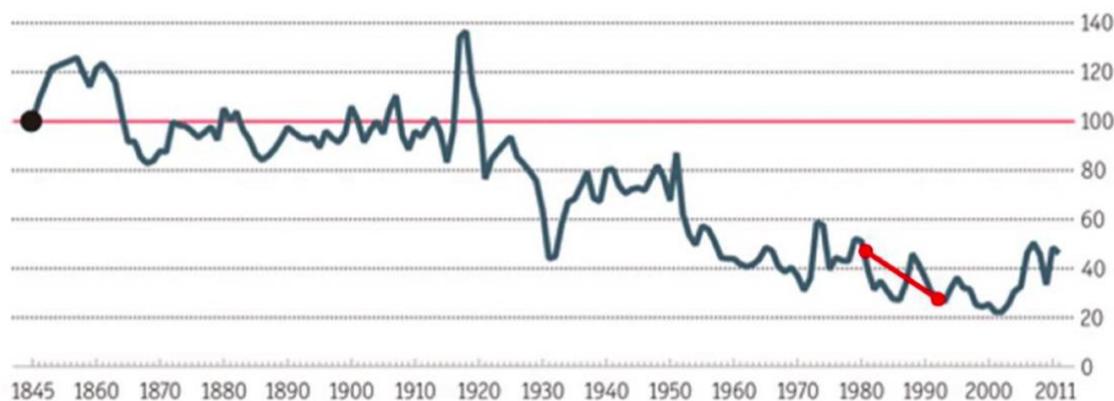
Fue a finales del siglo XX cuando se comenzó a cuestionar por primera vez si el planeta sería capaz de soportar crecimiento constante basado en la extracción de los recursos. Un grupo de políticos y científicos preocupados por el futuro del planeta a largo plazo (El club de Roma),

encargaron un informe al Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) que fue publicado en 1972. El informe “Los límites del crecimiento” redactado por Donella Meadows junto a 17 científicos más, se basaba en una recreación informática del crecimiento de la población para los próximos 100 años según los datos disponibles hasta la fecha [17]. La tesis principal del estudio era que, en un planeta limitado, las dinámicas de crecimiento exponencial (población y producto per cápita) no serían sostenibles, y la conclusión a la que llegaron los investigadores en su informe fue la siguiente:

*“Si la industrialización, la contaminación ambiental, la producción de alimentos y el agotamiento de los recursos mantienen las tendencias actuales de crecimiento de la población mundial, este planeta alcanzará los límites de su crecimiento en el curso de los próximos cien años. El resultado más probable sería un súbito e incontrolable descenso, tanto de la población como de la capacidad industrial “*

(Los Límites del Crecimiento, 1972)

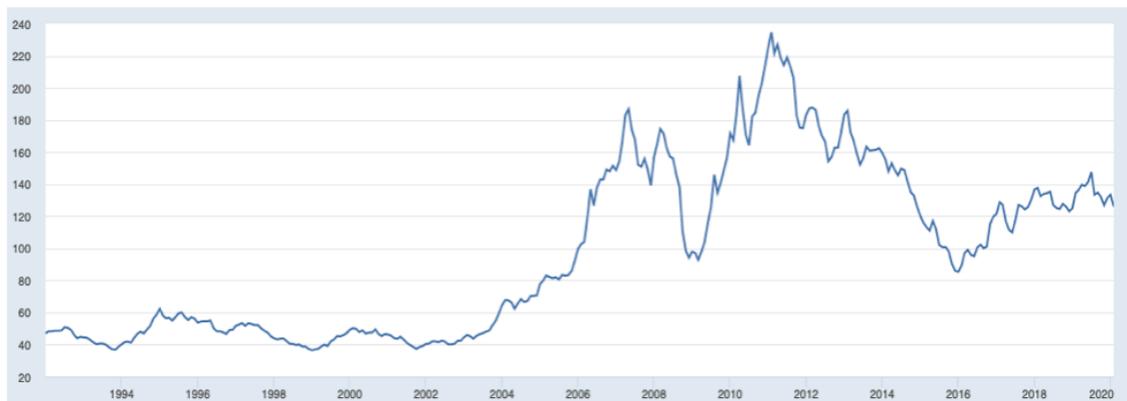
Las afirmaciones del informe crearon controversia generando dos corrientes de pensamiento: los llamados Tecno-optimistas, aquellas personas que consideraban que los recursos de la tierra son ilimitados y que la tecnología facilitaría en cualquier momento su extracción; y por el contrario, aquellas personas que abogaban por una mejor gestión de los recursos finitos del planeta para evitar el colapso. En su libro “The Population Bomb”, Paul Ehrlich defendía que el continuado aumento de la población provocaría el fin de los recursos naturales, aumentando los precios de la industria y provocando un colapso social. Por el contrario, Julian Simons defendía que la tecnología permitiría encontrar siempre nuevas fuentes de materias primas, procedimientos más eficientes o cuando fuese necesario materiales de sustitución que permitiesen remplazar a los escasos. tal y como predijo Julian Simons los precios de los minerales habían reducido su precio casi a la mitad en el transcurso de la última. En la figura 2 se muestran las variaciones del precio de los metales durante el de 10 años [3,20].



**Figura 2.** Variaciones del precio de los metales durante el periodo de la apuesta. Obtenido de la presentación de Alexander King [24].

Viendo el resultado se podría pensar que Julian Simons llevaba razón y que la postura de Paul Ehrlich respecto al agotamiento había sido exagerada, sin embargo, se verá a continuación que el pensamiento de Ehrlich no estaba del todo desencaminado.

A partir del año 2000 esta tendencia comenzó a invertirse y la predicción de Paul empezó a tener sentido. Industrias como la de los fabricantes de motores a reacción de repente se vieron sin un suministro seguro de rodio un mineral muy caro y de gran importancia para su fabricación, o avances en la tecnología como el intento del departamento de energía de Estados Unidos de implementar un nuevo tipo de tubo fluorescente más eficiente que sustituyese a lo antiguos, se volvió imposible de llevar a cabo cuando los fabricantes contestaron que no existían reservas suficientes de Terbio y Europio para remplazar a los modelos antiguos; dos elementos metálicos que eran indispensables para su proceso de fabricación. Como puede verse reflejado en la figura 3 la demanda cada vez mayor de productos como estos que requerían metales escasos fue lo que provocó que a partir del año 2000 se comenzasen a disparar los precios [24].



**Figura 3.** Variación del precio de los metales en las últimas décadas.  
(Federal Reserve Economic Data) [22]

Sin embargo, este crecimiento de los precios en los metales no fue un caso aislado, paralelamente también creció la demanda de energía y de la agricultura. Lo que estaba ocurriendo, y lo que Ehrlich no matizó en su predicción, fue qué sería el aumento de las clases medias lo que empezaría a ejercer presión sobre la demanda. El aumento del número de personas en el mundo per se, no es motivo suficiente para hacer que los precios aumentasen, se debe dar el caso de que estas personas además tengan el nivel adquisitivo suficiente para empezar a consumir bienes normales (dentro de los cuales se encuentran los de primera necesidad y los de lujo), como más tarde Stephen E. Kesler escribiría en su artículo [12,18]:

*“A medida que la población mundial continúe aumentando, las clases medias en crecimiento continuarán exigiendo un nivel de vida más alto, alimentando la necesidad de bienes de consumo y energía más limpia.”*

(Mineral Supply and Demand into the 21st Century)

Y como bien dice, cada vez más las clases medias han ido demandando objetos mejores y más complejos, un ejemplo claro de esto se observa en los teléfonos móviles o Smartphones, y en como la complejidad de estos se ha disparado en escasas dos décadas y se ha llegado a convertir en un objeto de primera necesidad en muchos países del primer mundo. Muchos de los componentes de un Smartphone como son las pantallas táctiles, la cámara de fotos o los sensores de huellas, poseen en sus constituyentes muchos más elementos que los utilizados inicialmente, un total de 47 elementos diferentes como puede ser observado en la figura 4.

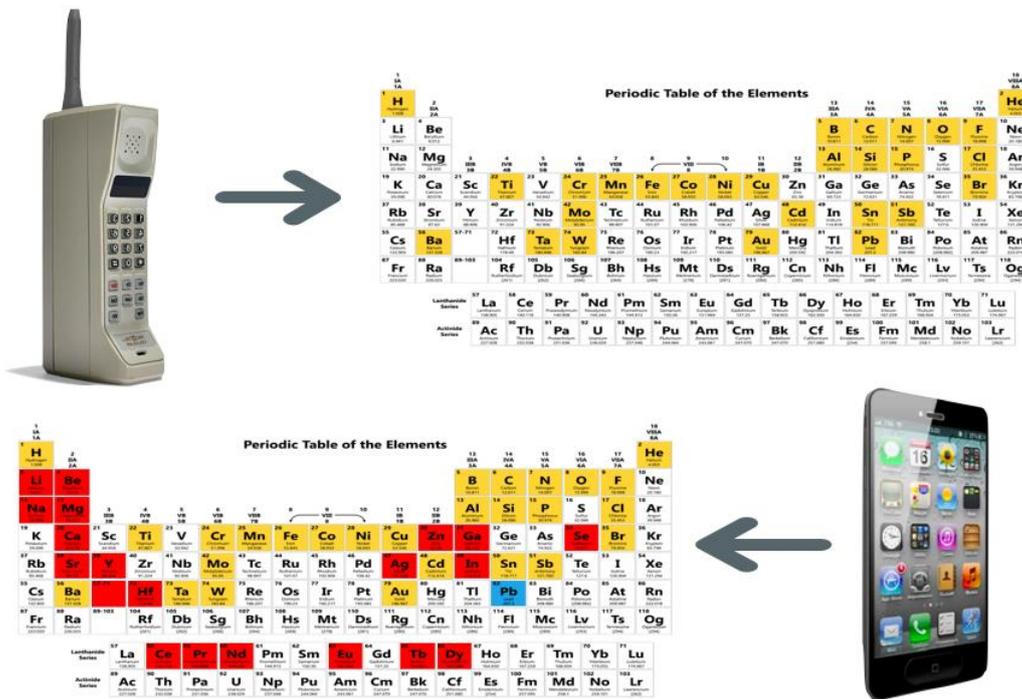
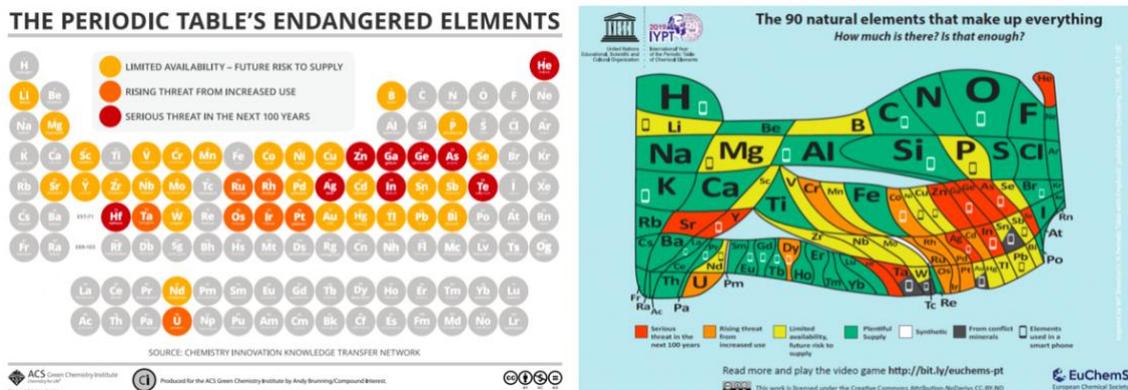


Figura 4. Aumento en la complejidad de componentes entre un primer teléfono móvil y un Smartphone; el Pb se encuentra en azul por qué ha sido sustituido. (Elaboración propia).

Varios de estos nuevos elementos forman parte de los llamados elementos de las tierras raras. A pesar de su nombre, los elementos de las tierras raras no son muy raros, de hecho, el verdadero problema no es su concentración absoluta, sino relativa debido a que es muy difícil encontrar depósitos económicamente explotables [13].

Así mismo la American Chemical Society elaboró una tabla periódica tratando de identificar los principales elementos que se encontraban en riesgo de extinguirse a corto-medio plazo debido al continuo aumento de la demanda. En ella aparecen representados en color rojo aquellos elementos los cuales tienen un serio riesgo de agotamiento en los próximos 10 años, en naranja aquellos los cuales tienen riesgo de agotamiento si la demanda sigue aumentando y en amarillo aquellos que pueden verse agotados a largo plazo. En enero de 2019 y con motivo del aniversario de la tabla periódica la European Chemical Society elaboró una nueva tabla precisamente con la intención de representar mediante colores los elementos que podían suponer un riesgo para el abastecimiento en el futuro, tal y como hizo años atrás la American Chemical Society; pero esta vez deformando la tabla para ilustrar cual es la abundancia de esos minerales en la corteza terrestres y marcando aquellos que tienen un uso imprescindible en los teléfono móviles, un objeto que se ha vuelto indispensable en todo el mundo pero sobre todo en los países desarrollados. Además, esta tabla recoge cuales de estos minerales son extraído de zonas mineras en conflicto. En la figura 5 se muestran ambas tablas.



**Figura 5.** A la derecha la tabla periódica elaborada por EuChemS en 2019 [17] y a la izquierda la tabla elaborada por la American Chemical Society en 2016 [18]

Además, como dice Kesler la sociedad a su vez demanda más energía y a la vez más respetuosa con el medio ambiente. Por ejemplo, el consumo de energía de 1960 a 2011 se triplicó (de 40,589 a 144,424 TWh) cuando la población "simplemente" se duplicó (de 3 mil millones a 7 mil millones) [21]. Desafortunadamente, hay un problema grave, ya que muchas "tecnologías bajas en carbono" como pueden ser las turbinas eólicas, los automóviles eléctricos, las bombillas de bajo consumo, celdas de combustible y convertidores catalíticos; requieren de elementos raros y preciosos para su producción y uso.

Como se ha visto, los elementos de la tabla periódica son esenciales para alimentar todas las necesidades humanas. Pero actualmente, estamos extrayendo y redistribuyendo estos elementos fundamentales a un ritmo tan rápido que muchos ya son escasos y se agotarán por completo en las próximas décadas. Para mantener un suministro constante de estos elementos esenciales, existe una necesidad urgente de replantear nuestra comprensión actual de la minería y el consumo, junto con el medio ambiente y la gestión de los residuos [4].

## METODOLOGÍA

La metodología seleccionada en este trabajo ha consistido en una extensa y rigurosa revisión bibliográfica de los artículos y documentos relacionados con el tema. Esta etapa es fundamental en un trabajo de carácter bibliográfico y es por ello que debe garantizar la obtención de la información más actualizada y relevante. Dado que en la actualidad el universo de la documentación científica es muy amplio y su crecimiento es exponencial, el problema inicial de la investigación es diseñar un método capaz de manejar la información de manera eficiente, seleccionando las fuentes con criterios científicos y veraces. La metodología propuesta se compone de 3 fases:

- Definición del problema.
- Búsqueda de la información.
- Análisis de la información.

### 1. Definición del problema

La definición ha de ser lo suficientemente clara para que la búsqueda bibliográfica pueda responder a las necesidades del estudio y además permita la retroalimentación de la investigación. En nuestro caso de estudio el tema se centró en estudiar el agotamiento de los elementos considerados críticos en la tabla periódica.

### 2. Búsqueda de la información

Seguidamente se ha llevado una búsqueda avanzada mediante descriptores que tuviesen relación con el tema y booleanos que permitiesen crear combinaciones más específicas. Debido a la escasa información sobre el tema que hay en español se han usado los descriptores en inglés para ampliar el margen de búsqueda. Una vez diseñadas las cadenas de búsqueda se han escogido cuatro bases de datos que permitiesen la búsqueda avanzada y se han comparado sus resultados. En el cuadro 1 se muestran los descriptores, campos, y cadenas de búsqueda realizadas y en el cuadro 2 los resultados obtenidos en la búsqueda realizada en cada base de datos.

**Cuadro 1.** Descriptores, campos y cadenas de búsquedas empleados en las bases de datos

Búsqueda en bases de datos	
Descriptores empleados	critical raw materials, endangered elements, rare earth elements, circular economy, green chemistry, exhaustion, supply, risk.
Campos	Título.
Cadena de búsqueda	a) "critical raw materials OR endangered elements" b) "critical raw materials OR endangered elements OR rare earth elements AND scarcity" c) "critical raw materials OR endangered elements OR rare earth elements AND circular economy"

d)	“critical raw materials OR endangered elements OR rare earth elements AND supply”
e)	“critical raw materials OR endangered elements OR rare earth elements AND green chemistry”
f)	“critical raw materials OR endangered elements OR rare earth elements AND risk

**Cuadro 2.** Número de resultados obtenidos para cada base de datos y para cada cadena de búsqueda

Nº de artículos encontrados para cada cadena de búsqueda			
WEB OF SCIENCE	XABIO UMU	GOOGLE SCHOLAR	SCIENCE DIRECT
a) 100	a) 462	a) 281	a) 47
b) 3	b) 0	b) 0	b) 0
c) 7	c) 3	c) 11	c) 1
d) 35	d) 76	d) 7	d) 3
e) 3	e) 0	e) 0	e) 0
f) 19	f) 7	f) 2	f) 2

### 3. Análisis de la información

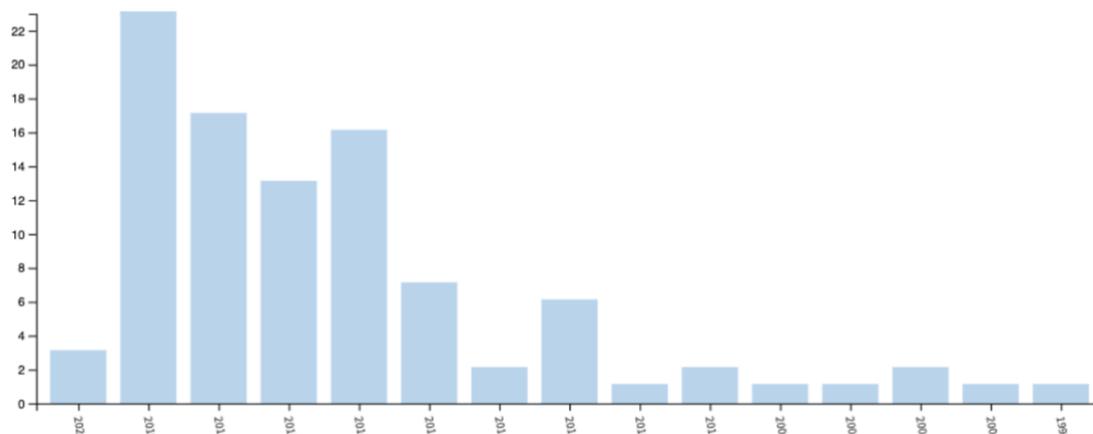
Una vez reunidos todos los artículos que coinciden con nuestros descriptores de búsqueda es necesario seleccionar aquellos que son de relevancia para nuestro caso de estudio. Si los resultados de las búsquedas hubiesen dado un gran número de referencias bibliográficas, se debería proceder mediante el uso de software de análisis bibliográfico; sin embargo, dejando a un lado la documentación que queda repetida, el número de documentación obtenida es suficiente para que pueda ser examinada la relevancia de forma individual mediante la lectura de los resúmenes y conclusiones de cada uno de los artículos.

Gracias a los descriptores y los booleanos se ha podido reducir la búsqueda de 890 resultados a 179 que tienen mayor interés para el estudio. Los documentos debieron ser leídos para así determinar mediante filtrado los que verdaderamente poseen relevancia destacada para esta investigación.

Adicionalmente, y tomando como ejemplo los datos estadísticos de las búsquedas realizadas en WEB OF SCIENCE a través de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología se puede observar; como se muestra en la figura 6, que la mayoría de los estudios realizados se han desarrollado en los últimos 5 años, lo cual es un buen indicador de la importancia del tema y su actualidad. Además, deja ver qué se trata de un campo emergente, lo que justifica el reducido número de artículos encontrados para determinadas búsquedas en años anteriores.

Cabe destacar que la bibliografía se ha complementado siguiendo un sistema de búsqueda inversa o especializada; en la cual, se ha recurrido a las fuentes bibliográficas aportadas por los

autores en sus artículos para acceder a la información necesaria que no se ha podido encontrar a través de las búsquedas en las bases de datos. Finalmente, la búsqueda de la legislación utilizada en el estudio se ha llevado a cabo a través de las fuentes oficiales que la ponen a disposición pública a través de sus portales web.



**Figura 6.** Número de artículos por año de las búsquedas realizadas en la base Web of Science (FECYT)

Con el objetivo de estudiar en profundidad el agotamiento de las materias primas críticas se hace necesario volcarse en un enfoque individual de las mismas. Con ello se pretende exponer casos concretos que sirvan de ejemplo para representar los hechos expuestos hasta ahora, así como atender a las peculiaridades concretas que cada materia pueda presentar individualmente.

En total se han seleccionado un conjunto de 5 materias primas críticas:

- Indio (In)
- Litio (Li)
- Cobalto (Co)
- Grafito (C)
- Elementos de las tierras raras (REEs)

Se han escogido estas cinco materias primas de entre las demás, buscando que fuesen lo más representativas posible del abanico total de materias primas críticas de la Unión Europea. Todas ellas han sido consideradas críticas en la lista publicada a partir del cuarto estudio de materias primas críticas realizado por la Comisión Europea en el año 2020. Además, y para aumentar la importancia del estudio todas ellas están involucradas en mayor o menor medida con las tecnologías que juegan un papel importante para lograr la transición energética que persigue la Unión Europea. En concreto, el indio es utilizado en la energía fotovoltaica; y el cobalto, el litio y el grafito son usados mayoritariamente en la fabricación de vehículos eléctricos. Y los elementos de las tierras raras se encuentran presentes en su mayoría como elementos utilizados en las energías renovables.



## ANTECEDENTES

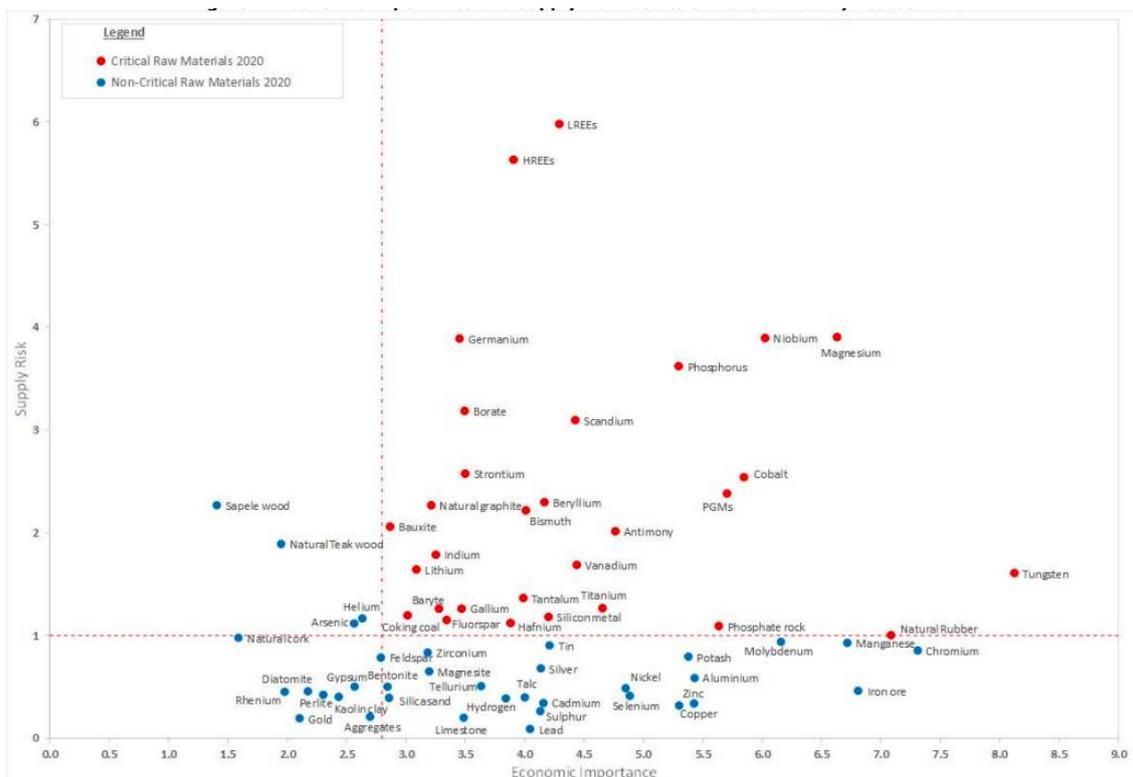
### 1. Definición de materias primas críticas.

La lista de elementos considerados críticos puede variar mucho dependiendo del país en el que se realice, estas listas se ven modificadas a medida que la tecnología avanza o la demanda de un objeto varía, por lo que se actualizan periódicamente. Un elemento se suele considerar como crítico a nivel global cuando 3 o más países lo incluyen dentro de sus listas de criticidad. De igual manera en estos estudios se debe diferenciar aquellos que usan el termino “estratégico” de los que usan el término “crítico”. A menudo existe una confusión entre los términos que puede conducir a errores. Los elementos de importancia “estratégica” para los países son aquellos que son considerados vitales para las defensas del país y aplicaciones militares, a diferencia de los “críticos” que suelen ser aquellos cuyo riesgo de suministro puede dañar la economía de un país. Existen elementos cuya concentración absoluta y relativa en la corteza terrestre presentan valores muy bajos, lo cual podría llevar a pensar que este recurso se encuentra en peligro, pero debido a que la producción es igualmente baja o inexistente no supone una criticidad muy elevada. De igual manera podemos encontrar elementos comunes con una gran abundancia en la corteza terrestres pero que debido a la gran demanda y a la alta tasa de producción que tienen, pueden llegar a verse agotados en menos de 100 años [25].

### 2. ¿Cuáles son elementos críticos para la Unión Europea?

La Unión Europea ha elaborado listas de criticidad cada 3 años desde 2011 y la última se realizó en 2019. Aunque esta última se ha hecho pública durante 2020. Este estudio tuvo en cuenta un total de 78 elementos individuales o lo que es lo mismo 61 materias primas: 58 elementos individuales y 3 grupos de materiales. Estos grupos se componen de los metales del grupo del platino o PGMs (del inglés “Platinum Group Metals”) que comprenden el platino, el rodio, el paladio, el rutenio y el iridio (para el estudio se omitió el osmio) y los elementos pertenecientes a las tierras raras o REEs (del inglés “Rare Earth Elements”) los cuales se dividieron en dos subgrupos, pesados (HREEs) y ligeros (LREEs). El grupo del HREEs comprende el disprosio, el erbio, el europio, el gadolinio, el holmio, el lutecio, el terbio, el tulio, el itrio y el lterbio. El grupo del LREEs comprende el cerio, el lantano, el neodimio, el praseodimio y el samario [2].

Tanto los 58 elementos como los tres grupos fueron sometidos a una matriz de criticidad en la que se establecieron como límites para el riesgo de abastecimiento valores superiores o iguales a 1 y para la importancia económica valores mayores o iguales a 2,4. Los resultados se encuentran reflejados en la figura 8 mediante puntos rojos para aquellos considerados críticos y azul para los que no superaron el umbral de criticidad.



**Figura 8.** Matriz de criticidad extraída del último estudio realizado por la Comisión Europea en 2020 [2].

Como se ha podido observar en la matriz expuesta anteriormente los elementos que conforman los grupos REEs poseen valores altos tanto para el riesgo de suministro como para la importancia económica, así como el magnesio el tungsteno el cobalto y los metales del grupo del platino (PMG). Los resultados presentados para los materiales agrupados (HREE, LREE y PMG) son los promedios aritméticos de los resultados de los materiales individuales incluidos en estos grupos. Esta matriz reveló un total de 29 materias primas críticas las cuales se muestran en el cuadro 3.

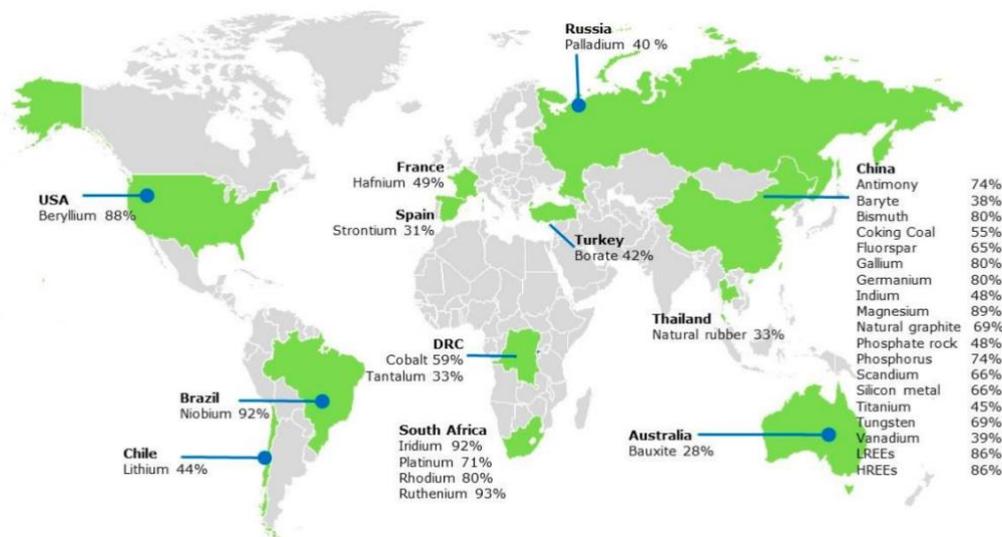
**Cuadro 3.** Lista de materias primas críticas [2]

Materias primas críticas 2020 (en negrita las añadidas respecto a 2014)			
• Antimonio	• <b>Hafnio</b>	• PGMs	• <b>Bauxita</b>
• <b>Barita</b>	• Helio	• Roca de fosfato	• <b>Titanio</b>
• Berilio	• HREEs	• Fosforo	• Litio
• Bismuto	• Indio	• <b>Escandio</b>	
• Borato	• LREEs	• <b>Tántalo</b>	
• Cobalto	• Magnesio	• Tungsteno	
• Fluorita	• Grafito	• <b>Vanadio</b>	
• Galio	• <b>Caucho</b>		
• Germanio	• Niobio		

### 3. ¿Por qué existe un riesgo en el suministro de estos materiales?

Como se puede apreciar en la figura 9 la mayoría de la capacidad de producción y de las reservas potenciales de materias primas críticas se suele concentrar en los países subdesarrollados o países en vías de desarrollo. Es frecuente que en estos países que poseen unas economías aún en desarrollo se adopten restricciones comerciales muy agresivas para que puedan asegurar el uso en exclusividad de las reservas

Muchos de los elementos considerados críticos suelen encontrarse en partes del mundo que a menudo se consideran políticamente inestables. Por ejemplo, una cantidad significativa del tantalio que se extrae de la tantalita proviene de Ruanda. En los últimos años se ha producido una extracción ilegal de estos minerales que se ha usado para financiar los conflictos armados de la zona. Esta minería ilegal no controlada puede tener serios impactos ambientales y sociales.



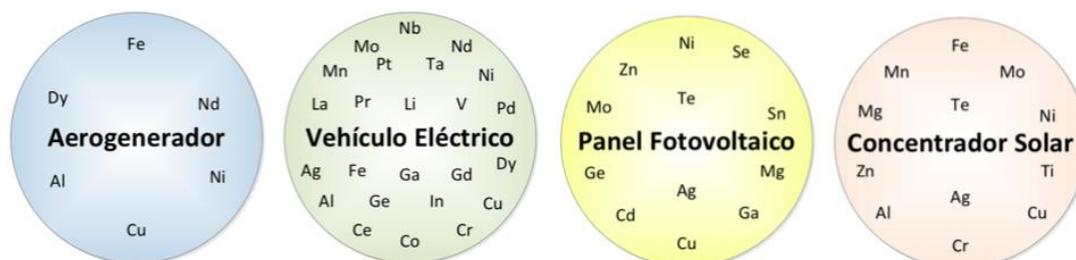
**Figura 9.** Países que representan la mayor parte de la oferta global de materias primas críticas. Imagen extraída de la comisión europea 2020 [5].

Otra de las preocupaciones claves en la disponibilidad de los materiales en el futuro es su abundancia y facilidad de acceso. A menudo los materiales denominados críticos se presentan como subproductos de la minería de metales básicos como el zinc del que se obtiene el indio, a estos elementos se les denomina autoestopistas. En estos casos ocurre que si no es rentable o no hay demanda para los productos principales, la producción de los subproductos se verá reducida. Soluciones a este problema pueden venir de avances tecnológicos que mejoren significativamente la tasa de reciclado de estos materiales críticos [12].

#### 4. ¿Qué importancia tienen las materias primas críticas en la transición energética?

La energía eólica, la fotovoltaica, la solar termoeléctrica, la biomasa o el coche eléctrico no emiten CO<sub>2</sub>, o en el caso de la biomasa estas emisiones son neutras. Sin embargo, un aspecto importante de ellas es que para construir las infraestructuras necesarias se precisan de una gran cantidad de materiales. Una central térmica de gas natural produce de media un gigavatio (GW) de potencia eléctrica, si se quisiese reproducir esta misma cantidad de potencia con energías renovables sería necesario construir 200 aerogeneradores de 5 megavatios (MW); o lo que es lo mismo 1000 aerogeneradores de un MW. Por otro lado, los metales que se necesitarían para construir una central térmica serían aproximadamente de 5500 toneladas de acero, 750 toneladas de cobre y 750 toneladas de aluminio, mientras que para construir ese número de aerogeneradores se necesitarían 160000 toneladas de acero, 2000 toneladas de cobre, 780 toneladas de aluminio, 85 toneladas de neodimio, 110 toneladas de níquel y 7 toneladas de disprosio. Esto supone en peso unas 25 veces más de metales que los usados para la central térmica [4].

Por lo tanto, el aspecto más preocupante acerca de las energías renovables no es la cantidad de metales que precisan si no la variedad de estos. Mientras que en la central térmica se usan metales convencionales y que pueden encontrarse con relativa abundancia en la corteza terrestre; las energías renovables son altamente voraces en cuanto al número de metales distintos que necesitan para funcionar. Además, se hace necesario decir que muchos de los metales indispensables para su funcionamiento se tratan de elementos críticos. El ejemplo usado (aerogenerador) es si cabe el que menos variedad de elementos precisa como se puede observar en la figura 10. Algunos autores como A. Valero se refieren a estas nuevas tecnologías como energías multicolor (en vez de energías verdes) debido al gran número de elementos de la tabla periódica que engloban en su composición [3].



**Figura 10.** Algunos de los elementos metálicos más importantes en la fabricación de infraestructuras para energías renovables. Imagen extraída de [4].

#### 5. ¿Qué problemas medioambientales se derivan de su agotamiento?

Otro aspecto fruto de la escasez de materiales es la búsqueda de nuevas fuentes de recursos. La mayoría de fuentes de recursos críticos han sido o están siendo explotadas por lo que la

búsqueda de nuevas localizaciones se centra en lugares donde no ha llegado la mano del hombre. Estos territorios que pueden albergar nuevas fuentes de recursos a menudo suelen estar en zonas naturales que se han mantenido intactas y conservan su naturaleza original. De por sí el proceso de la minería y la extracción genera un impacto muy grande allá donde se produce, pero además este impacto lleva asociado la pérdida de grandes reservas de la biodiversidad como pueden ser la selva amazónica.

En los países occidentales existe una gran protección sobre el medio ambiente y se imponen severas penalizaciones a los que incumplen las políticas medioambientales. Sin embargo, en países como China y otras economías emergentes estas políticas son mucho menos restrictivas y el medioambiente pasa a un segundo plano cuando hay intereses económicos en juego. Un ejemplo de este tipo de minería sin control ambiental lo podemos encontrar en las minas de Mongolia como se ve en la figura 11, en este caso no solo se ha visto perjudicada la fauna y flora silvestre si no que ha afectado gravemente a la población de la zona. Llegando a contaminar las fuentes de agua potable y provocando un aumento de los casos de cáncer, enfermedades respiratorias y demás riesgos a la salud [13].



**Figura 11.** Lago de la región de Batou (Mongolia). Figura extraída del artículo “What did we do to create a terrifying toxic lake?” [27].

## 6. ¿Como afecta el agotamiento de materiales al comercio y a la economía?

Al examinar las tendencias históricas en los precios de las materias primas críticas, desde los años noventa hasta el presente, podemos identificar dos fases distintas. En el período 1991–2007, la producción de estas materias primas cambió aproximadamente de 50000 t / año a casi 130000 t / año, mientras que los precios tan solo descendieron entre 5 y 13 US \$ / t. A partir de 2007, las cantidades producidas comenzaron a ser de 134,000 t / año (2010) mientras que los precios de las materias críticas se dispararon [13].

Los mercados de elementos críticos son altamente volátiles y con frecuencia están influenciados por el riesgo de suministro. Esto se puede observar en el precio de REEs, que han aumentado dramáticamente debido a las crecientes preocupaciones sobre la seguridad del suministro de China. Los elementos críticos de los mercados son vulnerables si el número de productores es pequeño y los precios inestables. Un ejemplo significativo de esto es la caída significativa en la

producción y venta de tantalio de las minas africanas desde el dramático aumento en el precio de este metal en el año 2000.

La figura 12 muestra el pico establecido en el año 2000 sobre el precio del talio, así como el aumento y posterior descenso en su producción; igualmente se encuentran representados los REE, en sus gráficas se puede apreciar la elevación de los precios en el año que china dejó de ser solo productor y pasó ser también un consumidor de estos recursos. Por otro lado, los intentos por garantizar fuentes de recursos legítimas como la medida establecida por el gobierno de los estados unidos en 2001 en la que se prohibía el comercio de materiales frutos de la guerra en la República Democrática del Congo; ejercen presión sobre los mercados y generan mayor riesgo en el suministro lo que se traduce en un aumento de los precios [15].

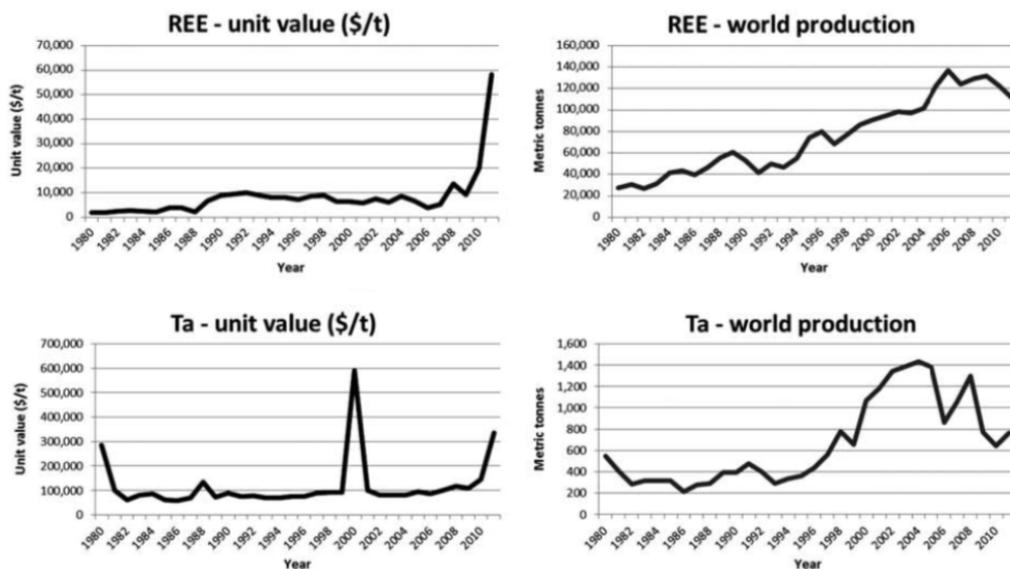


Figura 12. Valores unitarios de los precios y la producción de Elementos de las tierras raras y del talio entre los años 1980 y 2010. Imagen extraída de [3].

## 7. ¿Qué sucede con las materias primas críticas al final de su vida útil?

Una gran parte de las materias primas críticas son usadas en estos aparatos pasan a formar parte de los “residuos de aparatos eléctricos y electrónicos”, partir de ahora RAEE o en inglés “Waste Electrical and Electronic Equipment” (REEE). Estos términos se usan para describir aquellos aparatos que se encuentran al final de su vida útil y ya no poseen ninguna utilidad. El abanico de productos eléctricos y electrónicos que existe se hace más grande cada año, dando lugar a que la fracción de residuos eléctricos o electrónicos sea una de las más importantes del total de residuos generados; tanto es así que en el año 2014 la cifra alcanzó los 41,8 millones de toneladas de RAEE mundiales. Europa, encabezada por los países de Noruega, Islandia, Liechtenstein, Suiza y Turquía es la mayor productora de RAEE del mundo con un total de 9,8 millones de toneladas al año, lo que equivale a 20,4 kg de RAEE por persona y por año. Los siguientes en la lista son los Estados Unidos con un total de 7,1 millones de toneladas de residuo

o 22,3 kg/persona. Y en tercer lugar se encuentra China con un total de aproximadamente 6 millones de toneladas de residuo; que, sin embargo; debido a la gran demografía que presenta el país solo equivale a 4,4 kg/ persona. Bastante menos que los casos expuestos anteriormente [7].

En el caso del reciclado o más bien la separación de los componentes de estos aparatos no solo se lleva a cabo para reducir los impactos sobre el medioambiente o separar los peligrosos de los no peligrosos, si no que se convierte es una estrategia de recuperación de materias primas críticas, reduciendo la dependencia con países extranjeros así como el agotamiento de las fuentes de recursos y volviendo a poner a disposición de los mercados materias primas que de lo contrario habrían acabado como residuos en vertederos. La prevención en la generación de residuos y la preparación para la recuperación que incorpora el R.D. 110/2015 podrían suponer el primer paso hacia una economía circular eficiente para las materias primas críticas.

## RESULTADOS.

Una vez seleccionadas las fichas para cada uno de los elementos seleccionados en este trabajo (cobalto, indio, grafito y REEs), a través de su estudio, se han obtenido una serie de resultados los cuales se han intentado resumir y comparar a través de una matriz desarrollada en forma de tabla. Así en el cuadro 4 se muestran los principales valores para la importancia económica y el riesgo de suministro, dichos valores han sido extraídos según la matriz de criticidad realizada por la comisión europea en su estudio de 2020 [19].

**Cuadro 4.** Resultados obtenidos para los elementos de estudio.

Materia:	Cobalto	Indio	Litio	Grafito	REEs
Tasa de reciclado (UE)	0 %	0 %	0 %	3 %	-
Importancia económica	5,7	3,1	2,4	2,9	3,7
Riesgo de suministro	1,6	2,4	1	2,9	4,9
Producción mundial	135497 toneladas	689 toneladas	25500 toneladas	1,1 millones toneladas	135650 toneladas

<b>Producción de la UE</b>	1233 toneladas	47.8 toneladas	350 toneladas	562 toneladas	0 toneladas															
<b>Dependencia de las importaciones</b>	32 %	0 %	86 %	99 %	100 %															
<b>Usos finales en la UE</b>	Baterías químicas (42%), súper aleaciones y otras (23%), fabricación de materiales duros (10%)	Dispositivos de pantalla plana (56%), soldaduras (10%), células fotovoltaicas (8%)	Vidrio y cerámica (57%), baterías (25%), cemento (6%), grasas lubricantes (6%)	Materiales refractarios (52%), refractarios para fundiciones (14%), baterías (8%)	Catálisis (23%) imanes (22%), aleaciones metalúrgicas (16%)															
<b>Criticidad</b>	201 1 si	201 4 si	201 7 si	202 0 si	201 1 si	201 4 si	201 7 si	202 0 si	201 1 no	201 4 no	201 7 no	202 0 si	201 1 si	201 4 si	201 7 si	202 0 si	201 1 si	201 4 si	201 7 si	202 0 si
<b>Extracción</b>	Como subproducto o coproducto del níquel y el cobre, menos del 6% como producto principal	Como subproducto del refinado del zinc	Es extraído como producto principal	Es extraído como producto principal	Tanto como producto principal como subproducto de otros minerales.															
<b>Mayores productores del mundo</b>	República Democrática del Congo (64%), China (5%), Canadá (5%).	China (57%) Corea del Sur (15%) Japón (10%)	Chile (44%), Australia (32%), China (16%), Argentina (11%)	China (69%) India (12%) Brasil (8%)	China (95%) EEUU (1.7%) Rusia (1.3%) Australia (1.2%)															

## DISCUSIÓN.

Comenzando por la tasa de reciclaje se puede observar que el único elemento del que se dispone información sobre un reciclaje que sea efectivo y relevante es el caso del grafito. Para el resto de elementos el reciclado es inexistente o insignificante dentro de la Unión Europea. En el caso concreto de los REEs no se puede dar un valor ya que se trata de un grupo amplio de elementos, pero sí que se puede afirmar que la mayoría de los elementos que componen el grupo carecen también de cualquier tipo de reciclado.

En el caso del cobalto, algunos de sus usos finales son pinturas o vidrios por lo que de estos grupos es imposible recuperar nada. Sin embargo, el cobalto utilizado en otras aplicaciones, como las superaleaciones, los metales duros, las baterías e incluso los catalizadores gastados, se pueden recolectar y reutilizar o reciclar. La chatarra al final de la vida útil que contiene cobalto puede estar en forma de palas de turbina usadas u otras partes usadas de motores a reacción, herramientas de corte de carburo, baterías recargables usadas, imanes que se han retirado de equipos industriales, catalizadores usados, etc.

Para el caso del indio, aunque en la UE el reciclado es nulo en otros muchos países si se recicla debido a su importancia en la fabricación de pantallas planas. Se han dado casos como en el año 2011 donde del total de 1500 toneladas de indio disponible, 950 toneladas provenían de indio reciclado, superando a la producción de ese año. La mayoría del indio producido se utiliza en el recubrimiento de película delgada de ITO (óxido de indio dopado con estaño). Para fabricar este tipo de película el ITO es bombardeado y tan solo el 30% se adhiere al sustrato, todo lo demás se recicla y se llega a recuperar hasta un 70%. El reciclado se lleva a cabo sobre todo en los países de Japón, Corea del Sur y China. Sin embargo, muy poco indio se recicla de los productos finales debido a la concentración tan baja de este en su composición, falta de tecnología o de incentivos económicos. Se calcula que tan solo un 1% de los residuos finales globales se recicla [19].

El caso del litio, aunque el reciclado ha sido insignificante durante muchos años en la actualidad se está produciendo un aumento del reciclaje de este elemento debido principalmente a su uso en las baterías de ion litio. Como ocurría con el resto de materiales la mayoría de usos finales del litio hacen incompatible su recuperación. En los últimos años el reciclaje se ha concentrado en el mercado de las baterías y aunque hay un gran interés por ellas en la actualidad aún hay casos en los que sigue siendo económicamente más rentable producir a partir de un nuevo producto.

Aunque el grafito fuese el único elemento del que se considere que haya reciclaje en la UE sigue siendo un insignificante 3%. El motivo concreto del grafito es que se pierde una cantidad significativa de material durante su uso (lubricantes y materiales de fricción) y por lo tanto no se puede reciclar. Los esfuerzos para reciclar productos finales que contienen grafito natural se ven obstaculizados por el exceso de oferta y los bajos precios. El pequeño reciclaje que existe se debe principalmente al reciclado de material refractario usado.

El nivel de reciclaje para los REEs como grupo sigue siendo menor del 1% y, especialmente en Europa, debido a la falta de sistemas de recolección eficientes y a los elevados costes que supone construir las plantas de reciclaje de REEs. El reciclaje a menudo es difícil debido a la forma en que REEs se incorporan como componentes pequeños en elementos complejos o son parte de materiales complejos. Los procesos requeridos necesitan mucha energía y especificidad para cada elemento.

Siguiendo con la interpretación de los resultados, la matriz de criticidad usada por la UE para clasificar cuales son los elementos que se encuentran en una situación de riesgo se basa en la importancia para la economía y en el riesgo de abastecimiento que presentan. En base a esos dos parámetros se establecen unos límites para las variables. Como se vio en los antecedentes estos valores son 2,4 para la importancia económica y 1,0 para el riesgo de abastecimiento. Los elementos considerados críticos deben incluir ambos valores límites. En la figura 13 aparecen representados dichos valores de cada uno de los elementos seleccionados para este trabajo.



**Figura 13.** Representación de los valores de criticidad para la importancia económica y el riesgo de abastecimiento. Elaboración propia.

Como se observa en la figura anterior las razones de criticidad para cada elemento son muy diferentes. Para el caso del cobalto se observa que, aunque sobrepasa ambos valores límite existe una clara diferencia entre ambos parámetros. La importancia económica de este material

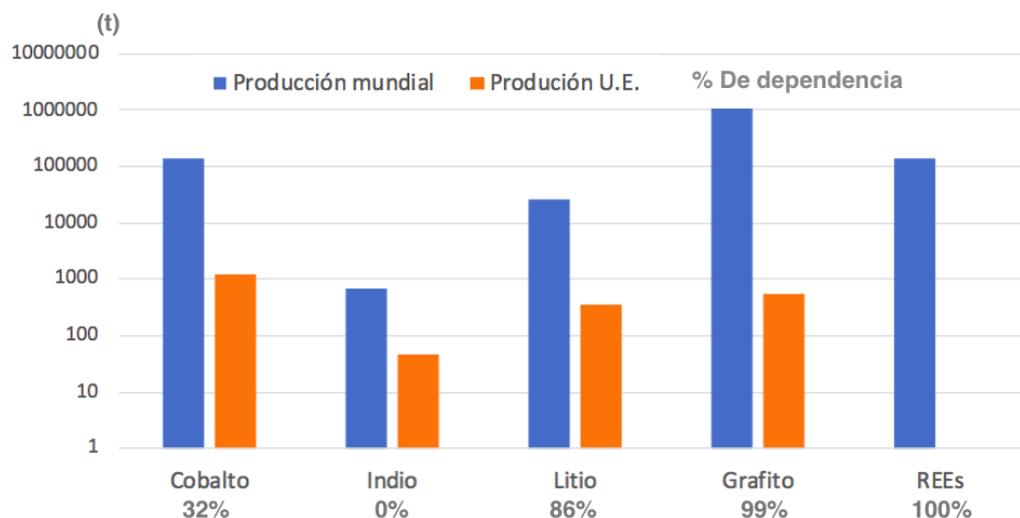
es muy alta y es con diferencia el elemento con mayor importancia económica de la muestra de estudio. Además, comparándolo con su riesgo de abastecimiento existe una diferencia bastante significativa lo que lleva a deducir que la principal razón de que sea el segundo elemento más crítico es debido a la gran demanda que hay de este elemento lo cual le otorga esa gran importancia económica.

Continuando el análisis tenemos el indio y el litio; aunque a su manera, la relación importancia económica/ riesgo de abastecimiento, es parecida a la del cobalto, pero mucho más suavizada. En ambos casos la importancia económica es superior al riesgo relativo. Hay que tener en cuenta que ambas escalas no son comparables ya que los límites para cada parámetro son diferentes, un ejemplo claro de ello es el caso del grafito. El caso del grafito presenta el mismo valor para ambos parámetros por lo que se podría pensar que ambos tienen la misma importancia y ninguno destaca sobre el otro, pero hay que tener en cuenta que el límite para la importancia económica es 2,4 mientras que para el riesgo de abastecimiento es 1,0 por lo que en este caso el riesgo de abastecimiento habría superado por una cantidad mucho mayor el umbral de riesgo.

Por último, los REEs, ocupan el puesto número uno de criticidad de nuestra muestra y del estudio realizado por la Unión Europea. Además, es el único caso en el cual el riesgo de abastecimiento es significativamente superior a la importancia económica. Para ambos parámetros los valores en la matriz son muy elevados, pero además teniendo en cuenta los umbrales, la diferencia se hace aún mayor.

Pasando a los apartados de producción y dependencia en la figura 14, se han representado la producción anual media a escala mundial y de la UE, también se incluye el porcentaje de dependencia de la UE de producción externa para cada material; debido a la diferencia de cantidades entre unos materiales y otros se ha optado por representarlos mediante el uso de una escala logarítmica de manera que no quedasen enmascarados los valores. Lo primero que llama la atención sobre la figura 14 es la inexistencia de producción de REEs dentro de los países de la UE lo cual justifica que la dependencia de las importaciones extranjeras sea total para hacer frente a la demanda de productos que incluyen estos materiales en su composición. Para el caso del grafito sí que existe una pequeña producción dentro de los países de la UE sin embargo esta representa tan solo el 0,1 % de la producción mundial, una cantidad insuficiente para cubrir las necesidades de la UE razón por la que la dependencia para este material es tan alta (99%). El caso del litio es interesante porque, aunque no se haya considerado como crítico en los estudios de la última década ahora se demuestra que sí que tiene una dependencia muy alta de importaciones aún con una pequeña producción de material, debido a su creciente demanda en el mercado de las baterías

En penúltimo lugar el cobalto tiene una buena producción dentro de la UE que, aunque no crea un exceso de material sí que ayuda bastante a reducir la dependencia de las exportaciones. Y, por último, el indio con sus 47,8 toneladas extraídas (7% de la producción mundial) es capaz de hacer frente a la demanda total de este elemento dentro de la UE [23].



**Figura 14.** Representación de las producciones mundiales y de la UE en escala logarítmica junto con su porcentaje de dependencia para los materiales de estudio. Elaboración propia.

Una vez realizado el estudio de los elementos a continuación se ha considerado estudiar posibles alternativas a cada uno de ellos, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Para el caso del cobalto, su uso principal es el de las baterías, por lo que existe una amplia gama de diferentes tecnologías de baterías disponibles y todas ellas podrían considerarse como posibles sustitutos de las variedades que contienen cobalto. El tipo más comúnmente conocido son las baterías de plomo-ácido, pero existen muchos otros tipos también. En todos estos posibles sustitutos, se considera que el rendimiento es menor que para los tipos de batería que contienen cobalto, es posible alimentar vehículos eléctricos o herramientas manuales con baterías de plomo-ácido, pero para obtener el mismo nivel de rendimiento que el ion de litio, el paquete de baterías debería ser tan grande que no sería práctico. En el campo de las súper aleaciones existen algunas alternativas, pero no todas pueden sustituir a las aleaciones de cobalto en todas las aplicaciones y se considera que todas ellas tienen un rendimiento reducido en comparación con las aleaciones de cobalto. Los sustitutos para las otras categorías de aplicación no se han considerado en detalle durante la evaluación de criticidad porque sus porcentajes de aplicación fueron menos del 10% del total de cobalto utilizado. Si bien, hay sustitutos disponibles para el cobalto en muchas de estas aplicaciones, el uso de materiales alternativos normalmente resulta en una pérdida de rendimiento [9,24].

Continuando con el indio, su principal uso es formando parte de los óxidos conductores transparentes (TCO) utilizados en pantallas planas y en celdas fotovoltaica de silicio amorfo y CdTe. El indio se puede reemplazar por otros TCO como el óxido de zinc dopado con aluminio (AZO) o el óxido de estaño dopado con flúor (FTO), que son más baratos, pero al igual que ocurría con el cobalto su desempeño es menor, notándose especial diferencia en la conductividad y la transparencia. Para su uso en células fotovoltaicas no existe un sustituto comercialmente disponible en compuestos semiconductores (CIGS y CIS) utilizados en células solares de película delgada. Sin embargo, las tecnologías CIGS y CIS actualmente representan solo el 2% de la producción fotovoltaica global. Las tecnologías de silicio cristalino que ocupan la mayoría del

mercado fotovoltaico, y las tecnologías de película delgada como CdTe y silicio amorfo son sustitutos disponibles para CIGS. Para su uso en aleaciones, las de estaño-indio se pueden reemplazar por aleaciones de estaño-bismuto. Las aleaciones a base de plomo podrían reemplazar al indio y a las aleaciones indio-estaño utilizadas en procesos de sellado a temperaturas criogénicas [23].

El litio posee su mayor mercado en la creación de vidrio y cerámicas, así como en la fabricación de las baterías. El sodio y el potasio podrían usarse para sustituir al litio en la fabricación de cerámica y vidrio, pero de nuevo conllevando una pérdida del rendimiento. Para la aplicación de baterías, el calcio, el magnesio, el mercurio y el zinc pueden reemplazar al litio como material anódico en las baterías primarias; aunque el rendimiento de estas alternativas puede ser menor en algunas aplicaciones, especialmente en los vehículos eléctricos [7].

Para el elemento cobalto los materiales refractarios suponen el 66% de los productos finales. Sin embargo, no existe un sustituto del grafito natural por dos razones principales. En primer lugar, la morfología de los copos ayuda a fortalecer la estructura del material refractario y esto no se puede lograr con grafito sintético y en segundo lugar, el grafito sintético actualmente no es rentable principalmente debido a su elevado precio y no está fácilmente disponible. No obstante, este grafito refinado si se pueda usar para fundiciones junto con el coque de petróleo calcinado. Igualmente, para la fabricación de lubricantes también se puede usar grafito sintético o disulfuro de molibdeno. El resto de usos con un porcentaje bajo, admiten bien la sustitución del grafito natural por sintético [8].

Por último, los REEs comprende un grupo muy amplio de elementos, y la mayoría no tiene alternativas para su sustitución, aunque algunos pocos parece que sí la tienen. En muchos casos se opta por la desmaterialización en los procesos de producción, un ejemplo de esto son los REEs utilizados en las catálisis donde la mayoría no son sustituibles, pero algunos pueden presentar una mayor eficiencia en su producción que requiera de menos material, este es el caso de las reacciones auto catalíticas o algunas aleaciones en sus usos en la metalurgia donde metales como el Ce Gd y Pr pueden volverse más efectivos con Ca, Na, La y Gd [19]. De igual forma existen varias opciones para reducir o reemplazar el contenido REEs de los imanes, ya sea por sustitución de material o mediante el uso de tecnología alternativa de imanes. Por ejemplo, existe la opción de un aerogenerador exento de Dy utilizando un sistema de enfriamiento para reducir la temperatura [11].

Actualmente, el suministro de estos materiales no ha supuesto un verdadero problema de abastecimiento y las reservas actuales son suficientes para poder continuar con la producción. En el caso concreto de la UE para la que se tienen datos actualizados, los elementos que representan mayores dificultades en el suministro y sostenibilidad son en su mayoría elementos de las tierras raras como el neodimio (Nd), praseodimio (Pr) y disprosio (Dy), que se son utilizados en tecnologías para la obtención de energía eólica y la fabricación de vehículos eléctricos, así como el grafito (C) usado en las baterías recargables de estos últimos. Muy de cerca, pero con una resiliencia mayor les sigue el indio (In), la plata (Ag) y el silicio (Si) mayoritariamente usados en la tecnología fotovoltaica, así como cobalto (Co) y litio (Li) de nuevo en vehículos eléctricos. Por último, para compuestos de fibra de carbono (CFC) utilizados comúnmente en palas de turbinas eólicas suponen un riesgo menor para el suministro. La

demanda de selenio (Se), cobre (Cu), galio (Ga), telurio (Te) y cadmio (Cd) usada en tecnología fotovoltaica también tiene un riesgo bajo teniendo en cuenta el suministro global. Por lo tanto, para estos materiales, la resiliencia de la UE es relativamente alta. Sin embargo aunque estos valores puedan parecer optimistas a primera vista, se prevé que de aquí al año 2030 se produzca un cambio debido a la creciente demanda de materiales como resultado del aumento en la implementación de estas tecnologías, así como a la posible adopción de diferentes medidas de mitigación para mejorar el suministro de materiales [4,10].

En el peor de los casos y suponiendo un escenario conservador en el que la UE no tome medidas de mitigación y continúe con sus políticas como hasta ahora, la resistencia de ciertos materiales se verá comprometida, como es el caso del Nd, Pr y Dy utilizados en la producción de energía eólicas y vehículos eléctricos, el In y la Ag para energía fotovoltaica, así como Co, grafito y Li utilizados tan bien para vehículos eléctricos. Con un impacto menor se esperan algunos problemas de suministro moderado para el Si en la energía fotovoltaica. Y algunos materiales como los compuestos de fibra de carbono usados en las turbinas eólica, así como para el Se, el Cd, el Cu, el Ga y el Te en la tecnología fotovoltaica, no se verán afectados. Sin embargo, el suministro de materiales podría contar con acciones de mitigación que mejorasen considerablemente las medidas para equilibrar la demanda. Como por ejemplo aumentando la implementación y el reciclaje de materias primas procedentes de la UE. Para un entorno optimista en el que se toman medidas como la citada anteriormente, se espera que la resistencia de la UE para elementos de las tierras raras, como hemos visto utilizados para la fabricación de turbinas eólicas; evolucione de una resistencia baja a media. También se podría ver una mejora similar, de baja a media, para el In y la Ag usados en la tecnología fotovoltaica. Sin embargo, la situación más estricta para el suministro es la de material para vehículos eléctricos. Para esta tecnología, la resistencia de la UE seguiría siendo baja para el Nd y el Pr, y media para el Dy, el grafito y Co; mientras que para Li todavía se mantendría en media, pero se acercaría mucho al umbral de resistencia baja [1]. Estos modelos se han representado en la figura 15.

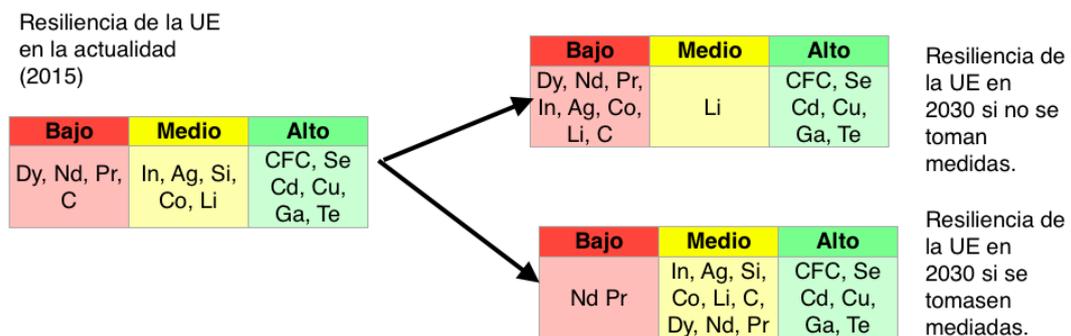


Figura 15. Representación de la resiliencia a materias primas para 2030 en un escenario conservador y otro intervencionista. Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones que se obtienen por tanto del estudio de las materias primas críticas son las siguientes:

El concepto “materias primas críticas” es un término dinámico que puede variar dependiendo de múltiples factores como: el país que realice el estudio, los avances en las tecnologías, el descubrimiento de nuevas fuentes de recursos, tensiones políticas entre países, etc.

Actualmente no existe ningún organismo que lleve a cabo un seguimiento de las reservas de las materias primas críticas a nivel global usando los mismos criterios de manera que se puedan hacer comparaciones entre sí lo cual dificulta el estudio. Se vuelve necesaria la transparencia y la cooperación por parte de los organismos públicos y privados, así como la unificación de la metodología a seguir.

Las alternativas a los materiales de estudio son una manera de reducir el estrés sobre los recursos de las materias primas críticas. Sin embargo, la mayoría resultan ineficaces, inviables económicamente o el elemento por el cual se pretende sustituir es otra materia prima crítica; lo que dificulta la búsqueda de nuevas rutas de suministro.

La mayoría de materias primas críticas presentes en productos al final de su vida útil son desechados y no se recuperan, para que estos elementos críticos se utilicen de manera sostenible y la economía circular pueda ser una solución, las tasas de reciclaje deben aumentar y esto incluye la recuperación de estos metales a partir de desechos como los que se encuentran en vertederos y desechos de minas.

La transición energética a fuentes de energía bajas en carbono podría acentuar gravemente el agotamiento de materias primas en un futuro próximo si no se toman medidas correctoras. Los avances en la tecnología hacen que la energía se vuelva más eficiente, pero al agotar las reservas pierden esta eficiencia teniendo que emplear una mayor energía para lograr extraer la misma cantidad de material de recursos más dispersos.

Los problemas medioambientales y sociales que se genera fruto del agotamiento de las materias primas a menudo no están representados en el precio o los usos que se hacen de las mismas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Blagoeva, P. Aves, A. Marmier & C. Pavel; (2016) *Assessment of potential bottlenecks along the materials supply chain for the future deployment of low-carbon energy and transport technologies in the EU. Wind power, photovoltaic and electric vehicles technologies*. Joint Research Centre / European Commission.
- [2] Deloitte Sustainability; (2020) *Study on the review of critical raw materials, Criticality assessments*. European Commission.
- [3] A. Valero; (2014) Límites a la disponibilidad de minerales. *Ecologista*, volumen 83, pp: 24-27. Accedido el 5-1-2020.
- [4] A. Valero; (2019) Límites minerales de la transición energética [Online] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/334480232>. Accedido el 5-1-2020.
- [5] European Commission; (2019) EU Critical raw materials in the circular economy and strategic value chains and EU R&D funding [Online] Disponible en: <https://www.euchems.eu/wp-content/uploads/2019/01/The-Periodic-Table-and-us-Handley-European-Commission.pdf>. Accedido el 21-2-2020.
- [6] M. David & F. Koch; (2019) "Smart Is Not Smart Enough!" Anticipating Critical Raw Material Use in Smart City Concepts. *Sustainability*, volumen 11, pp 1-11 Accedido el 3-2-2020.
- [7] A. Isildar, E. Hullebusch, M. Lenz, G. Laing, A. Marra & A. Cesaro,; (2019) Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Journal of Hazardous Materials*, volumen 362, pp: 467-481.
- [8] T. Hennebel, N. Boon, S. Maes & M. Lenz; (2013) Biotechnologies for critical raw material recovery from primary and secondary sources: R&D priorities and future perspectives. *New Biotechnology*, volumen 32, pp: 121-127.
- [9] C. Dhruvajyoti; (2017) Endangered elements on the periodic table. *Resonance*, volumen: 1; pp: 79-87.
- [10] W. Rabe & G. Kostka; (2016) China's supply of critical raw materials: Risk for Europe's solar and wind industries?. *Energy Policy*, volumen 101, pp: 692-699.
- [11] R. Aurbach, K. Bokelmann, R. Stauler, O. Gutfleisch & S. Schnell; (2019) Critical raw materials - Advanced recycling technologies and processes: Recycling of rare earth metals out of end of life magnets by bleaching with various bacteria as an example of an intelligent recycling

- strategy. *Minerals Engineering*, volumen 134, pp: 104-117.
- [12] C. Rhodes; (2019) Endangered elements, critical raw materials and conflict minerals. *Science Progress*, volumen 1, pp: 1-47.
- [13] S. Massari & M. Ruberti; (2013) Rare earth elements as *critical raw material*: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, volumen 38, pp:36-43.
- [14] A. Bartl, A. Tkacyk, A. Amato, F. Beolchini, V. Lapkovski & M. Petranikova; (2018) Supply and substitution option for selected critical raw materials: cobalt, niobium, tungsten, yttrium, and rare earth elements. *Detritus*, volumen 3, pp: 37-42.
- [15] Ku, Loudis y Duclos; (2018) The impact of technological innovation on critical materials risk dynamics. *Sustainable Materials and Technologies*, volumen 15, pp: 19-26.
- [16] T. Durán; (2013) *La creación en tiempo de guerra y la explosión de la creatividad*. Trabajo fin de Master Universidad de Barcelona, Faculta de Periodismo y Comunicación. España.
- [17] D. Meadows, D. Meadows, J. Randers & W. Behrens; (1972) The limits to growth. A report for the club of Rome's project on the predicament of mankind, Editorial: Universe. Washington .
- [18] U.S. Department of the interior, editado por Joseph A. Briskey; (2000) Proceedings for a workshop on deposit modeling, mineral resource assessment, and their role in sustainable development. United States Geological Survey. Brasil.
- [19] Deloitte Sustainability; (2020) *Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets*. European Commission.
- [20] A. Bertomeu, Investigación y ciencia; (2017) La apuesta. [Online] Disponible en: <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/ciencia-y-sociedad/90/posts/la-apuesta-15413> Accedido el 19-2-2020.
- [21] M. Gonzalez, Lifered; (2020) Los inventos más importantes de la revolución industrial. [Online] Disponible en: <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/ciencia-y-sociedad/90/posts/la-apuesta-15413> Accedido el 19-2-2020.
- [22] FED; (2016) Global Price Of Metal [Online] Disponible en: <https://fred.stlouisfed.org/series/PMETAINDEXM> Accedido el 14-3-2020.
- [23] Deloitte Sustainability; (2020) *Study on the review of the list of critical raw materials. Non Critical raw materials factsheets*. European Commission.
- [24] A. King, TEDx (2013) The dawn of the age of critical materials [Online] Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_s1ZP-jG5D8](https://www.youtube.com/watch?v=_s1ZP-jG5D8) Accedido el 15-1-2020.

- [25] American Chemical Society (2019) The periodic table's endangered elements. [Online] Disponible en: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/research-innovation/endangered-elements.html> Accedido el 10-10-2019.
- [26] EuChemS (2019) The 90 natural elements that make up everything How much is there? Is that enough? [Online] Disponible en: <https://www.euchems.eu/wp-content/uploads/2018/10/Periodic-Table-ultimate-PDF.pdf> Accedido el 10-10-2019.
- [27] Muagh, BBC News; (2015) ¿Qué hicimos para crear un tenebroso lago tóxico? Disponible [https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150410\\_tecnologia\\_mongolia\\_lago\\_toxico\\_egn](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150410_tecnologia_mongolia_lago_toxico_egn) Accedido el 19-4-2020.