

# PROTAGONISMO DE LAS MATERIAS PRIMAS MINERALES EN EL DESARROLLO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

**LUIS DE LA TORRE PALACIOS**

Universidad Politécnica de Madrid

**ELOY ÁLVAREZ PELEGRY**

Real Academia de Ingeniería

**JOSÉ ANTONIO ESPÍ RODRÍGUEZ**

Universidad Politécnica de Madrid

En este artículo se trata de examinar las perspectivas de oferta y demanda de aquellas materias primas minerales y de algunos metales ante el fuerte crecimiento que, a futuro y en un horizonte temporal del 2030-2040, tendrá la penetración de los vehículos eléctricos (VE). Teniendo en cuenta la naturaleza del tema a abordar el ámbito de análisis será global. Para ello, en primer lugar, se indicará qué se entiende por vehículos eléctricos y qué componentes

tienen, para centrar la atención en las baterías, ya que estas son el elemento diferencial, fundamental, frente a los vehículos de combustión interna. El análisis de las condiciones de respuesta a la importante demanda de las materias primas de donde parten los materiales del vehículo eléctrico señala diferencias muy sustanciales en sus cadenas de suministro, conteniendo sustancias de indudable calificación como críticas. No menos importantes son las consecuencias geopolíticas que amenazan a algunas de estas materias.

## INTRODUCCIÓN A LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ↓

Para evaluar y discutir los posibles problemas que pudieran surgir en cuanto a disponibilidad o precio de las materias primas minerales como consecuencia de la creciente penetración de los VE en el futuro, es necesario, en primer lugar, precisar de qué tipo de VE (vehículo eléctrico) se trata. En segundo lugar, es preciso conocer dónde se encuentran las materias primas minerales en es-

tos VE. En tercer lugar, es imprescindible estimar su número en un horizonte temporal determinado.

El Marco de Acción Nacional (MAN) define el vehículo eléctrico como aquel propulsado total o parcialmente por un motor eléctrico que utiliza la energía química guardada en una o varias baterías recargadas por una fuente de alimentación externa. El MAN, considera dentro de la categoría de vehículos eléctricos los eléctricos puros (BEV, *Battery Electric Vehicles*), los enchufables (PHEV, *plug-in hybrid electric vehicles*) y los eléctricos de autonomía extendida (REEV, *range extended electric vehicles*).

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se entiende por vehículos eléctricos los BEV y los PHEV. No se consideran, por tanto, los híbridos convencionales que no son recargables eléctricamente, los vehículos eléctricos de celdas de combustible (1) (FCEV) que utilizan hidrógeno, ni los REEV por su escasa penetración en el mercado en los últimos años.

Es también relevante distinguir, los segmentos de uso. El primer segmento, y el más importante, por el número de unidades que hay en la actualidad y por el crecimiento que se espera en el futuro, es el de los vehículos ligeros de pasajeros (PLDV) y el de los ligeros de carga (LCV, *Light Commercial Vehicles*). Son también relevantes los vehículos de dos y tres ruedas como las bicicletas eléctricas y finalmente los autobuses y los camiones.

El número total del parque de vehículos eléctricos en el mundo en el año 2017 fue de tres millones de unidades, teniendo China el 40% del total. En 2017, las ventas globales superaron la cifra de un millón de unidades. Además, ese mismo año se vendieron 100.000 autobuses y 30 millones de vehículos de dos ruedas; en ambos casos la mayoría en China (IEA, 2018).

### Una aproximación a los componentes de los vehículos eléctricos

Una forma de ver el impacto que tendrá la penetración del VE sobre los materiales es comparar un vehículo eléctrico con uno de combustión interna. Este enfoque es el que lleva a cabo UBS en su estudio de 2018 (UBS, 2018). Para ello compara un Chevrolet Bolt con un VW Golf.

El peso total de ambos vehículos en materias primas es de unos 1600 kg y 1300 kg, respectivamente. El Bolt es un 22% más pesado que el Golf, siendo la causa fundamental de la diferencia el peso de la batería. Por otra parte, el Bolt tiene un 70% más de aluminio, un 80% más de cobre; un 75% menos de acero, un 60% menos de hierro y un 100% menos de metales preciosos (PGM, metales del grupo del platino).

Por otra parte, el Chevrolet Bolt tiene 140 kg de materiales «activos» en las baterías (níquel, cobalto, litio, manganeso y grafito) y un kilogramo (kg) de tierras raras en el motor eléctrico, en particular (neodimio y disprosio).

En el Chevy Bolt, según la misma fuente, el acero tendría un peso del orden del 39%, el hierro del 2%, el aluminio del 9%, el cobre del 5%, el caucho del 1%, el grafito del 3%, el manganeso del 2%, el cobalto del 1%, el níquel del 2%, el litio del 0,6% y en un amplio porcentaje, las tierras raras y otros componentes con el 31%.

En base a estos supuestos, UBS imagina un mundo 100% eléctrico. En este caso, la demanda mundial de materias primas se incrementaría en un 2.511% para el litio, 1.928% el cobalto, 264% el grafito, 118% el níquel, 100% las tierras raras, 21% el cobre, 135% el manganeso y 12% el aluminio. Caerían las demandas del acero (1%) y la de los PGM (metales del grupo del platino) (en un 53%). En términos económicos, se estima que tiene del orden de 580 US\$ de contenido en semiconductores, lo que supone entre 6 y 10 veces los del Golf.

Este enfoque, que busca evaluar el impacto de la electrificación del transporte sobre la demanda de

materias primas minerales, se sustenta en el supuesto básico de que la influencia de la demanda sobre las materias primas viene inducida por los materiales de las baterías.

Además, debería considerarse en la demanda de materias primas, no solo la debida a las baterías, sino también la relativa a la generación y el almacenamiento de electricidad, a las redes eléctricas, a las infraestructuras de recarga y, naturalmente, a la demanda de los VE (Glencore, 2018).

### Sobre las baterías

Hoy en día existe un amplio consenso de que, de momento, las baterías de ion-litio serán la base del desarrollo de las baterías para los VE, al menos para horizontes temporales a medio plazo.

Uno de los elementos que apoya esta previsión es el desarrollo de las baterías de ion-litio en la electrónica de consumo, que ha facilitado una gran experiencia y una importante disminución de los costes unitarios.

Existen diversas químicas en las baterías que conviene señalar, en particular, por la influencia sobre el examen de la demanda de materiales, de que es objeto este artículo. Así para el cátodo o electrodo positivo se incluye litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC, por sus siglas en inglés); litio-níquel-cobalto-óxido de aluminio (NCA); litio-óxido de manganeso (LMO); y litio-fosfato de hierro (LFP). En la mayoría de los diseños actuales, el ánodo es de grafito, pero el titanato de litio (LTO) también se utiliza especialmente en vehículos pesados (Warner, J. 2015) en (IEA, 2018).

Anteriormente, la EIA (2018) ha puesto de manifiesto la relevancia del desarrollo de la electrificación del transporte sobre la demanda de materiales. La agencia señala tres cambios importantes en este sentido, a saber: el aumento del uso del cobre, el de las tierras raras en los motores eléctricos y el de los metales escasos.

Es relevante examinar la intensidad de los denominados materiales considerados de tipo estratégico o, en algunos casos críticos, según aceptación de la Unión

**TABLA 1**  
**INTENSIDAD DE METALES CRÍTICOS\* EN LA QUÍMICA DE LAS PRINCIPALES BATERÍAS (kg/kWh)**

	Li	Ni	Co	Mn
NCA	0,1	0,67	0,13	0,00
NMC 111	0,15	0,4	0,40	0,37
NMC 433	0,14	0,47	0,35	0,35
NMC 532	0,14	0,59	0,23	0,35
NMC 622	0,13	0,61	0,19	0,20
NMC 811	0,11	0,75	0,09	0,09
LFP	0,1	-	-	-

Fuente: ANL BatPaC en (IEA, 2018)

**TABLA 2**  
**DEMANDAS ESTIMADAS DE LITIO, NÍQUEL, COBALTO Y MANGANESO SEGÚN LOS MODELOS DE BATERÍA**  
**CONSIDERADOS EN LA TABLA 1 (EN MILES DE TONELADAS)**

Tipo	Intensidad toneladas/GWh				Previsión en base a 775 GWh en el año 2030				Previsión en base a 2000 GWh en el 2030			
	Li	Ni	Co	Mn	Li	Ni	Co	Mn	Li	Ni	Co	Mn
NCA	100	670	130	0	77,50	519,25	116,25	0	200	1.340	300	0
NMC 111	150	400	400	370	116,25	310,00	310,00	286,75	300	800	800	740
NMC 433	140	470	350	350	108,50	364,25	271,25	271,25	280	940	700	700
NMC 532	140	590	230	350	108,50	457,25	178,25	271,25	280	1.180	460	700
NMC 622	130	610	190	200	100,75	472,75	147,25	155,00	260	1.220	380	400
NMC 811	110	750	90	90	85,25	581,25	69,75	69,75	220	1.500	180	180
LFP	100	-	-	-	77,50	-	-	-	200	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

Europea: litio (Li), níquel (Ni), cobalto (Co) y manganeso (Mn). Para la Unión Europea, se consideran materias primas críticas (CRM, «critical raw materials») a aquellas que combinan su gran importancia para la economía de la Unión y un alto riesgo asociado a su suministro.

Para ello, la IEA identifica la intensidad en kg/kWh, para diferentes químicas de las baterías, que se reflejan en la tabla 1.

## SOBRE LA DEMANDA DE VE Y DE BATERÍAS

### Sobre la demanda de baterías y materiales relacionados

El despliegue del VE tendrá dos consecuencias básicas. Por un lado, un incremento de la demanda de energía eléctrica y, por otro, de las baterías. Respecto a la primera, se pueden considerar las hipótesis de un consumo de entre 18 y 27 kWh/100 km (IEA, 2018) estima 20-27 y 18kWh/100km (Álvarez Pelegry et.al., 2017).

Igualmente, hay que considerar un kilometraje anual que se situaría entre 8.500-20.000 km/año en la horquilla más amplia de las dos fuentes anteriores.

Utilizando las cifras de vehículos a 2030, de consumos por kilómetro y de los kilómetros recorridos al año estimados para los valores inferior y superior, la demanda de electricidad mundial a 2030 presentaría valores en un rango muy amplio, desde los 168 TWh-594 TWh para 110 millones de vehículos a 348-1.231 TWh para 228 millones de vehículos del valor de «ambición» del EVI30@30. Esta iniciativa es una campaña lanzada en el año 2017 que aspira al objetivo conjunto de los miembros de la Iniciativa de Vehículos Eléctricos (EVI) de alcanzar un 30% del mercado de la UE en el año 2030.

A estos consumos hay que añadirles los de los vehículos de dos y tres ruedas, así como los de camiones y autobuses. Las cifras para la (IEA, 2018) son de 404 TWh

y 928 TWh para el año 2030 en los escenarios de NPS y del EVI, ya citados.

El incremento de vehículos eléctricos y de demanda de energía eléctrica está ligado al aumento de la capacidad y a la producción de baterías.

Para el año 2030, es de esperar que se incremente el rango de autonomía de los VE, de modo que se traduzca en un aumento de la capacidad de las baterías en el rango de 70-80kWh (en la actualidad 20 kWh en China y 60 kWh en EE. UU, según la [IEA, 2018]); de manera que la capacidad anual de baterías pasaría de 68 GWh en 2017 a 775 GWh y 2250 GWh en el año 2030 para los dos citados.

Otras fuentes suponen cifras de 450 TWh de demanda de electricidad en 2030 y de 8.000 GWh de baterías en operación en vehículos ligeros en el mundo (IRENA, 2017). Teniendo en cuenta las cifras del parque de vehículos y de ventas, *grosso modo*, esto supondría una capacidad de producción del orden de 2.000 GWh dicho año.

Para no fatigar al lector con más disquisiciones se puede asumir las cifras de 775 GWh y 2000 GWh para estimar las demandas de materiales para las baterías.

Teniendo en cuenta estas cifras, resultan las demandas estimadas para el litio, níquel, cobalto, y manganeso en miles de toneladas para el año 2030 según diferentes tipos de baterías que se recogen en la tabla siguiente.

Para la IEA (2018), la estimación «central sobre la química de las baterías para 2030» es de 50% de NMC 811, 40% de NMC 622 y 10% de NCA. De acuerdo con esto, en el escenario NPS (*New Policy Scenario*), la demanda de cobalto sería de 101.000 toneladas y 91.000 toneladas de litio; cantidades que, naturalmente, son muy superiores en el escenario EV30@30 donde las cifras se sitúan en 291.000 y 263.000 toneladas, respectivamente.

Las demandas de níquel y cobalto, para los años 2025 y 2030, suponiendo en esos años unas ventas de vehículos eléctricos de 10 millones y 30 millones de unidades respectivamente, serían de 299.000 y 985.000 toneladas para el níquel y de 80.000 y 259.000 toneladas para el cobalto (Glencore, 2018). Glencore también estima el incremento de demanda de cobre que sería del orden de 1 y 2 millones de toneladas, respectivamente.

El examen de las cifras en la tabla anterior permite situar estas estimaciones, tanto en relación con la demanda de vehículos como con la química de las baterías. Así, modificaciones en la química del cátodo afectarán en mayor medida a la demanda de Co y Li, principalmente.

## EL SUMINISTRO DE LOS METALES QUE COMPONEN LOS ACUMULADORES DE ENERGÍA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

### Sobre los materiales que componen el vehículo eléctrico

Desde el punto de vista del suministro de los materiales que componen las partes fundamentales del vehículo eléctrico, se aborda en este apartado la problemática de la disposición de las materias primas que lo componen relacionadas con las baterías, ante el importante aumento de la demanda que se avecina y que se han señalado en el apartado anterior.

Por ello, estimamos que resulta necesario dividir estos materiales en dos grupos, aquellos que componen la estructura del vehículo, el sistema de generación y distribución eléctrica y sus accesorios no fundamentales, y los que forman parte de los sistemas de acumulación eléctrica y de los motores eléctricos. Los primeros poseen, en principio, unas cadenas productivas flexibles ante la demanda, mientras que los segundos requerirán muy importantes esfuerzos de adaptación de la industria involucrada en su producción, además de una continua transformación, a fin de responder adecuadamente ante procesos de demanda fuera de una tendencia natural de crecimiento.

En el segundo grupo coexisten minerales y metales relativamente escasos (cobalto, tierras raras) con otros que no lo son tanto (grafito, litio, níquel, manganeso), pero que viven momentos de expectación ante una demanda cuya dimensión todavía es objeto de polémica. A continuación, se aborda el origen y problemática de suministro de los materiales naturales que se encuentran involucrados en las baterías eléctricas.

En este apartado se abordan las características que generales relacionadas con su aparición en los mercados, desde su origen a su decadencia o desaparición, de los elementos naturales que van a configurar los sistemas de acumulación de energía en el vehículo eléctrico. Posteriormente, en el Apartado 4, se abordan las peculiaridades de las cadenas de suministro de cada metal o mineral.

### El grafito

*Participación del grafito en el vehículo eléctrico.* Hoy por hoy, resulta el componente con mayor participación en muchas de las baterías del coche eléctrico y, sobre todo, en los acumuladores de ion-litio. Se necesitan entre 20 y 30 veces más grafito que litio para fabricar este tipo de baterías.

*Las condiciones del stock natural.* El grafito natural es el producto de la recristalización metamórfica de la materia orgánica contenida en las rocas. Cuando este proceso se produce sobre capas de carbón, o sobre rocas que contienen hidrocarburos líquidos, se generan yacimientos que también pueden tener origen volcánico o hidrotermal. El grafito natural es relativamente abundante en la naturaleza, y está constituido mayoritariamente por carbono en un 80% – 90%, presentando impurezas inorgánicas de distinta naturaleza, que en el proceso de concentración se eliminan mediante sistemas de flotación selectiva o por tratamientos químicos. Las propiedades y composición del grafito vienen determinados por su localización geológica. Por ello no es de extrañar que, en principio, los recursos de grafito parezcan inmensos.

Existen tres tipos distintos de grafito natural que se producen en diferentes tipos de depósitos minerales:

- Grafito en escamas. Es la forma menos común de grafito. Presenta un rango de carbono del 85-98%. Su precio es alrededor de 4 veces más alto que el grafito amorfo y es utilizado en muchas aplicaciones tradicionales. Además, resulta muy deseable para aplicaciones del grafito como material de ánodo de las baterías de ion-litio.
- Grafito amorfo. Constituye la forma más abundante de grafito. Su contenido es comparativamente bajo de carbono de 70%-80%. No posee cristalinidad visible y su pureza es la más baja. No es de calidad adecuada para su uso en la mayoría de las aplicaciones de acumulación eléctrica.
- Grafito cristalino alto (veta cristalina). Solo se extrae de Sri Lanka. Su contenido de carbono es del 90%-99%. La escasez y el alto costo restringen la viabilidad para la mayoría de las aplicaciones.

Además, existe el grafito sintético que es un producto fabricado mediante tratamiento a alta temperatura de materiales de carbono amorfo. La materia prima utilizada para ello, es el coque de petróleo calcinado y el alquitrán de hulla. Esto hace que sea muy costoso de producir, hasta 10 veces el coste del grafito natural.

*La concentración de la producción.* En 2017 China fue el productor de grafito más importante del mundo con 780.000 t de mineral. Según el Servicio Geológico de los EE. UU., esta producción representó el 65% de la extracción mundial y el 35% del consumo. A pesar del dominio absoluto de China en el mercado del grafito, sin embargo, no se espera que el dominio de la nación asiática continúe para siempre. La India es el segundo productor mundial, con 170.000 toneladas de

grafito. El tercero es Brasil con 95.000 toneladas. Canadá, con una producción minera de 30.000 t ocupa el lugar del cuarto productor. Hoy por hoy, existe una evidente concentración de la producción, que se refleja y cuantifica más adelante y, sobre todo, aparece la figura china como elemento de preocupación.

*Posibilidades de su sustitución.* Los nuevos usos de la tecnología en pilas de combustible, baterías y las aplicaciones como «composites» ligeros de alta resistencia pueden aumentar sustancialmente la demanda mundial de grafito, ya que de momento no existen sustitutos.

*Los nuevos recursos.* En realidad, el grafito es un mineral muy abundante en la naturaleza y no se encuentra suficientemente investigado, sobre todo, en sus calidades de mayor valor. De ahí que la cifra de los 270 millones de toneladas indicadas por el USGS (2018) se ven muy escasas comparándolas con otras que nos hablan de cifras que se acercan a los mil millones de toneladas. Sin embargo, las variedades de tamaño grande de escama, son muy demandadas por sus aplicaciones en productos de calidad, incluso para la fabricación del grafeno. Por ello, se piensa que, a corto plazo, la exploración del grafito en ambientes geológicos todavía no estudiados, debe dar sus frutos. Además, el grafito artificial siempre puede ser una alternativa en los productos de alta gama, a pesar de que hoy su coste de producción parezca prohibitivo.

## El litio ↓

*Participación del litio en el vehículo eléctrico.* Las baterías de reciente creación ion-litio se encuentran formadas por un electrolito de sal de litio y electrodos de grafito y óxido de cobalto. El uso de nuevos materiales tales como el litio ha permitido conseguir altas energías específicas, una alta eficiencia, la eliminación del efecto memoria y la ausencia de mantenimiento. Además, disponen del doble de densidad energética que las baterías níquel-cadmio, con un tamaño del orden de un tercio más pequeñas. Pero también tienen desventajas, la principal es su alto coste de producción, aunque poco a poco éste se va reduciendo. Son frágiles, pueden explotar por el sobrecalentamiento y deben ser almacenadas con mucho cuidado.

*Las condiciones del stock natural.* El litio es un elemento relativamente raro que ocupa el puesto 27 por su abundancia en la corteza terrestre y, aunque se encuentra en muchas rocas y algunas salmueras, sus concentraciones suelen ser muy bajas. Las salmueras de litio de alta concentración proceden, tanto de las aguas geotermales como de la lixiviación superficial de las cenizas volcánicas, arcillas o de otras rocas. Las salmueras pueden ser geotérmicas (explotadas desde hace ya tiempo), de campos petrolíferos (con enormes posibilidades y relativamente bien estudiadas) y de arcillas heceterolíticas (de futuro prometedor y enormemente abundantes). Aproximadamente, la mitad de la producción actual de litio procede de yacimientos convencionales de roca dura, mientras que

la otra mitad deriva de la extracción del litio disuelto en salmueras.

Según el Servicio Geológico de Estados Unidos (2017), las reservas mundiales de litio (recursos minerales que pueden explotarse económicamente) procedentes de las estimaciones sobre minerales de litio sólidos, salmueras y minerales en arcillas (heceterolíticas) pueden llegar a los 14 millones de toneladas. Si añadimos los minerales de baja ley y salmueras, además de las arcillas con litio, en total se puede hablar de unos 40 millones de toneladas (USGS, 2014).

*La concentración de la producción.* Los principales países productores de carbonato de litio son: Chile, Argentina, Canadá, Australia, China, y Estados Unidos. El litio en muy importantes cantidades ha sido también identificado en las salmueras de Bolivia, China e Israel. Se estima que China y Europa son los mayores consumidores de litio en el mundo, con un 29% y el 28% del total, respectivamente. En la actualidad, la fuente de producción de litio y su demanda se encuentran relativamente equilibradas. Sin embargo, se avecina un déficit en el suministro de litio, que demandará nuevos países en el mercado.

En realidad, no existen abultadas diferencias en las posibilidades de producción de los países involucrados en el suministro. Además, en un futuro inmediato, las fuentes de suministro del litio se diversificarán todavía más, al incorporarse litio procedente de salmueras de sondeos petrolíferos, arcillas anómalas en litio y otras más. Además, hoy, las diferencias en los costes de producción entre el mineral duro explotado con métodos convencionales y el litio extraído por bombeo en las salmueras, son muy reducidas.

*Los nuevos recursos.* Se piensa que vendrán nuevos actores del lado de la oferta de litio, a medida que aumente la demanda. Los inversores estratégicos ya se están posicionando en los tipos de fuentes de litio que todavía no se explotan, como son las arcillas heceterolíticas y las salmueras de campos petroleros, dos tipos de fuentes que se ubicarían por delante de las pegmatitas con espodumena y otros minerales de litio.

## El cobalto ↓

*Participación del cobalto en el vehículo eléctrico.* En una batería de ion-litio, las diferentes químicas del cátodo tienen un impacto en la demanda de las materias primas que la componen. Por ejemplo, las baterías LCO (lithium cobalt oxide) solo contienen cobalto y litio en porcentajes (muy orientativos) en peso de 7% y 60% respectivamente, mientras que una NMC (níquel-manganeso-cobalto), tiene aproximadamente 7% de litio, 20% de níquel, 19% de manganeso y 22% de cobalto en relación con el peso total. Aunque depende del tipo de batería, una cifra orientativa señala que ya que cada batería contiene aproximadamente 15 kilogramos de sustancias químicas de cobalto. Últimamente se observa una creciente conciencia de que existen diferentes tecnologías de cátodos en las baterías ion-li-

tio que pueden permitir avanzar hacia una química de menos cobalto y poder reemplazarlo con níquel.

*Las condiciones del stock natural.* El metal cobalto se asemeja al hierro y al níquel, tanto en estado libre como combinado. Se encuentra distribuido con amplitud en la naturaleza y forma, aproximadamente, el 0.001% del total de las rocas ígneas de la corteza terrestre, en comparación con el 0.02% del níquel. El cobalto y sus aleaciones son resistentes al desgaste y a la corrosión, aun a temperaturas elevadas. Es importante tener en cuenta que en una batería de ion-litio no existe realmente metal de cobalto. Son los productos químicos de cobalto los que aparecen en estas baterías, siendo el sulfato de cobalto una de las materias primas preferidas para los fabricantes de cátodos.

En la naturaleza, el cobalto forma parte de una serie de depósitos minerales que se caracterizan porque:

No existen concentraciones de incuestionable envergadura. Además, las tipologías de yacimientos, aunque extensas en su conjunto, tan solo aparecen no más de cinco con interés económico. Los Sediment Hosted de cobre (SH), yacimientos incluidos específicamente en estratos o episodios sedimentarios, forman, sin lugar a dudas, el modelo genético de mayor interés, contando con más de la mitad de la producción mundial. Por ello, no debe de extrañar la concentración geográfica de las producciones de cobalto, centrándose en el interior de África. En el resto de los casos se encuentran asociados a otros metales de los cuales depende en su extracción económica. Los nódulos marinos, aunque no significan un recurso de aprovechamiento inmediato, no cabe duda que jugarán un importante papel en un futuro bastante próximo.

*La concentración de la producción.* Los depósitos de cobalto se pueden encontrar en todo el mundo y son más prominentes en el cinturón de cobre africano (la República Democrática del Congo y Zambia), con más del 60% de la producción mundial de cobalto de un solo país.

En 2016, aproximadamente el 60% del cobalto extraído fue como un subproducto del cobre, el 38% como subproducto del níquel y el 2% restante de las minas primarias de cobalto. Así, los cambios en la producción mundial de cobre y níquel son los principales determinantes de los cambios en la producción de cobalto.

*Los nuevos recursos.* De manera contundente, tan solo se puede pensar en el contenido de cobalto en los nódulos marinos abisales como fuente alternativa a los yacimientos tradicionales. Las reservas de cobalto se cifran en 7,2 millones de toneladas con unos recursos totales de 25 millones de toneladas. Sin embargo, alrededor de 120 millones de toneladas de cobalto se encuentran en forma de nódulos de manganeso en fondos abisales en los océanos Atlántico, Índico y Pacífico. No obstante, todavía existen barreras tanto legales y medioambientales como tecnológicas para llevar a cabo una auténtica producción de estos recursos.

## El níquel

*Participación del níquel en el vehículo eléctrico.* Las baterías de iones de litio originales introducidas por Sony en 1991 usaban un polvo de cátodo de litio-cobalto o LCO, que era aproximadamente el 60% de cobalto en peso. Si bien en las LCO ha seguido siendo la química preferida para productos electrónicos personales durante casi 30 años, nunca fue vista como una química habilitante para vehículos eléctricos, ya que el cobalto es escaso y costoso y las celdas LCO tienen un registro de seguridad poco espectacular.

En 1999, se introdujeron dos compuestos químicos catódicos ricos en níquel. En primer lugar, la química de níquel-cobalto-manganeso, o NCM/NMC, que ha utilizado proporciones iguales de níquel, cobalto y manganeso para reducir el contenido de cobalto del 60% al 20%. Además, la química de níquel-cobalto-aluminio, o NCA, que utiliza principalmente níquel con pequeñas cantidades de cobalto y aluminio para reducir el contenido de cobalto desde el 60% al 9%. Desde 1999, los fabricantes de baterías han continuado sus esfuerzos para reducir el contenido de cobalto, sin embargo, el ritmo del progreso ha sido muy moderado.

*Las condiciones del stock natural.* El níquel es un elemento metálico de origen natural, lustroso y de color blanco plateado. Es el quinto elemento más común en la tierra y aparece de manera extensiva en la corteza terrestre. Sin embargo, la mayor parte del níquel se encuentra inaccesible en el centro de la tierra. Las características clave del metal níquel son: alto punto de fusión, resiste la corrosión y la oxidación, es muy dúctil, se alea fácilmente, es magnético a temperatura ambiente, se puede depositar mediante galvanoplastia y posee propiedades catalíticas.

Como reflejo de estas características, el níquel se utiliza ampliamente en más de 300.000 productos para aplicaciones de consumo, industriales, militares, de transporte, aeroespaciales, marinas y arquitectónicas. Su mayor uso (alrededor del 65%) es la aleación, especialmente con cromo y otros metales para producir aceros inoxidables y resistentes al calor. En muchas de estas aplicaciones, no hay sustituto para el níquel sin reducir el rendimiento o aumentar los costos.

Los recursos minerales de níquel consisten en minerales de sulfuros primarios (el 45%) con un contenido promedio de níquel de 0,58% Ni y menas lateríticas (el 55%) con un contenido promedio de 1,32% Ni. Solo el 42% de la producción mundial procede de minerales de tipo laterítico, mientras que el 58% restante proviene de minerales sulfurados. Se estima que en los minerales lateríticos se incluyen el 72% de los recursos minerales mundiales, mientras que en los minerales sulfurados incluyen al 28% de todos los recursos minerales mundiales.

*La concentración de la producción.* Los cinco principales países productores de níquel en 2017, según los datos más recientes del Servicio Geológico de los

EE. UU. son: Indonesia, con una producción minera: 400.000 t de níquel metal, Filipinas, con 230.000 t de níquel, Canadá, que produjo 210.000 t de níquel, Nueva Caledonia con 210.000 t Ni, Australia con una producción minera de 190.000 t Ni. El resto de los productores suman 860.00 toneladas de níquel metal.

Como se puede apreciar por el *Índice de Herfindahl-Hirschman*, no aparece concentración en la producción, aunque hay países como Canadá, Australia y Nueva Caledonia que arrastran una posición destacada desde hace muchos años.

*Los nuevos recursos.* Durante las últimas dos décadas, los fabricantes de baterías de ion-litio han buscado afanosamente formulaciones de cátodos avanzados que reemplazasen parcialmente el costoso cobalto mediante el uso del níquel, mucho más barato. En general, aumentar el contenido de níquel en una formulación de cátodo mejora la densidad de energía de la batería, pero reduce la estabilidad, lo que significa que hay una compensación entre costo y seguridad.

El níquel ha sido ampliamente explorado en todo el mundo desde hace muchos años, debido al valor de sus concentrados. Por ello goza de una buena información acerca de sus posibilidades productivas y del origen de sus manifestaciones económicas. El níquel participa con el cobalto y el cobre en la composición de los nódulos marinos que en un futuro podrían ser una alternativa a los recursos actuales.

### El manganeso

*Participación del manganeso en el vehículo eléctrico.* El manganeso es un elemento esencial para la industria moderna. Su uso principal es en la fabricación de acero. Aunque la cantidad de manganeso consumida para hacer una tonelada de acero es pequeña (0,6% a 0,9%) es un componente irremplazable en su producción.

*Las condiciones del stock natural.* El manganeso es elemento relativamente abundante en la corteza terrestre, ocupando el puesto 12, con concentraciones variables, pero acercándose al 0,15%. Los minerales de manganeso de la más alta calidad contienen del 40% al 45% de manganeso. Los procesos dominantes en la formación de los principales depósitos del mundo tienen lugar en medios marinos.

*La concentración de la producción.* En principio no debería existir una escasez global de recursos minerales de manganeso, aunque existen factores que limitan su producción desde un punto de vista estrictamente económico. Así, el uso generalizado en aceros para la construcción hace que su demanda sea intensa, alrededor de los 17 millones de toneladas. Es ahí, en la gran producción en donde este metal se puede volver escaso. La concentración de su producción se deriva de la necesidad de conseguir proyectos mineros de gran envergadura de producción.

**TABLA 3**  
**ÍNDICE DE HERFINDAHL-HIRSCHMAN DE LAS CINCO SUSTANCIAS ANALIZADAS EN EL VEHÍCULO ELÉCTRICO**

	Índice de Herfindahl-Hirschman
Tierras Raras	7.016
Grafito natural	4.492
Litio	3.122
Cobalto	3.119
Manganeso	1.688
Níquel	976

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de producción, por países, del USGS 2017

Tomando las referencias del Servicio Geológico Norteamericano (W.F. Cannon *et al.*, 2017), el distrito de manganeso de Kalahari en Sudáfrica contiene el 70 por ciento de los recursos identificados en el mundo y alrededor del 25 por ciento de sus reservas. Sudáfrica, Brasil y Ucrania juntos representaron casi el 65 por ciento de las reservas en 2013. En el año 2017 la producción mundial se elevó a 17 millones de toneladas y los cinco principales productores fueron los siguientes: 1º. África del Sur con 5,3 Mt, 2º. China con 2,5 Mt, 3º. Australia con 2,2Mt, 4º. Gabón con 1,6 y 5º. Brasil con 1,2 Mt. (Kay Amanda, 2018).

Consideraciones sobre la concentración de la producción: el Índice de Herfindahl-Hirschman.

El Índice de Herfindahl-Hirschman (IHH) es un parámetro, empleado en economía, que informa sobre la concentración económica de un mercado. Un índice elevado expresa un mercado muy concentrado y poco competitivo. El índice se calcula elevando al cuadrado la cuota de mercado que cada país posee y sumando esas cantidades. Así, el monopolio perfecto, referido a países productores, produciría un índice de 10.000.

Para homogeneizar los resultados lo más posibles se ha tomado en el cálculo de las cinco sustancias la misma fuente de información, las estadísticas suministradas por el USGS norteamericano referido al año 2017 (Tabla 3). En la Tabla 4 se señalan en % los cinco principales países productores.

Siguiendo la Tabla 4 de los metales considerados, las tierras raras ocupan un destacado primer lugar que, aunque ya de sobra resulta conocido, en 2017 señala un descenso todavía poco importante respecto a años pasado, en donde formaba casi un monopolio perfecto. El grafito denota una importante concentración en su producción, sobresaliendo la presencia de China. Esta esta posición no resulta tan dramática como en el caso anterior, ya que todos los verdaderos analistas reconocen oportunidades en otros países. Además, llama la atención la igualdad del índice para

**TABLA 4**  
**PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE MATERIAS PRIMAS MINERALES EXPRESADOS EN %**

Países productores de TIERRAS RARAS	% de la mundial 2017	Países productores de GRAFITO	% de la mundial 2017	Países productores de LITIO	% de la mundial 2017
China	83	China	65	Australia	41
Australia	11	India	14	Chile	34
Rusia	2	Brasil	7	Argentina	16
Thailandia	< 1	Turquía	3	China	5
Malasia	< 1	Méjico	2	Zimbabwe	2
Resto	2	Resto	9	Resto	2

  

Países productores de COBALTO	% de la mundial 2017	Países productores de MANGANESO	% de la mundial 2017	Países productores de NIQUEL	% de la mundial 2017
R. D. Congo	54	Sudáfrica	29	Filipinas	22
Canadá	6	China	19	Rusia	11
China	6	Australia	15	Canadá	11
Rusia	5	Gabón	12	Australia	9
Australia	4	Brasil	7	N. Caledonia	9
Resto	25	Resto	25	Resto	38

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de producción, por países, del USGS 2017

el litio y el cobalto, que es de todo coyuntural, ya que ambos se encuentran en un dramático proceso de ajuste a la demanda que se avecina y que, sin duda, dejará al cobalto en una posición más aislada. Esto es el resultado de que la distribución geográfica de las oportunidades de producción no resulta en nada innovadora. El manganeso y níquel se mantiene en última posición, cuestión explicada por la madurez de su producción, relacionada por su amplia demanda en el sector metalúrgico.

#### LA FORMACIÓN DE LAS CADENAS DE SUMINISTRO Y LOS PROBLEMAS DEL ABASTECIMIENTO SEGURO ↓

##### Conceptos ↓

La estructura de la cadena de suministro de materiales que necesita un sector industrial, resulta muchas veces bastante compleja y, sobre todo, muy específica del sector que se trate. Resumiendo mucho, si consideramos la parte inicial de un ciclo de vida de un producto industrial, todo comienza con la relación del suministrador con la naturaleza, de dónde se obtienen las materias primas, en este caso minerales. También ahí empiezan los problemas cuando la demanda de un bien mineral se produce con un volumen y exigencia temporal desmesurada. El conocimiento del stock natural de materias primas es siempre complejo y lleno de incertidumbres, por ello, la rápida puesta en marcha de nuevos suministros resulta crucial ante variaciones bruscas de la demanda.

Se comprende muy bien que en la naturaleza, las concentraciones de metales necesitan tiempo para ser descubiertas y ser puestas en producción. No son

extraños los periodos de maduración de los proyectos superiores a los 12 años y, aunque existen muchas cifras, el entorno de ocho años resulta muy frecuente. El agotamiento de las concentraciones minerales debe provocar su sustitución de manera eficiente y, cuando esto ocurre a nivel de una tipología o manera de encontrarse en la naturaleza, la tecnología debe acudir en su ayuda, incluso antes de las fases de agotamiento.

A fin de ayudar a la comprensión de estos fenómenos, se ha optado por presentar esquemas muy resumidos de las cadenas de valor (ciclo de producción) en la Figura 1, y de suministro, Figura 2. Ambas, en casi todo son semejantes. No puede extrañar, ya que, en estas fases primeras, los eslabones de la cadena de valor se encuentran marcados por los productos resultantes de cada etapa. Sobre ellas se superpondrán los materiales básicos que presentan posibles problemas de abastecimiento a la fabricación del vehículo eléctrico.

La «cadena de valor» del proceso de producción de materias primas minerales comienza en la *Etapa 1* del ciclo de vida de cada metal. Es la fase de exploración de nuevos recursos con criterios de selectividad respecto a las calidades buscadas, que se relacionan con las exigencias del mercado o, en todo caso, con las economías de producción. La *Etapa 2* es la fase de la actividad de explotación de la materia prima mineral. Las dimensiones y calidades están relacionadas, tanto por las cualidades y calidades del yacimiento, como por la demanda. La selectividad en la explotación se encuentra regulada por las riquezas o leyes límites que son el reflejo de la demanda y de los costes de producción.

FIGURA 1  
CADENA DE VALOR EN OPERACIONES MINERAS MÁS USUALES



Fuente: elaboración propia

FIGURA 2  
CADENA DE SUMINISTROS HACIA LA INDUSTRIA ESPECIALIZADA



Fuente: elaboración propia

En la *Etapa 3*, la concentración y/o preparación del mineral extraído, se realiza también en el lugar de la explotación minera y, muchas veces, resulta el proceso que exige un mayor esfuerzo tecnológico y de costes de operación, ya que debe liberar los granos de mineral a fin de poder concentrarlos para producir productos de la mayor riqueza posible. Estos saldrán del lugar de la explotación hacia la metalurgia o el refino.

En la *Etapa 4*, se realiza, en general, la extracción del metal del mineral que lo contiene y requiere de un complejo industrial de importancia, en ubicaciones diferentes fuera del lugar donde radica la explotación minera, además de un fuerte consumo de energía. En

algún caso, se puede considerar parte de la *Etapa 3*, al menos de manera primaria, ya que un metal impuro puede surgir del proceso hidrometalúrgico asociado a esta etapa. Solo en estos casos.

Por fin, en la *Etapa 5*, se pueden incluir las diversas transformaciones de carácter secundario que preparan, en el caso de los metales, el material bruto en lingotes o planchas, para las transformaciones industriales que configuran los productos finales o los componentes de cadenas más complejas. En otros casos, tal como ocurre con el litio o el grafito, en esta etapa no se realiza la producción del metal, sino una transformación química hacia el componente definitivo.

**TABLA 5**  
**POSIBLE «CRITICIDAD» EN LAS FASES DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE LOS METALES DEL VEHÍCULO ANTE UNA DEMANDA BRUSCA DE LAS BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y LAS LEYES O CONCENTRACIONES DE METAL EN CADA FASE**

	Grafito	Litio	Cobalto	Níquel	Manganeso	Neodimio
<b>Fase 1</b>	80%-90% C	> 1% Li <sub>2</sub> O - 500 ppm Li <sub>2</sub> O	> 0.1% Co	> 0.4% Ni	> 4% Mn	> 0.1% de Tierras Raras en conjunto
<b>Fase 2</b>	80%-90% C	> 1% Li <sub>2</sub> O - 500 ppm Li <sub>2</sub> O	> 0.1% Co	> 0.4% Ni	> 4% Mn	> 0.1% de Tierras Raras en conjunto
<b>Fase 3</b>	>90% C	> 5% Li <sub>2</sub> O -	> 2% Co	5%-12% Ni	> 70% Mn	> 40% de Tierras Raras en conjunto
<b>Fase 4</b>	>95% C	Li como Carbonato	Variable como prod. químicos	Variable como prod. químicos	Variable como prod. químicos	> 85 % Hidróxido Neodimio
<b>Fase 5</b>	>95% C	Li como Carbonato	Muy alta	Muy alta	Muy alta	> 95 % Hidróxido Neodimio

Fuente: elaboración propia

### Aplicación a los componentes de los acumuladores de energía eléctrica

La Tabla 5 señala los metales y minerales componentes del vehículo eléctrico que presentan rasgos de incertidumbre en sus cadenas de suministro ante una previsible demanda con carácter extraordinario. Se han identificado dos niveles caracterizados por la densidad en la carga de gris. Además, acompañando a cada fase, se presentan las concentraciones de metal más frecuentes en cada etapa del ciclo de vida y de suministro.

#### El grafito

En este caso, la cadena de suministro no se dirige hacia la producción de componente puro, que ya lo es, el carbono, sino a su preparación física para su incorporación a las etapas de fabricación de los componentes de la batería. Por ello, la calidad del yacimiento (Etapa 1) resulta fundamental, ya que las calidades de mineral superiores permiten productos finales más exigentes, tal como ocurre con los componentes de los nuevos acumuladores eléctricos. El grafito es muy abundante en la naturaleza. Algunos organismos aceptan hasta 900 millones de toneladas recursos reconocidos, sin embargo, aquellos de mejor calidad, referidos al tamaño de escama, son muy escasos y fervientemente buscados.

#### El litio

Este metal tampoco es utilizado de manera elemental o aislada, sino en su aspecto de materia química en las etapas finales de su cadena de suministro. El litio puede proceder de minerales sólidos (espodumena, petalita y otros) que lo contienen, con una relativamente baja concentración (generalmente no más de un 4% Li<sub>2</sub>O) en la Etapa 1 o 2, mientras que en su proceso de concentración (Etapa 3) puede llegar hasta alrededor de un 10% Li<sub>2</sub>O. En la Etapa 4, su transformación

es química y busca el producto carbonato de litio que es el que se comercializa en las primeras fases de su incorporación en las baterías ion-litio.

Además, desde hace años, las salmueras naturales, bien profundas o superficiales (los salares andinos) son una fuente alternativa a los minerales sólidos, y hoy, con los minerales sólidos, se reparten la procedencia del litio mundial. La ventaja operativa se refiere a que el litio se encuentra disuelto y la Etapa 1 o 2 del suministro, casi se superpone con la Etapa 3 de concentración, mientras que las restantes del ciclo ya son semejantes.

En la cadena de suministro del litio, metal en principio muy abundante en la naturaleza, la Etapa 1 cada vez se enriquece con el descubrimiento de nuevas posibilidades de ocurrencia (nuevas fuentes de suministro) y, por ello, no podemos imaginarnos su escasez. Sin embargo, al trabajar con concentraciones de metal muy bajas, en un sentido económico, podemos considerar que no todas las procedencias y calidades son admisibles para la Etapa 3 del proceso. El precio puede hacer variar estas condiciones, pero también la economía de la batería se puede resentir de las altas cotizaciones actuales de este metal. La Etapa 5 del proceso también necesita un verdadero análisis, a causa de la existencia de una verdadera concentración en la fabricación del producto final en China (alrededor del 60%)

#### El cobalto

La concentración de productores en su Etapa 1 es una característica muy notable del cobalto, además de presentar en sus yacimientos, una producción compartida con el cobre y el níquel. Su Etapa 3 (el proceso de concentración) resulta muy común con otros metales y no manifiesta una problemática específica, a excepción de las dificultades de ampliar el tamaño de las instalaciones existentes que necesitaría la adecuación de la producción a la demanda. No existen

grandes yacimientos de cobalto en el mundo (Etapa 1) y la explotación alternativa de los nódulos marinos todavía se encuentra en fase experimental, además de requerir una fuerte investigación en los sistemas de recogida y transformación de los mismos (Etapa 2 y 3). También China posee un acusado protagonismo en la Etapa 4 de la cadena de suministro del cobalto.

*El níquel.* Este metal presenta una definición muy acusada en el origen de sus recursos (Etapa 1) en dos conjuntos muy bien definidos. Aproximadamente la mitad de su producción procede de yacimientos en los que el níquel posee una relativa alta concentración y éste se presenta en forma de sulfuro. Además, la mitad de su procedencia procede de su forma oxidada, con riquezas de metal muy bajas. Sin embargo, hacia el futuro, son los yacimientos de níquel oxidado los que suministrarán la mayor parte del níquel, ya que presentan mayores posibilidades de incremento de su producción. La Etapa 3 también resulta bastante diferente en ambos casos y el consumo eléctrico sobre unidad de metal producida, también es distinta. En su metalurgia, Etapa 4, todavía se diferencia más y se trabaja en reducir el consumo eléctrico de los minerales oxidados o lateríticos.

### El manganeso

El manganeso es un metal relativamente abundante en la naturaleza y forma depósitos minerales de todas las categorías (Etapa 1). Su extracción y procesado en principio no significan procesos diferentes a los demás minerales, a excepción de algunos casos que utilizan procesos hidrometalúrgicos o químicos (Etapas 3 y 4). El producto final del proceso minero y comienzo del metalúrgico (Etapa 5), para el suministro a la industria de los acumuladores puede contener rigideces ante una fuerte demanda de productos químicos, tal como reflejan sus precios actuales.

### Consecuencias sobre el suministro seguro de las materias primas minerales para las baterías del vehículo eléctrico

Considerando con preferencia las condiciones del abastecimiento actual y sus previsiones a medio plazo de los componentes minerales (o de sus metales) del vehículo eléctrico y las circunstancias que pueden afectar al suministro seguro de la industria de las baterías eléctricas, se plantean las siguientes consideraciones para cada uno de los componentes:

### El grafito

*La existencia de una adecuada cadena de suministro.* En el mundo actual, el grafito se considera un material clave y estratégico en la economía de la tecnología ecológica que incluye avances en almacenamiento de energía, vehículos eléctricos, energía fotovoltaica y electrónica. El grafito también es la fuente de grafito. A medida que la economía de la tecnología verde crece, se espera que la demanda de grafito supere

la oferta en la próxima década. Se piensa que, en un solo el mercado de los vehículos eléctricos, la demanda estimada para 2020 requeriría más de lo que se produce hoy en todo el mundo. Con la demanda de grafito de escama grande en crecimiento, se estima que se necesitarán 25 nuevas explotaciones de grafito en todo el mundo para cubrir las necesidades del año 2020.

Los mercados emergentes como India y China han estado frenando el suministro de grafito para el consumo interno, donde el ritmo de la industrialización ha superado con creces los promedios mundiales. China todavía controla ahora más del 65% de la producción mundial de grafito, aunque recientemente parte de esa producción se ha visto reducida. Además de cerrar minas antiguas y otras más pequeñas debido a violaciones ambientales. Este país también está consumiendo más grafito, retirándose un poco del mercado internacional para exportar los productos terminados.

Por otra parte, se cree que los recursos mundiales reconocidos de grafito pueden superar los 900 millones de toneladas. Es decir que, aunque existe una aparente brecha entre la oferta y la demanda, no corresponde al esfuerzo de investigación la culpa de ello, sino más bien a la falta de adecuación motivada por multitud de causas, siempre con la presencia de China en el centro de la polémica. No obstante, en el caso del grafito, la adecuación de la cadena de suministro ante la avalancha de demanda de productos de calidad motivada por las nuevas tecnologías energéticas, a corto plazo, no debería ser un problema insuperable, sobre todo contando con la posibilidad de la fabricación de grafito artificial de calidad.

*Los factores políticos.* Los países de Asia y Pacífico representan el mercado de más rápido crecimiento para el grafito, que es impulsado principalmente por los mercados chino e indio. Factores tales como el bajo costo de la mano de obra y los recursos naturales de grafito, proporcionan un crecimiento sostenible del mercado (especialmente en China) incluso en condiciones de poca demanda. Con una sólida posición en el mercado del grafito, se espera que China tenga un crecimiento sostenido respaldado por sus inversiones en el extranjero, pero también este país hace poco tiempo comenzó a proteger sus necesidades internas y controlar las exportaciones.

### El litio

*La existencia de una adecuada cadena de suministro.* Según Goldman Sachs (Investing News, 2017), la demanda global de litio aumentó un 26% en 2016 y se prevé que crezca un 39% en 2018. Teniendo en cuenta que además de su inclusión en las baterías de vehículos eléctricos y dispositivos móviles este metal se emplea en la fabricación de grasas lubricantes, y otros usos, se puede plantear el dilema de si habrá litio para todos durante las próximas décadas. La disponibilidad actual de este elemento no es un factor que limite la producción a gran escala de coches eléctricos ya que

de momento existen reconocidas 40 millones de toneladas. Lo que sí puede desacelerar el ritmo de fabricación de las baterías para estos automóviles son los cuellos de botella en la cadena de distribución del litio.

También existe una duda generalizada sobre las posibilidades de una adecuación rápida de la producción mundial del litio a la fuerte demanda. Tal es la opinión de que el abastecimiento se está ralentizando debido a la complejidad de construir estanques de evaporación en regiones andinas de América del Sur que, además de su elevado coste, también plantea problemas de abastecimiento de agua y otros inconvenientes de índole ambiental.

Muchos analistas piensan que hay metal de litio suficiente en la corteza de la Tierra para sustentar la fabricación de vehículos eléctricos en los volúmenes requeridos, basándose únicamente en las necesidades de baterías de litio. Se piensa que los recursos disponibles de litio son muy abundantes, alejados de toda valoración precisa.

Se espera que 26 plantas de baterías comiencen la producción o amplíen su capacidad para el año 2022. En 2014, tan solo había tres megafactorías de baterías en proceso. La capacidad planificada combinada de estas plantas es de 344 GWh. Para poner esto en perspectiva, la demanda total de baterías de ion-litio en 2017 se estima en 100 GWh, pero la industria necesita ampliarse. De hecho, se calcula que la demanda de baterías podría situarse entre 775 GWh y 2000 GWh, en el año 2030, según las estimaciones reflejadas en la Tabla 2. Ello llevaría a unas demandas de litio entre 77.500 y 300.000 toneladas.

La adecuación de la cadena de suministro del litio a la demanda ahora previsible, pronostica una dislocación de los mercados cuando se manejan las cifras de producción de los coches eléctricos a partir del año 2050 (si bien aquí nos movemos con análisis y supuestos en el horizonte del año 2030), por el increíble esfuerzo de producción que significaría la cobertura de la demanda. Visto así parece catastrófico, pero sin duda alguna el escenario no será tan dramático. De esta manera podemos contemplar el primer paso de la adecuación con un aumento de producción hasta el año 2030 motivado por los altos precios actuales y el interés de los inversores en nuevos proyectos. Más adelante la adecuación de los precios vendrá provocada por la reducción del consumo en las baterías y el aumento de su eficacia. Siempre ha ocurrido así.

*Los factores políticos.* China es el consumidor de litio más importante del mundo debido a su rápido desarrollo económico, a su gran población y a la creciente demanda de vehículos eléctricos, impulsadas por la búsqueda de soluciones a los problemas de contaminación atmosférica, en especial en ciertas ciudades. El consumo de China fue de 86.700 toneladas de carbonato de litio en 2015, lo que representa el 50% del total mundial. El recurso de litio de China depende en gran medida de las importaciones. El 70% del concentrado de espodumena se importa tan solo de

Australia. Las proyecciones de crecimiento de las ventas de vehículos eléctricos aseguran la dependencia de China de sus importaciones de litio y, por ello, hasta en la misma China existen voces que pronostican problemas de seguridad en el suministro.

## El cobalto

*La existencia de una adecuada cadena de suministro.* En el año 2020 la expectativa del consumo en baterías representará el 59% de toda la demanda de cobalto, indicando un aumento del 58% en la demanda de baterías con respecto a los niveles de 2016 (Darton Commodities, 2016). Se espera que este crecimiento proceda del aumento de la demanda de vehículos eléctricos.

El segmento de la batería recargable se ha convertido en el más importante uso final de cobalto y de crecimiento más rápido. CRU estima que en 2017 habrá un déficit mundial de 4.000 t para productos químicos de cobalto refinado y más de 1000 t para el metal cobalto y espera que el déficit de cobalto metal se reduzca en el mediano plazo (2017-2021), mientras que el déficit químico refinado de cobalto se mantendrá en niveles altos.

Alrededor del 97% de la producción mundial de cobalto es un subproducto secundario de la extracción de cobre y níquel, lo que deja al suministro de cobalto expuesto a las fluctuaciones del mercado del cobre y el níquel. Si la demanda de cobre se detiene, la producción de cobalto podría caer junto con ellos. La suspensión de la producción de Glencore en sus minas de cobre y cobalto Katanga y Mopani en la República Democrática del Congo (RDC) y Zambia en 2015 es un buen ejemplo.

Entonces, aunque una gran proporción del suministro de cobalto existente sigue siendo incierta y es difícil obtener nueva capacidad debido a la escasez de recursos primarios de cobalto, el riesgo para la cadena de suministro de la batería de ion-litio permanece, y es probable que los precios continúen al alza.

*Los factores políticos.* China controla la mayor parte del cobalto refinado del mundo y depende de la República Democrática del Congo en más del 90% de su suministro de cobalto. En palabras del especialista Rawles (2018) «Lo importante es darse cuenta de que China produjo el 80 por ciento de los productos químicos de cobalto del mundo y que gran parte de su materia prima procede de concentrados de la República Democrática del Congo». Cualquier cambio en el país productor puede tener un impacto real en los precios de los productos químicos de cobalto.

## El níquel

*La existencia de una adecuada cadena de suministro.* El níquel se diferencia de las anteriores materias primas por poseer una consolidada cadena de suministro. En níquel está presente en los aceros inoxi-

dables que constituyen una importante parte del flujo de materia industrial, sobre todo en productos y aplicaciones de aceros de calidad. Hay que considerar que la producción total mundial de níquel metal alcanza las 2,1 millones de toneladas (USGS, 2018) y todavía no se han incorporado las previsible cantidades dedicadas al vehículo eléctrico. Además, ya se ha mencionado que el aumento desmesurado de los precios del cobalto ya ha despertado el interés en su sustitución por otro metal muy afín como es el níquel. Incluso, en la naturaleza, también se produce en algunos tipos de yacimientos minerales la presencia de ambos metales.

No obstante, también, la incorporación del coche eléctrico podría llegar a suponer demandas de este metal, en el año 2030 en el amplio rango de 310.000 toneladas a 1,5 millones de toneladas, lo que supone cifras muy significativas en relación con los niveles de producción actual.

*Los factores políticos.* También, en el caso del níquel, este metal se encuentra, en principio, alejado de los peligros de acciones de cartelización, a juzgar por los valores del índice IHH de la tabla 3. Su producción resulta algo diversificada. Además, como caso algo insólito, la presencia china no resulta motivo de preocupación debido a la escasa magnitud de su producción.

## El manganeso

*La existencia de una adecuada cadena de suministro.* La industria minera, en principio, es decir, en las primeras etapas del su ciclo, no diferencia entre el destino del producto final, la industria del acero y la fabricación de productos químicos. Sin embargo, tanto sus concentrados, como, en ciertos casos, los precipitados procedentes de la lixiviación en planta del manganeso, sí se encuentran orientados hacia los productos químicos finales. Productos derivados de ellos pueden llegar a constituir elementos de los acumuladores eléctricos.

Por todo ello, también como idea muy global, las cadenas de suministro podrían hacer frente a fuertes incrementos de la demanda, sobre todo cuando no importase tanto alguna diferencia en las cotizaciones derivadas de esa situación.

*Los factores políticos.* Para algunos importantes países, como los EEUU, el manganeso resulta un metal crítico para su industria siderúrgica. El hecho es que, aunque más moderada que otros metales de carácter estratégico, la producción de manganeso se encuentra relativamente concentrada. Sin embargo, estamos tratando del suministro de manganeso como productos químicos para la fabricación de baterías eléctricas, no de la industria del acero de construcción. En ese sentido, para esta industria, a pesar de que la presencia china es muy importante, no parece que se puedan ejercer presiones sobre el suministro de este metal.

## CONCLUSIONES

El suministro adecuado y seguro de las materias primas minerales, resulta crucial para la industria actual y futura, a fin de llevar a cabo con éxito la progresiva e intensa penetración de los vehículos eléctricos, que ya ha comenzado a tomar posiciones. De la comprensión de la problemática que se espera surja en los próximos años, en relación con la posibilidad de hacer viable una transición en el transporte en el contexto de una evolución energética, la viabilidad de cadenas de suministros eficientes y seguras es clave para atender los crecimientos de las demandas de materias primas minerales para satisfacer el previsible incremento de vehículos eléctricos a nivel global.

La necesidad del almacenamiento de energía lleva siendo un objetivo deseado desde hace muchas décadas. Sin embargo, deberá ser ahora, con una opinión social más decidida y con un sector automovilístico que comienza a aceptar el reto, cuando la tecnología necesitará emplearse a fondo para lograrlo de una forma competitiva que satisfaga las necesidades de los consumidores.

En la problemática analizada para la satisfacción de los incrementos en las demandas de materias primas y metales para los baterías de los vehículos eléctricos, se señalan tres puntos clave que deberían de ser tenidos en cuenta:

1. *La incertidumbre ante una demanda no del todo definida* en dos aspectos fundamentales. El primero en cuanto a la cuantificación de la demanda en la que se observan previsiones que difieren muy notablemente entre los valores inferiores y superiores. El segundo en cuanto a la pendiente o el gradiente del crecimiento, lo que pone de relieve que la velocidad del cambio en la demanda resulta clave, pudiendo motivar una falta de sincronía entre las restricciones por motivos técnicos y su solución, así como originar una acusada variación en los precios motivada por la amenaza de una presunta escasez.

En cuanto a *las restricciones por motivos técnicos*, de las cinco fases de la cadena de suministro, se han identificado fases críticas en el grafito en la fase 1 de exploración, en el litio en la fase 2 de preparación o concentración, en el cobalto en prácticamente todas las fases, en el níquel en la fase 4 de metalurgia de concentrados, en el manganeso en las fases de preparación de concentrados y metalurgia, y en el neodimio en las fases primera y última.

En cuanto se refiere a *los precios* puede afectar de una forma más clara a minerales como el litio, donde existe incertidumbre sobre la aparición de cuellos de botella coyunturales en los próximos años, o el cobalto, que ha visto casi cuadruplicar su precio en tres años por la amenaza de su escasez en el mercado. Así pues, los precios serán las señales económicas para el desarrollo de

nuevas producciones, en los que la capacidad física y logística supondrán tiempos de ajuste en los que los precios serán elevados.

Sin embargo, en aquellas materias primas que se presentan con evidente generosidad en el stock natural, se confía en la adaptación paulatina de su cadena de suministro en el medio plazo. En aquellos como el cobalto que, a medio plazo, no presentan garantías de abastecimiento, tal como ha ocurrido otras veces, los avances tecnológicos en la búsqueda de sustitutos ha sido la solución más frecuente.

La búsqueda de bienes sustitutivos, como la mayor proporción de níquel para disminuir la del cobalto en las baterías, actuarán también, afectando a las cadenas de suministro. Así pues, si bien las incertidumbres en las estimaciones de la demanda afectarán de forma más clara al litio y al cobalto, es importante señalar el papel de los precios como variable

2. *Los horizontes temporales de las previsiones.* La respuesta ante una demanda que, en general, crecerá claramente en el horizonte 2030, no solo tiene amplias divergencias en la cuantificación de las demandas en ese horizonte sino que también es prácticamente imposible definir o estimar con una fiabilidad razonable en horizontes a más largo plazo. Esto resulta importantísimo, en relación con la velocidad de respuesta de la industria minera y de sus transformaciones. Los nuevos descubrimientos de recursos minerales y el desarrollo de los proyectos de explotación gozan de necesidades temporales hoy por hoy, ineludibles. En esta velocidad está la clave de la veracidad de los modelos. Para algunos metales, especialmente el cobalto, no existe una razonable respuesta a una demanda tan rápida como la que se presume después de los años veinte de este siglo.
3. *El peligro de la utilización geopolítica de las debilidades de la cadena de suministro.* La posición, en ocasiones muchas veces dominante de China en diferentes puntos de la cadena de suministro de casi todas las materias primas minerales de carácter reducido que necesita el vehículo eléctrico del futuro, convierte esta circunstancia en, al menos, preocupante. Llama poderosamente la atención como el gigante asiático ha tomado una posición preferente, bien en la producción de las materias primas o en las primeras transformaciones de los minerales de producción escasa y casi siempre estratégicos. Esto ocurre en todas las materias primas hoy consideradas con calificación de estratégicas y algunas veces críticas (CRM). No hay que olvidar que China es el país con una mayor demanda futura de vehículos eléctricos. También, la concentración, al menos momentánea, de la producción en muy pocas manos (tierras raras, grafito, litio, cobalto, con mayores índices LHH) y la inestabilidad política o social (cobalto) es otro fac-

tor de inseguridad que muchas veces lo acusan los propios mercados.

## NOTAS

- [1] En el año 2017 el número de este tipo de vehículos fue de 7.200 unidades, algo más de la mitad en EEUU, 2.300 en Japón y 1.200 en Europa, fundamentalmente en Alemania. En cuanto a las técnicas básicas y al uso del hidrógeno en el transporte, para más información puede verse (Álvarez Pelegry et al. 2017).

## REFERENCIAS

- Álvarez Pelegry, E. y Menendez Sanchez, J. (2017) « Energías alternativas para el transporte de pasajeros. El caso de la CAPV: análisis y recomendaciones para un transporte limpio y sostenible. Cuadernos Orkestra
- Andrew Miller. 2015. «*Flake graphite market trends and pricing patterns*», Industrial Minerals INDATA [indmin.com/graphiteanalysis](http://indmin.com/graphiteanalysis)
- Bloomberg. 2018. *New Energy Outlook 2018*. <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>
- Cannon W.F., Kimball B.E., and Corathers L.A. 2017. «*Manganese*». Professional Paper 1802-L. U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/l/pp1802l.pdf>
- CRU. 2018. CRU International Limited. *Cobalt Analysis*. <https://www.crugroup.com/analysis/technology-metals/>
- Darton Commodities Limited. 2018. [dartoncommodities.co.uk](http://dartoncommodities.co.uk)
- Glencore. 2018. «*The EV revolution and its impacts on raw materials*» <https://www.iea.org/media/Workshops/2018/Session3Glencore.pdf>
- IEA. 2018. «*Global EV Outlook 2018: towards cross-modal electrification*». [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Investing News. 2017. «*3 Takeaways from Goldman Sachs on Lithium Investing*» The Lithium Spot. November 16th, 2017. <https://investingnews.com/daily/resource-investing/energy-investing/lithium-investing/goldman-sachs-lithium-investing/>
- IRENA. 2018. «*Electric Vehicles Technology Brief*» [www.irena.org](http://www.irena.org)
- Kay Amanda. 2018. «*10 Top Manganese-producing Countries*». Investing News Network. April 18th, 2018. <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/manganese-investing>
- Rawles C. 2018. «*Cobalt Critical to Lithium-ion Battery Chemical Mix*». Investing News Network. February 27th.
- UBS. 2018. «Coche Eléctrico. Descripción en ciernes». Wealth management. Powered by
- USGS. 2017. *Mineral Commodity Summaries*. mineral.usgs.gov. <https://minerals.usgs.gov/minerals/.../>
- USGS. 2018. *Mineral Commodity Summaries. Graphite (Natural)*. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/graphite/>
- USGS. 2014. «*Mineral Commodity Summaries*». mineral.usgs.gov
- Warner, J. 2015. «*The handbook of lithium-ion battery pack design*». Amsterdam, Oxford Woltham». Elsevier Science