

2.4. TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN IBEROAMÉRICA. OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS A PARTIR DEL LITIO Y EL HIDRÓGENO VERDE

RODOLFO BARRERE,* EMILIO SANTIAGO MUIÑO** Y LAURA TRAMA***

PRINCIPALES AFIRMACIONES

- La importancia estratégica del litio y del hidrógeno verde se enmarca en la necesidad de solventar el problema estructural de la intermitencia en la producción de energías renovables, principalmente solar y eólica. Las baterías, de las que el litio es un componente esencial, y el hidrógeno son tecnologías que permiten el almacenamiento de electricidad. Litio e hidrógeno verde son ingredientes de una oleada tecnológica que impondrá en todas las economías un proceso de ajuste tanto en el plano técnico como en el normativo-regulatorio y social.
- Su desarrollo está condicionado por una serie de barreras de índole técnica. En el caso del litio tiene que ver con las complejidades inherentes al crecimiento proyectado del sector, que es inmenso, frente a la oferta que es razonable esperar. En el hidrógeno verde la gran barrera técnica es que se trata de una tecnología que no está suficientemente madura. También existen desafíos de otra índole. Los más evidentes son los ambientales, que siempre presentan una continuidad con impactos sociales de diverso tipo.
- La resolución de estos desafíos tiene algo en común; el conocimiento es clave. Y eso no sólo implica el acceso a la información científica de frontera o a tecnologías limpias y eficientes; tiene que ver también con la capacidad de tener un rol central en el desarrollo de ese conocimiento y esas tecnologías y poder adecuarlas a los contextos locales.
- Entre los diez años comprendidos entre 2012 y 2021 la producción científica sobre la obtención o producción de hidrógeno creció acompañando el interés global por el tema y los países iberoamericanos registraron una producción que acompaña esa tendencia general. Iberoamérica representa el 8% de la producción mundial en este tema y es el mismo peso que tiene la región para el total general, por lo que no se registra aquí ningún tipo de especialización. El nivel de patentamiento en la región es bajo, alcanzando un total de 31 patentes solicitadas en relación con la producción de hidrógeno entre 2008 y 2021.
- La investigación para el desarrollo de pilas de combustible de hidrógeno se mantuvo también en expansión. En volumen, se trata de un área mucho mayor que la de la producción de hidrógeno, aunque su crecimiento más moderado. La región acumuló un 6% de la producción mundial. La cantidad de patentes publicadas en la que figuran países iberoamericanos entre sus titulares es muy escasa, con tan sólo 12 registros. España concentra casi la totalidad al contar con 11 patentes y Brasil con una.

* Coordinador del Observatorio Iberoamericano de la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad de la OEI

** Científico Titular del Departamento de Antropología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

***. Observatorio Iberoamericano de la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad de la OEI

- La investigación relacionada con la minería de litio ha generado una producción de artículos muy pequeña. En 2012, a nivel mundial sólo se han identificado 30 artículos sobre este tema en revistas indizadas en SCOPUS. A partir de 2016 se observa un cambio de tendencia, momento en el cual la producción aumenta hasta un pico de 164 en 2021. Iberoamérica cuenta con 78 publicaciones acerca de la minería de litio, con una participación del 10% de la producción mundial en el tema. La cantidad de patentes publicadas en la que figuran países iberoamericanos entre sus titulares es de 7. A pesar del bajo número de registros totales, dos países del triángulo del litio lideran la región; se trata de Argentina y Chile.

- La investigación mundial sobre baterías de litio ha tenido una rápida expansión, multiplicándose más de cuatro veces y media entre 2012 y 2021. La producción iberoamericana sobre esta temática tiene una tendencia similar al desarrollo de las publicaciones a nivel mundial, aunque con un volumen relativo bajo que se mantiene en torno al 6% de la producción global. En este terreno, el patentamiento de empresas radicadas en los países iberoamericanos es nuevamente muy limitado, con sólo 13 patentes.

- En todos estos temas, la cooperación iberoamericana es central en la investigación científica y el desarrollo tecnológico, en especial para los países de menor desarrollo relativo de la región. Cooperar, poniendo en común capacidades de investigación (personal, instalaciones, conocimientos) es una necesidad para enfrentar los retos de la transición energética en Iberoamérica.

- La integración de los países iberoamericanos tiene en los requerimientos cooperativos de la transición energética una oportunidad de realizar avances sólidos. Los procesos de integración regional exitosos dependen más de espacios parciales donde se institucionaliza la resolución cooperativa de problemas prácticos que del voluntarismo abstracto. La ciencia y la tecnología tienen todos los elementos para convertirse en uno de estos espacios.

1. LITIO, HIDRÓGENO VERDE Y POLÍTICAS PÚBLICAS. ENTRE EL BOOM TECNOCOMERCIAL Y LOS DESAFÍOS SOCIOPOLÍTICOS.

En el año 2022 todavía el 80% de la energía primaria que se consume en el mundo proviene de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas). La cifra es desalentadora. Siete años después de la firma del Acuerdo de París el grueso de la actividad económica continúa acumulando gases de efecto invernadero en la atmósfera y acelerando el cambio climático de origen antropogénico. De seguir la senda de emisiones actual, según el primer grupo de trabajo del VI informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climáticos (IPCC) de Naciones Unidas, en el año 2040 habremos agotado el presupuesto de carbono del que disponíamos durante todo el siglo XXI para no superar el umbral de seguridad climática de los 1,5 grados de aumento de la temperatura media global respecto a la era preindustrial.

Esta alarma científica se ha transformado ya en una alarma social. En el último lustro el cambio climático ha pasado de ser percibido como un problema ambiental a serlo como un problema económico, político y probablemente muy pronto como un asunto de seguridad nacional. Con solo 1, 1º de aumento de temperatura en los últimos cinco años casi todos los países del mundo han desarrollado su propia memoria incipiente de traumas climáticos: fenómenos meteorológicos extremos que rompen todos los récords, nuevos problemas de salud pública, multiplicación de

incendios de sexta generación o graves afecciones a las cosechas, entre otros.

Que la crisis climática haya dejado de ser un relato científico abstracto para pasar a ser una experiencia cotidiana ha contribuido al salto de escala que ha conocido la política climática en fechas recientes. También ha jugado un papel clave el abaratamiento de las tecnologías renovables, un momento de la historia macroeconómica favorable al despliegue de un gran ciclo de inversión productiva y un nivel de movilización social creciente ante una ansiedad climática cada vez más extendida. Estos cuatro factores explican que el discurso de la transición energética haya pasado a ser un eje estratégico prioritario de las políticas económicas e industriales en numerosos países. Aunque la transposición a los marcos legislativos nacionales es todavía precaria, la totalidad de los países iberoamericanos han firmado el Acuerdo de París, asumiendo el objetivo de alcanzar la neutralidad en carbono en el año 2050.

Estamos enfrentando la década decisiva para evitar los peores escenarios climáticos. Cumplir con los objetivos de descarbonización que nos hemos impuesto sólo será posible si en los próximos años asistimos a una revolución tecnológica mayúscula. Esta implicará importantes reverberaciones en nuestra vida económica, política y social, cuyos parámetros serán redefinidos por la transición energética. Y viceversa: la transición energética se moldeará en función de variables sociales articuladas en políticas públicas. Esta interacción entre ciencia, tecnología,

economía y políticas públicas será el foco de atención de estas páginas, que trazarán una panorámica sobre dos tecnologías que han despertado importantes expectativas, tanto en sus retos como en sus oportunidades: las baterías de ion de litio y el hidrógeno verde.

1.1. Litio e hidrógeno verde: dos piezas estratégicas de un boom tecno-económico inminente

La transición energética implica toda una serie de enormes desafíos técnicos provocados por la diferente morfología material de los combustibles fósiles y las energías renovables. “Con los stocks podemos ser impacientes, no así con los flujos”. De esta manera resumía el economista rumano Georgescu-Roegen una de las diferencias fundamentales entre el régimen energético preindustrial y el régimen energético fósil. Otra de las grandes diferencias que facilita un stock frente a un flujo es su manejabilidad: almacenabilidad, movilidad, divisibilidad, e independencia respecto a los avatares cambiantes del entorno, como la climatología o el calendario. Finalmente, la naturaleza excepcional de los combustibles fósiles, que deben ser entendidos como enormes depósitos de energía solar concentrada y comprimida, hace que su densidad energética (la cantidad de energía por unidad de masa), sea superior en varios órdenes de magnitud a los stocks tradicionales, como la biomasa. La explotación del stock fósil a partir de la revolución industrial descubrió para la humanidad un nuevo continente virgen de energía acumulada que era inédito en su riqueza energética, en la velocidad al que podíamos aprovecharlo y en la versatilidad de su manejo.

Sin embargo, las dos fuentes renovables fundamentales que se proyectan en las futuras matrices energéticas descarbonizadas (eólica -terrestre y marina- y solar -fotovoltaica y de concentración-) son flujos estocásticos o intermitentes: se produce energía eléctrica cuando sopla el viento o cuando brilla el sol, no cuando lo exige la demanda energética de los consumidores. Estos dos momentos no tienen porqué coincidir. Especialmente porque la demanda eléctrica es altamente oscilante en función de diferentes variaciones como los consumos diurnos y nocturnos, la diferencia entre días laborales y fin de semana o las demandas específicas del ciclo estacional (necesidades de calefacción en invierno y de refrigeración en verano). Sin embargo, el moderno sistema eléctrico exige un suministro muy estable, de alta calidad y una sincronización perfecta entre oferta y demanda, que siempre deben coincidir en tiempo real. Ante el reto de sincronizar oferta y demanda en un sistema energético de flujos intermitentes existen tres soluciones fundamentales: intensificar conexiones eléctricas internacionales (para importar energía deficitaria y exportar energía sobrante), gestionar la demanda, volviéndola flexible en función de la oferta disponible y orientar la energía excedentaria hacia el almacenamiento, utilizándola posteriormente en los momentos de déficit energético.

Existen cuatro formas básicas de almacenamiento energético masivamente aprovechables en las

circunstancias tecnológicas actuales: mecánico, térmico, químico y electroquímico. La importancia estratégica del litio y del hidrógeno verde se enmarca en esta necesidad de solventar el problema estructural de la intermitencia en un sistema energético con alta penetración de renovables. Las baterías, de las que el litio es un componente esencial en sus desarrollos actuales, y el hidrógeno son tecnologías que permiten el almacenamiento de electricidad, por vía electroquímica y química respectivamente.

El litio es un elemento esencial de las baterías eléctricas y se le proyecta una importancia central, especialmente en los planes de electrificación del parque global de automóviles. Algunas estimaciones apuntan a que en el año 2040 el 30% de los automóviles en circulación serán eléctricos, lo que supone aproximadamente 500 millones de vehículos. Asumiendo el escenario 2DS de la Agencia Internacional de la Energía (AIE)– un 50% de probabilidades de limitar la subida de temperatura a final de siglo por encima de los 2º-, el Banco Mundial¹ calcula que la producción de litio deberá incrementarse más de un 500% en 2050 respecto a la producción de 2018 para cubrir la demanda esperada. En la misma línea, según Benjamin Jones, la tasa de crecimiento anual compuesta de la demanda global de litio será de un extraordinario 18.5% anual hasta 2030, incrementándose posteriormente. Estos cálculos explican que en el año 2020 el litio haya sido incluido en la lista de materias primas fundamentales que publica todos los años la Unión Europea, y que sirve para orientar sus prioridades políticas.

El litio es un elemento abundante en la naturaleza, pero relativamente escaso con la tecnología de explotación que hoy es comercialmente viable, lo que concentra los yacimientos productivos o bien en salares o bien en minerales de roca; dos formaciones geológicas que están especialmente muy localizadas. Esta situación facilita mercados globales oligopólicos, como ocurre en el caso del petróleo. Aunque su cuota de mercado es sustancialmente menor, tres países iberoamericanos -Argentina, Bolivia y Chile- reúnen casi el 60% de los recursos globales de litio actualmente conocidos. Es lo que se ha denominado el “triángulo del litio”: un imaginario geográfico poderoso como producto de marketing que, a su vez, ha despertado el rechazo de movimientos comunitarios y ecologistas por sus connotaciones extractivistas.

El hidrógeno es el elemento químico más común del universo que, a temperatura ambiente y presión normal, aparece como un gas combustible con una alta densidad energética, incluso superior a la de los combustibles fósiles. El problema es que, de manera espontánea, no se encuentra libre sino que debe ser generado separando los átomos de hidrógeno de otros átomos con los que forma compuestos químicos. Este es un proceso que requiere un aporte de energía externa. Por lo que el hidrógeno, más que una fuente energética, debe ser considerado un vector

1. Banco Mundial (2020) “Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition”.

energético o un modo de almacenamiento energético en forma química. No obstante, se le ha asignado un papel sustancial en una economía descarbonizada.

En los últimos diez años, hemos asistido a un reajuste de las expectativas respecto al papel que ambas formas de almacenamiento deben jugar en un futuro. De los planteamientos triunfalistas sobre el hidrógeno popularizados en la obra de Jeremy Rifkin,² que se materializaron en el año 2007 en una declaración del Parlamento Europeo sobre *El establecimiento de una economía verde basada en el hidrógeno y una tercera revolución industrial en Europa*, hemos basculado hacia proyecciones de una matriz energética sostenible mayoritariamente basada en el almacenamiento electroquímico (baterías) y el almacenamiento de energía mecánica potencial (bombeo hidroeléctrico). Hoy existe cierto consenso en que el hidrógeno debe ser más complemento que base del futuro sistema energético descarbonizado.

Con todo, este rol complementario se antoja cualitativamente estratégico porque se espera del hidrógeno que pueda ofrecer alternativas solventes en los sectores de difícil electrificación. Las modernas renovables, como la eólica y la fotovoltaica, nos proporcionan energía en forma de electricidad. Pero la maquinaria pesada con movilidad autónoma que hoy es alimentada por motores de combustión (camiones mineros, barcos, aviones, excavadoras, tractores, etc) presenta una relación entre peso, potencia y distancia a recorrer que, a este nivel de desarrollo tecnológico, hace poco viable la implantación de baterías eléctricas como sucede con los vehículos más ligeros. Además, el hidrógeno puede funcionar sustituyendo al gas natural como materia prima de diversos procesos industriales (siderurgia, materia prima para la producción de fertilizantes, refinería). Movilidad pesada y procesos industriales conforman el grueso de los sectores cuyas emisiones, según un estudio publicado en la revista *Science* en el año 2014, son consideradas de difícil eliminación y equivalían, además, a un tercio de las emisiones de ese año.

En la variada tipología del hidrógeno (marrón, gris, verde, azul, turquesa), el hidrógeno verde es aquel en el que este elemento se obtiene mediante un proceso de electrólisis, que divide moléculas de agua mediante electrolizadores que funcionan con electricidad que debe tener un origen renovable. El hidrógeno así obtenido puede después ser empleado de forma muy versátil: además del almacenamiento de electricidad también puede ser usado en el transporte mediante pilas de combustible o directamente quemado en combustión directa sustituyendo al gas natural.

Si las expectativas de descarbonización comprometidas en el Acuerdo de París se cumplen, durante las próximas décadas la transición energética correrá en paralelo a una

progresiva penetración del hidrógeno verde y las baterías de ion de litio en nuestra vida cotidiana. Visto desde el ángulo del consumo, litio e hidrógeno verde son ingredientes de una oleada tecnológica de alcance universal que impondrá en todas las economías modernas un proceso de ajuste tanto en el plano técnico (con el despliegue de una red de nuevas infraestructuras) como en el normativo-regulatorio. Pero si ambas tecnologías han despertado un creciente interés en el ámbito iberoamericano es por las posibilidades ofrecidas a las naciones de la región para convertirse en actores globales relevantes también en el campo de la producción.

Tanto en el caso del litio como en el hidrógeno verde nos encontramos en el umbral de dos booms tecnoc-económicos de gran alcance. Sus fuerzas impulsoras son la materialización de la lucha contra el cambio climático en las estrategias industriales oficiales de los grandes centros económicos del mundo (EEUU, China y Asia-Pacífico, la UE) y los imperativos de diversificación energética que impone el haber entrado en una era de alta inestabilidad geopolítica. El bucle de retroalimentación se refuerza con las crecientes oportunidades de negocio asociadas a estos sectores, que ya movilizan un volumen de inversión sustancial y se están convirtiendo en yacimientos de empleo prometedores. En definitiva, litio e hidrógeno verde comparten las dinámicas propias de mercados globales en formación, relativamente consolidado en el caso del litio, todavía inmaduro en el caso del hidrógeno, y favorecidos por una promesa de expansión fuerte asociada a un compromiso público firme (la lucha contra el cambio climático). Un marco emergente en el que las políticas públicas adecuadas pueden llevar a posicionamientos de éxito en los diferentes eslabones de la cadena de valor de estos mercados, bajo la premisa histórica de que las primacías adquiridas en las etapas de nacimiento de un mercado cristalizan después en ventajas comparativas sólidas y relativamente irreversibles.

Esto explica que en el entorno intelectual de estas dos tecnologías se haya instalado un ambiente competitivo sobre una percepción de ventana de oportunidad transitoria. De ahí la premura de muchas naciones por publicar hojas de ruta y estrategias oficiales de hidrógeno verde, que han proliferado espectacularmente en los últimos tres años. El *World Energy Council* informa que en mayo de 2021 doce países (entre ellos Chile, España y Portugal) así como la Unión Europea habían publicado sus estrategias nacionales de hidrógeno, nueve de ellas en el año 2020. Diecinueve países más cuentan con estrategias en fase de preparación (entre ellos Brasil, Colombia y Uruguay). Y otras siete naciones de iberoamericanas (Argentina, Bolivia, Costa Rica, México, Panamá, Paraguay y Perú) estaban desarrollando debates institucionales encaminados a elaborar una estrategia oficial.

El clima de ventana de oportunidad transitoria también explica la importancia política que ha adquirido el debate sobre el litio en los países con mayores reservas, en los que uno de los argumentos centrales es no perder la carrera frente a otros competidores globales. Como en todo proceso socioeconómico, esta atmósfera de pugna entre naciones

2. Rifkin, J (2002), *La Economía del Hidrógeno*, Paidós, Barcelona.

tiene resultados ambiguos: está siendo un estímulo tanto para la inversión como la innovación, y ha contribuido al alineamiento de muchos gobiernos con los objetivos macro de una política climática decidida. Pero al mismo tiempo la rivalidad nacional puede conllevar la externalización de daños e impactos sociales y ambientales en la disputa por abaratar costes. Y como veremos, ni los impactos sociales ni los ambientales de estas dos tecnologías emergentes son irrelevantes.

1.2. Complejizando el debate: de las barreras técnicas a los dilemas sociopolíticos

Casi toda la literatura especializada coincide en que tanto el litio como el hidrógeno verde son dos tecnologías muy prometedoras cuya plenitud está condicionada por toda una serie de barreras de índole técnica. Por barrera técnica entendemos aquí problemas cuya formulación, en principio, carece de dimensión normativa e ideológica. Y cuya resolución no presupone conflictos sociales y políticos por el reparto de la renta, poder o reconocimiento, ni tampoco fricciones entre perspectivas morales o culturales incompatibles.

En el caso del litio, la gran barrera técnica tiene que ver con las complejidades inherentes al crecimiento proyectado del sector, que es inmenso, frente a la oferta que es razonable esperar dado el estado actual de desarrollo de los proyectos mineros. Según Benjamin Jones, en el triángulo del litio latinoamericano “la capacidad existente no es capaz de satisfacer la demanda de las proyecciones del mercado a medio y largo plazo. Debido a esto, para 2024 se espera que el 58% de la oferta provenga de operaciones existentes, y sólo un tercio de la oferta global corresponderá a operaciones existentes hacia 2030”. En otras palabras, hacia 2030 dos tercios del litio que se espera que suministren los países del triángulo depende de proyectos que hoy no están en marcha y cuyo estatus clasifica entre probable, posible y especulativo. También existe una creencia fundada en que los procedimientos de obtención de litio a partir de salmuera, que son los propios del triángulo del litio latinoamericano, terminarán perdiendo la carrera de costos frente al litio obtenido de roca que ya están explotando países como Australia. De fondo sobrevuela cierta incertidumbre tecnológica respecto a la posibilidad de que, a corto o medio plazo, nuevos avances en el campo de las baterías conviertan el modelo ion-litio en algo obsoleto. Aunque, de momento, estas son especulaciones técnicas sin respaldo comercial.

En el hidrógeno verde la gran barrera técnica es que se trata de una tecnología que no está suficientemente madura. Su precio no es aún competitivo frente a otras formas de suministro energético, lo que eleva los riesgos de las apuestas inversoras, como admite el *World Energy Council*. Un parte de esta falta de competitividad responde a imperativos termodinámicos: generar hidrógeno mediante electrólisis es un proceso energéticamente muy ineficiente (en el que se pierde entre un 70 y un 75% de la energía empleada) por lo que requiere un contexto envolvente de energía renovable eléctrica muy barata. Con todo, existen

márgenes de mejora técnica y económica importantes. Pero ninguna estrategia nacional reconoce al hidrógeno un papel masivo antes del año 2030. Y todas ellas admiten que el despliegue de esta tecnología no puede dejarse en manos del mercado. Cerrar la brecha de precios del hidrógeno verde frente a otros vectores energéticos exige un apoyo público decidido en forma de incentivos fiscales, subvenciones, consorcios público-privados o políticas industriales orientadas a conformar *hubs* y valles del hidrógeno. Esto es, espacios de convergencia empresarial en enclaves geográficos diseñados para concentrar nuevas infraestructuras y facilitar la integración de proyectos piloto.

De modo más concreto, entre las barreras técnicas que recoge la literatura especializada para ambas tecnologías podemos encontrar fundamentalmente obstáculos de dos tipos: los déficits regulatorios y los déficits en materia de I+D+I innovación, estos últimos especialmente acentuados en el caso de los países latinoamericanos. Ambos están muy presentes en los debates sobre el futuro del litio y del hidrógeno verde. Más adelante se recogerá un resumen de los déficits regulatorios y de I+D que aparecen de modo más recurrente en los análisis de los expertos, pero en este punto nos interesa ampliar la mirada y señalar algo que también ha sido profusamente estudiado en la literatura especializada: las limitaciones y los sesgos de un enfoque tecnocrático de la transición energética.

Este es un enfoque circunscrito a pensar sus debilidades y fortalezas en clave de barreras y soluciones técnicas. Uno de los retos más importantes para que nuestras decisiones colectivas sobre la transición energética estén bien fundamentadas es no soslayar la complejidad de la misma en la medida en que lo técnico está indefectiblemente atravesado, e incluso definido, por dilemas sociopolíticos.

Es de prever que la hipotética resolución de algunas de las barreras técnicas antes mencionadas facilitaría el despliegue de las dos tecnologías estudiadas, litio e hidrógeno verde, al ritmo de los escenarios más optimistas que hoy se manejan. Pero si complejizamos el debate más allá de esta visión tecnocrática nos topamos con desafíos de índole sociopolítica que no deben ser minusvalorados. Por ejemplo, estos despliegues tecnológicos se van a materializar en un fuerte ciclo de construcción de infraestructuras con un enorme potencial para generar impactos de diversa naturaleza. Estos impactos deben tenerse en consideración no sólo porque tendrán capacidad de afectar la viabilidad del proceso, sino sobre todo porque subyacen en ellos implicaciones profundas, en diferentes escalas (de lo comunitario a lo nacional) para el conjunto de los países impulsores. Por lo que deben formar parte de la deliberación democrática que se dé en sus sociedades.

Los más evidentes de estos impactos son los ambientales, que siempre presentan una continuidad con impactos sociales de diverso tipo, siendo más pertinente emplear la categoría de impacto socioambiental. El caso de la minería de litio en salares resulta paradigmático, pues la explotación de la salmuera implica un importante consumo de agua en una de las regiones más áridas del planeta y afectadas, de un modo creciente, por problemas de sequía

derivados de la crisis climática. La consecuencia de la minería en el triángulo del litio, según sus críticos, es un desbalance hídrico en el ecosistema alrededor del salar, como ha sido reconocido por la Comisión Nacional del Litio de Chile. Este desequilibrio tiene graves afecciones en el plano de la biodiversidad. Pero también en el antropológico-económico, al agotar las bases materiales de las actividades productivas tradicionales de las comunidades que habitan el salar, como un modelo agropastoril en el que se hace un aprovechamiento muy eficiente de un agua escasa que está basado en el conocimiento ecológico local.

Los impactos socioambientales negativos de los planes de expansión del hidrógeno verde también están despertando una creciente preocupación entre expertos y movimientos ecologistas y comunitarios. Incluyen por supuesto la construcción de infraestructuras de transporte y almacenamiento, así como terminales portuarias para la exportación. Pero sobre todo el hidrógeno verde tiene implicaciones en la expansión de macroproyectos renovables (y de líneas de alta tensión). Que además estarán motivados por la exportación de una energía en un formato que resulta relativamente ineficiente. En otras palabras: para que un país pueda convertirse en un proveedor a gran escala del futuro mercado global de hidrógeno verde deberá desarrollar una planta de renovables sobredimensionada respecto a su demanda interna de electricidad. Con lo que ello tiene de sobredimensión de sus impactos asociados. Entre otros, ocupación de espacio y competencia con otros usos del suelo –como el agrícola–; fragmentación de ecosistemas y afecciones a la biodiversidad tanto por los proyectos en sí como por el trazado de nuevas líneas de alta tensión; incremento sustancial de la demanda de minerales escasos que requieren los modernos dispositivos de energía renovable (impulsando nueva minería a lo largo del globo); incremento sustancial de la demanda de materiales convencionales cuyos procesos de fabricación siguen asociados a dinámicas muy contaminantes, como el cemento o el acero.

Existe también debate sobre el consumo de agua que puede implicar el hidrógeno verde, especialmente en países con un fuerte estrés hídrico. Aunque no contamos con un consenso cerrado, en la literatura científica tiende a predominar la idea de que un despliegue masivo de la electrólisis supondría un impacto relativamente neutro en los recursos hídricos mundiales. En parte por emplear agua de mar desalinizada o aguas residuales depuradas. Pero sobre todo porque el agua consumida se compensaría reduciendo sustancialmente los recursos hídricos que hoy requiere la matriz fósil, como por ejemplo el agua que consumen las centrales térmicas. Lo que no impide que una implantación mal planificada de la producción de hidrógeno verde no pueda derivar en una presión hídrica excesiva en algunos enclaves geográficos concretos.

El intento de catalogar a los macroproyectos renovables como nuevas “zonas de sacrificio”, según un término de difícil definición pero muy popularizado por los movimientos de justicia ambiental de las últimas décadas, puede sonar exagerado. Los daños para la salud pública de una termoeléctrica frente a lo inocuo, en este sentido, de un

campo de aerogeneradores los vuelve fenómenos que no se dejan unificar bajo esta categoría. Pero el tipo de fricción social y política que ambas infraestructuras pueden generar nos sitúa ante dilemas que, desde la perspectiva de los decisores de políticas públicas, puede demostrar un cierto parecido de familia.

En definitiva, esta dimensión de conflictividad socioambiental latente en la implantación de las tecnologías del litio y el hidrógeno verde empuja, por sí sola, a ampliar la reflexión más allá de los enfoques tecnocráticos para situarnos en el terreno de los dilemas sociopolíticos. ¿Cómo compatibilizar la extracción minera del litio con las afecciones a los ecosistemas de los salares y a las comunidades que los habitan? ¿Sobre qué criterios de participación y legitimidad, y desde qué escala de valores, se van a efectuar los cálculos para sopesar los beneficios y los perjuicios de los futuros planes de implantación de energía renovable condicionados por las estrategias de exportación de hidrógeno verde? Se trata de preguntas que no son exclusivas del litio ni del hidrógeno, ni atañen solo a comunidades nativas, pues las percepciones de que las externalidades negativas de los procesos de desarrollo se concentran en geografías sociológicamente agraviadas (mundo rural, periferias metropolitanas, provincias o Estados económicamente rezagados) está muy extendida. En no pocas ocasiones, es una percepción justificada.

Pero estos debates no se dan sobre una tabula rasa histórica, sino sobre una herencia de tensiones sociales y problemas políticos no resueltos alrededor de la explotación de recursos naturales, la exportación de materias primas y las oportunidades y riesgos que subyacen a estos fenómenos económicos. Algo que además en el marco de las naciones iberoamericanas, especialmente en América Latina, cuenta con una larga tradición de reflexión e investigación. ¿El litio o el hidrógeno deben aprovecharse mediante estrategias extractivistas, orientadas a consolidar un mercado de exportación competitivo que permita el acaparamiento de rentas por parte del Estado, o mediante estrategias industrialistas orientadas a desarrollar tecnologías propias y eslabonamientos productivos innovadores en otras fases de la cadena de valor? ¿Es posible escapar a la “maldición de los recursos naturales”, según el concepto que popularizó Richard Auty, o estos funcionan siempre como un mecanismo de refuerzo de la dependencia a través de la volatilidad del precio de las materias primas y sus perturbaciones asociadas, el fomento de élites rentistas y el incentivo a la corrupción gubernamental?

Este tipo de preguntas son inseparables de las condiciones de juego impuestas por realidades con una larga sedimentación histórica, como las divergencias entre los llamados países centrales y periféricos (brecha tecnológica, deuda ecológica), el reparto de protagonismo económico entre Estado y mercado, la cohesión institucional de los diferentes Estados o los mecanismos de redistribución de riqueza que imperan en cada nación. Todo ello debe, al menos, ser tenido en consideración como interpelaciones reflexivas importantes al pensar en el futuro del litio y del hidrógeno verde y las políticas públicas que deben construir dicho futuro.

Debe ser considerado también que las emisiones de CO₂ son una de las dimensiones de la crisis socioecológica en curso, seguramente la más urgente, pero no la única. Asimismo, las estrategias de mitigación de las emisiones de CO₂ deben ser ponderadas con los agravamientos que estas puedan provocar en otros ámbitos igualmente preocupantes de nuestros límites planetarios sobrepasados, como la destrucción de biodiversidad.

Reducir todo este conjunto de dilemas sociopolíticos, con fuertes interpelaciones normativas, a una serie de barreras u obstáculos exclusivamente técnicos conduce, al mismo tiempo, a tres consecuencias indeseables: i) una merma en la capacidad de pensar estratégicamente los riesgos y oportunidades de estas tecnologías; ii) un empobrecimiento de la deliberación democrática que nuestras sociedades deben protagonizar al respecto y iii) un diseño de políticas públicas con riesgo de aunar lo ineficaz y lo ilegítimo.

1.3. Desafíos abiertos para las políticas públicas del litio y el hidrógeno verde

La transición energética hacia la descarbonización va a impulsar una expansión sin precedentes de alguna de sus tecnologías complementarias. Es previsible que esto suceda con las baterías de ion de litio orientadas a la electromovilidad. También con la producción y consumo de hidrógeno verde. Lo que se traducirá en fuertes flujos de inversión para la creación de las nuevas infraestructuras necesarias. Así como un crecimiento exponencial de desarrollos industriales y emprendimientos empresariales asociados a los diferentes eslabones de la cadena de valor de ambas tecnologías. Todo esto debe ser vertebrado y orientado por políticas públicas coherentes y bien diseñadas. La oportunidad económica es notable para aquellos países con condiciones favorables, como los son un buen número de naciones iberoamericanas. Lo que ya ha sido detectado y está siendo pertinentemente incorporado a diversos documentos con lineamientos estratégicos.

Pero enfrentar esta gran reforma energético-industrial en ciernes con políticas públicas orientadas exclusivamente a aprovechar lo que en ella habrá de boom techno-económico, esto es, como un mero ciclo de acumulación, supone un error por partida doble. En primer lugar, obstaculiza incorporar en el diseño y la implementación de estas políticas públicas dimensiones de corte ecológico, sociológico, cultural y político que condicionarán su éxito o su fracaso, y sobre las que conviene reflexionar preventivamente. Ante un proceso con tantas aristas y fricciones potenciales, el reduccionismo económico supone un billete asegurado en una simplicidad que puede derivar en incompetencia.

En segundo lugar, una perspectiva económica estrecha impide desplegar esa mirada más trascendente, una mirada de proyecto de país, que sin embargo la transición energética facilita. Muchos investigadores han argumentado con sólidas razones que el paso de los combustibles fósiles a las energías renovables y sus diferentes ramificaciones supone una revolución tecnológica integral que permeará

en todos y cada uno de los aspectos de la vida moderna. Puede ser un proceso que remueva patrones consolidados en las estructuras socioeconómicas y geopolíticas heredadas y que ofrece oportunidades históricas para que países y regiones enteras realicen saltos de escala y reorienten sus modelos de desarrollo.

Se exponen a continuación una serie de desafíos abiertos para pensar la expansión acelerada del litio y la irrupción inminente del hidrógeno verde en el entramado industrial de los estados iberoamericanos y algunas recomendaciones genéricas. Se hace desde un enfoque que, reconociendo la oportunidad económica que ambas tecnologías suponen, la enmarca en un análisis más integral sobre sus amenazas subyacentes. También se abordan de modo sucinto los dilemas sociopolíticos clásicos sobre la economía de los recursos naturales que el litio y el hidrógeno verde actualizan. Y se ofrecen algunas líneas de reflexión sobre cómo las respuestas a estos dilemas podrían suponer un impulso para redefinir los esquemas de desarrollo de los países iberoamericanos.

El desafío del consenso estratégico

Que la expansión global de la demanda del litio e hidrógeno verde suponga una oportunidad para los potenciales países productores, y que estos sepan aprovecharla con políticas públicas cuyos impactos negativos no eclipsen a los positivos, no es algo asegurado. Depende, en primer lugar, de la capacidad de las diferentes naciones de consolidar una visión de futuro que construya grandes consensos alrededor de una apuesta estratégica y equilibrada por estos recursos. Lo que requiere una elevada participación de todos los actores en el proceso de diseño de las diferentes hojas de ruta, con el fin de pulir desavenencias y ofrecer un esquema en el que todos perciban ganancias potenciales. A su vez, y con el fin de asegurar un horizonte de estabilidad, a pesar de las discrepancias ideológicas que estos procesos van a despertar, merece la pena explorar la posibilidad de alcanzar pactos de Estado que permitan blindar acuerdos mínimos. Aunque su desarrollo e implementación se vea condicionado por los vaivenes de la competencia electoral.

El desafío regulatorio

Las normativas armonizadas son un reto prioritario de los sectores emergentes vinculados con la transición energética ecológica. En el caso del hidrógeno verde, resulta especialmente urgente avanzar hacia la consolidación de certificaciones y garantías en origen que sean compatibles con los mercados de exportación a los que se aspira a proveer. Otro eslabón importante en el caso del hidrógeno son los códigos de seguridad homologados que rijan para todas las fases de la industria. Existe también cierto consenso en que ambas tecnologías se beneficiarían del establecimiento en todos los países iberoamericanos de un precio al carbono, como ha efectuado la Unión Europea, lanzando así una señal económica de largo plazo que facilitaría la predisposición de los mercados hacia la descarbonización. Finalmente, debe señalarse la idoneidad de avanzar hacia marcos regulatorios exigentes en materia

de transparencia, que incentiven la auditoría pública y ciudadana de dos sectores productivos con un potencial importante para generar impactos socioambientales y hostilidad entre las comunidades directamente afectadas.

El desafío técnico-científico

El litio como el hidrógeno verde son tecnologías situadas en un contexto de maduración que las vuelve especialmente receptivas a que los esfuerzos en I+D e innovación tengan impactos con aplicación comercial en tiempos relativamente rápidos. El margen de mejora en diversos aspectos técnicos de estas industrias es alto, el mercado está asegurado por directrices políticas firmes y el flujo inversor es creciente. Sin embargo, organismos como la AIE señalan que los déficits de América Latina en recursos científicos públicos pueden suponer un lastre para abordar esta tarea. Ante este obstáculo, se abren diversas opciones. Una vía, ya experimentada para el caso del litio en los modelos de gobernanza establecidos en Bolivia y Chile, es dirigir algunos porcentajes de la inversión internacional a la financiación de los sistemas nacionales de ciencia y tecnología. El efecto de estas políticas ha sido limitado, aunque aún es históricamente pronto para evaluarlas con seriedad. Otra opción, la favorita de las recomendaciones internacionales, es fomentar la colaboración científica y técnica regional para compartir recursos, acelerar el aprendizaje y aprovechar las sinergias entre los sistemas de ciencia. Una estrategia que es perfectamente incrementable en la función institucional de la Organización de Estados Iberoamericanos, y en el que la organización puede desempeñar un liderazgo significativo.

46

A esta llamada a la colaboración científica internacional se pueden añadir dos recomendaciones. La primera, una ampliación del concepto más convencional de I+D, hoy dominado por un fuerte cariz técnico-ingenieril, para incluir en él, con dotaciones presupuestarias no anecdóticas, investigaciones en el ámbito de las ciencias sociales. Estas permitirán analizar con solvencia las dimensiones sociopolíticas que envuelven y condicionan la implantación de estas nuevas industrias, atemperando conflictos y mejorando la calidad democrática del proceso. La segunda recomendación es prestar atención específica a dos cuellos de botella que, de modo recurrente, están torpedeando los procesos de transición ecológica en diversos lugares del mundo: un sistema de formación profesional obsoleto y la falta de capacitación en los retos de la descarbonización de los funcionarios de la administración pública.

El desafío de la paz social y la cooperación comunitaria

Tanto la minería de litio como la producción y almacenamiento de hidrógeno verde son dos industrias susceptibles de generar conflictividad socioambiental en las comunidades afectadas. Los derechos políticos, sociales y culturales mercedamente conquistados por estas comunidades, así como la creciente sensibilidad social sobre cuestiones de justicia ambiental, nos sitúa en un contexto histórico mucho menos tolerante ante formas de abuso extractivista.

Hoy existe un marco jurídico de obligado cumplimiento para la regulación de las relaciones entre las empresas (y las administraciones) promotoras de grandes proyectos, como los mineros o los energéticos, y las poblaciones locales de los territorios afectados. El ejemplo más paradigmático es el caso de los pueblos originarios y el Convenio 169 de la OIT. El reto es asegurar el cumplimiento de este paquete jurídico avanzando hacia una superación de los modos tradicionales de integración de las comunidades en estos proyectos, que han sido muy problemáticos. Unas formas de integración que han estado, en no pocos casos, más cerca de la subordinación o la cooptación que de la participación igualitaria. Y que se han basado en mecanismos como la vinculación laboral preferente de las poblaciones afectadas, o en ejercicios de responsabilidad social corporativa muy modestos en su compromiso financiero real por parte de las empresas promotoras.

Es necesario pasar de la retórica del valor compartido a los beneficios concretos sustentados en hechos contrastables. Todo ello en un marco de respeto a los parámetros de la diversidad cultural y aceptación de los enfoques ontológicos, epistemológicos y éticos que porten las comunidades locales. Al respecto, dos vías teóricas que conviene explorar si aspiramos a construir un camino bidireccional de colaboración mutuamente beneficiosa entre comunidades y proyectos, aunque su puesta en práctica exija innovaciones jurídicas y políticas que todavía presenten incertidumbres: i) abrir la propiedad del proyecto a la comunidad afectada, ofreciendo influencia en su dirección empresarial y participación en sus beneficios económicos potenciales, y ii) institucionalizar canales de diálogo transparentes, efectivos y vinculantes arbitrados por mecanismos de mediación cultural.

El desafío redistributivo

Tecnologías como el hidrógeno verde o el litio conforman industrias vinculadas con la economía global, generadoras de divisas y basadas en la extracción y exportación de recursos naturales de alto valor. Estos recursos son susceptibles de ser conceptualizados como elementos estratégicos del patrimonio nacional, subordinando su explotación al servicio del interés general de un país a través de la apropiación estatal de un porcentaje de las rentas que generen. Por ello, tanto el hidrógeno verde como el litio suponen una importante oportunidad redistributiva para países con déficits importantes en materia de desarrollo social. Y allí donde se exploten masivamente están llamados a jugar un papel clave en los debates sobre la consecución de un reparto más equitativo de la riqueza. Este es un asunto muy politizado, en el que las posiciones ideológicas de cada gobierno, enmarcadas en las tradiciones de política económica de cada país, condicionarán un compromiso mayor o menor con la justicia social y los diferentes métodos para alcanzarla. Con todo, es importante considerar que avanzar en formas de transición energética justa es más que una opción moral entre otras. Es también una medida racional que demuestra sentido de Estado. Ante el problema climático, energético o ecológico la desigualdad actúa erosionando la cohesión necesaria para desplegar los grandes esfuerzos

colectivos que se nos requerirán. El Antropoceno nos sitúa un marco de época en el que los gobiernos necesitarán sistemáticamente un colchón de recursos muy amplio para proteger a los grupos más vulnerables frente al incremento de las coyunturas traumáticas. También frente a los efectos indeseados de la implementación de medidas necesarias y potencialmente impopulares. Las políticas públicas sobre hidrógeno verde o litio no pueden obviar la contribución que estas deben hacer a un mejor reparto de la misma prosperidad que están llamadas a generar.

El desafío industrialista

Las importantes expectativas económicas surgidas alrededor de la exportación de litio o hidrógeno verde han enganchado con uno de los debates económicos y sociopolíticos más idiosincráticos de América Latina: los problemas de la dependencia y la maldición que afecta a las naciones exportadoras de materias primas. Si bien la coincidencia histórica del último ciclo alcista de las *commodities* con gobiernos progresistas en la región reveló que la exportación de recursos naturales puede financiar importantes programas sociales, los impactos negativos de la bajada de precios de los recursos naturales volvió a demostrar las fragilidades inherentes a estos esquemas de inserción internacional. El temor a que el litio o el hidrógeno verde puedan suponer una reedición de estos movimientos pendulares al dictado del mercado internacional, cuyos efectos perturbadores son sobradamente conocidos en la región, ha despertado un cierto espíritu de cautela. Este conecta bien un clima intelectual de revalorización del papel de lo público alrededor de conceptos como los de Estado Emprendedor o Estado Promotor.

Por ello, las estrategias de los tres países que conforman el grueso del potencial litífero de los países iberoamericanos, Argentina, Bolivia y Chile, están enfocadas a la superación de la condición de extractores y exportadores de materias primas, buscando desarrollar capacidades tecnológicas propias que permitan albergar nuevos eslabonamientos productivos en la cadena del valor del litio. Con todo, el caso del litio ejemplifica bien los inmensos retos de la industrialización verde para muchas naciones de la región: la brecha tecnológica es alta y las barreras de entrada en los sectores más interesantes de la cadena de valor casi impenetrables. Diversos estudios consideran que intentar encadenar desarrollos de la cadena de valor hacia delante (fabricación de componentes, celdas o baterías) resulta imposible ante la distancia en competitividad que ya han logrado los actores asiáticos (Japón, Corea del Sur, China concentran el 87% del mercado de celdas o baterías). Por lo que recomiendan a los gobiernos del triángulo del litio que revisen sus estrategias para fomentar encadenamientos en la cadena de valor “hacia atrás”, por ejemplo, en la exploración y la extracción del recurso, tal y como han hecho con éxito países como Australia y Noruega con los combustibles fósiles. Los mismos dilemas sobre industrialización endógena comienzan a proliferar alrededor de las hojas de ruta del hidrógeno verde y la posibilidad de que su explotación sirva de trampolín, por ejemplo, para una industria nacional de electrolizadores.

El desafío de la gobernanza

Los desafíos anteriormente expuestos son expresiones específicas de un desafío más general respecto a qué modelos normativos o de gobernanza de recursos que pueden vertebrar estas industrias incipientes. La pregunta sobre la gobernanza nos conduce necesariamente a toda una amalgama de cuestiones que apuntan a aspectos absolutamente determinantes sobre las futuras políticas públicas del litio y el hidrógeno verde. Por ejemplo, nos remite al régimen de propiedad de los recursos, la modalidad de acceso a los mismos y los modos de extracción. También a la relación entre Estado, mercado y tercer sector. Al modelo de Estado, centralizado o federal, con su distribución de competencias. Al alcance de los actores públicos y de los privados y su capacidad de negociación. Al peso concedido a los mecanismos de planificación económica frente a los mecanismos de coordinación vía precios. Todo ello atravesado por una tensión entre priorizar enfoques de fortalecimiento de la soberanía económica nacional, enmarcado un discurso de nacionalismo de los recursos o enfoques más abiertos a facilitar la recepción de inversión extranjera inspirados en discursos de corte liberal.

De nuevo, se trata de preguntas clásicas en el debate económico y político sobre problemas que no tienen una única solución. Y cuyas respuestas estarán muy condicionadas a los compromisos ideológicos democráticamente legítimos de cada gobierno. En los que además siempre influye un factor de adaptación a los grandes consensos internacionales en materia de economía política. Lo reseñable, en este sentido, es que los ciclos del hidrógeno verde y el litio coinciden históricamente con un momento de revisión y replanteamiento del paradigma económico-político que ha primado durante las últimas cuatro décadas. Tres grandes eventos históricos han influido en esta revisión de las modas y las certezas económicas heredadas: i) la crisis financiera de 2008 y las lecciones extraídas de la gestión de sus fricciones sociales y política; ii) el parón económico forzoso de la pandemia; iii) el retorno sobrevenido por las preocupaciones de seguridad nacional a causa de la guerra en Europa.

La consecuencia es que ese proyecto de economía política -que muchas veces se etiqueta como neoliberalismo- es mucho más una teoría sobre el diseño del Estado que una teoría sobre los mercados como recuerda Quinn Slobodian, ha dejado de ser el marco de referencia predominante. Su devaluación teórica corre pareja a la experimentación de políticas públicas que rompen con la ortodoxia. Es indudable que las lecciones de la historia son concluyentes respecto a lo inviable de cualquier ilusión de eliminación completa de los mecanismos de mercado. Pero viéndolo en perspectiva, estamos asistiendo a un importante balanceo de esa relación Estado-iniciativa privada que es inherente a las economías modernas. El Estado, que nunca se fue, ya no es pensado sólo como un mero corrector de fallos del mercado, sino como un agente que debe ser protagonista en el nuevo momento económico. Categorías tales como política industrial están conociendo una importante rehabilitación intelectual. Y prosperan además perspectivas económicas pluralistas e innovadoras, que

abren espacio legítimo para formas de gestión comunal de los recursos. También cobran fuerza la idea de fortalecer tejidos empresariales de índole cooperativo vinculados a la economía social.

Por su naturaleza física, este desafío de la gobernanza se presenta con matices diferentes para el litio y para el hidrógeno verde. Pero ya no resulta evidente que una gobernanza con un peso fuerte del sector público en los diferentes momentos de la producción sea una opción anacrónica o un recurso transitorio que debiera retirarse cuando los mercados estén maduros y los precios sean competitivos. Dependerá de los contextos, de cada recurso, y de las coyunturas políticas. Como apuntaba Polanyi con lucidez en el año 1944, el ideal del mercado autorregulado ha demostrado ser una empresa utópica con efectos sociales y antropológicos tan autodestructivos como la utopía de la dirección económica completamente centralizada. En el siglo XXI, el eclecticismo económico se instala como un suelo de sabiduría política mínima. Y problematizar los alineamientos automáticos de las futuras políticas públicas de litio e hidrógeno verde con los parámetros del Consenso de Washington, cuya hegemonía está intelectualmente quebrada, se ha convertido en una discusión obligatoria que toda sociedad debe afrontar.

2. PRODUCIR CONOCIMIENTO PARA HACER FRENTE A LOS DESAFÍOS. EL PAPEL DE IBEROAMÉRICA EN LA INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

La resolución de todos los desafíos antes enumerados tiene algo en común; el conocimiento es clave. Y eso no sólo implica el acceso a la información científica de frontera o a tecnologías limpias y eficientes; tiene que ver también con la capacidad de tener un rol central en el desarrollo de ese conocimiento y esas tecnologías y poder adecuarlas a los contextos locales. Como se dijo, no se trata solamente de un desafío para la I+D en ciencias exactas e ingenierías, sino también para las ciencias sociales a la hora de encontrar soluciones para gestión económica de la transición, el desarrollo de políticas públicas adecuadas y la incorporación armónica de las comunidades locales afectadas por los cambios.

Monitorear el papel de Iberoamérica en la investigación y el desarrollo en los temas relacionados con el litio y el hidrógeno verde es crucial en esta etapa para la región.

2.1. Las huellas de la investigación y desarrollo

Si bien el conocimiento es de carácter intangible, su producción deja huellas que pueden ser medidas y analizadas. La capacidad de dar cuenta del estado del arte y de las tendencias en la investigación científica y el desarrollo tecnológico se enriquece cuando combina información cuantitativa y cualitativa. Así, es posible configurar un mapa de tendencias y relaciones, configurando un insumo de utilidad para la toma de decisiones y la prospectiva. Esas

huellas de la producción de conocimiento son, por ejemplo, las publicaciones científicas y las patentes industriales. En ese sentido, el análisis de la información contenida en las bases de datos bibliográficas y de patentes de invención resulta de particular importancia, ofreciendo las primeras un enfoque más orientado a la investigación y, las segundas, a la aplicación industrial. Este trabajo incluye a continuación un abordaje complementario de ambos dominios de información, habiéndose utilizado, por un lado, una de las principales bases de datos bibliográficas internacionales; SCOPUS y, por el otro, la base de patentes del Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PCT, según la sigla en inglés).

La dificultad inicial de un estudio de estas características recae en delimitar con claridad el objeto de estudio. Para este estudio se realizó una selección de documentos en torno a cuatro conjuntos: producción de hidrógeno, pilas de combustible, minería de litio y baterías de litio. De esta forma, se buscó cubrir la investigación en torno a la obtención de estos dos elementos como materia prima y de sus dos principales aplicaciones tecnológicas.

En el caso de las publicaciones, la búsqueda de documentos fue realizada sobre la base de datos del SCOPUS, que cuenta con una colección de alrededor de veinticinco mil revistas científicas de primer nivel, recopiladas con criterios de calidad y cobertura, que dan cuenta de la investigación en la corriente principal de la ciencia internacional. Se definieron una serie de palabras clave y se recuperaron aquellos registros que contenían al menos una de ellas en los campos de título, resumen o palabras clave. El listado completo de las palabras clave utilizadas se encuentra en el Anexo I de este documento.

Por otra parte, las patentes de invención son una fuente valiosa de información sobre el desarrollo de la ciencia, la tecnología y la innovación. Cada una de las partes que las componen (título, resumen, descripción, reivindicaciones, titular, inventor, fecha de presentación de la solicitud, fecha de concesión de la patente, país de otorgamiento y citas del arte previo) nos permite conocer un aspecto en particular de ese resultado de investigación protegido jurídicamente. Al igual que las publicaciones, las patentes tienen dos usos diferentes, más allá de la protección a la propiedad intelectual que brindan. Por un lado, al tratarse de un cúmulo tan enorme de información (actualmente hay más de cuarenta y siete millones de patentes en el mundo), la extracción de información puntual de los documentos sirve para favorecer la transferencia de tecnología y para facilitar la innovación en el sector productivo. Por otro lado, la construcción de indicadores a partir de los documentos de patentes permite observar las tendencias en el desarrollo tecnológico de diferentes campos, aprovechando la información estructurada en esos documentos, permitiendo poner el foco en distintos aspectos que van desde los campos de aplicación hasta la distribución geográfica de los titulares e inventores.

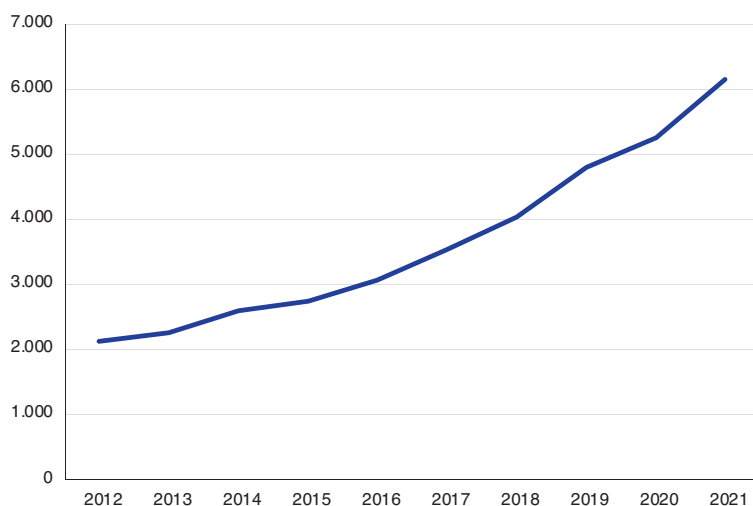
Existen distintas fuentes de información utilizadas habitualmente para la construcción de indicadores de patentes. De acuerdo a los intereses de cada estudio,

pueden seleccionarse las oficinas de propiedad industrial de uno o varios países simultáneamente. En este caso, el estudio se elaboró sobre la base de datos de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO, según su sigla en inglés), que contiene los documentos registrados mediante el Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PCT). El tratado PCT permite solicitar la patente por una invención de manera simultánea en distintos países miembros del tratado que el inventor selecciona de acuerdo a su criterio. Si bien la decisión de otorgar o no la patente recae en las oficinas de patentes de cada uno de los países, este mecanismo facilita enormemente la tramitación del registro en oficinas múltiples ya que las solicitudes que llegan mediante el convenio PCT no pueden ser rechazadas por cuestiones de forma en los países miembros. Asimismo, antes de ser enviada la solicitud a cada país se elabora una “búsqueda internacional” similar a la que realizan los examinadores de cada oficina. Este documento sirve tanto al titular para evaluar la patentabilidad de su invento como a los examinadores nacionales que ven así disminuido su trabajo.

La solicitud y el mantenimiento de patentes internacionales registradas mediante el tratado PCT son costosos en términos económicos y de gestión, por lo que sólo suelen registrarse allí los inventos con un potencial económico o estratégico importante. La selección de esta fuente se basó en ese criterio de calidad, apuntando a relevar con precisión los avances tecnológicos de punta a nivel mundial e iberoamericano. Por otra parte, con la utilización de una base de datos de estas características se facilita la comparabilidad internacional, que se vería seriamente dificultada en el caso de tomar alguna fuente nacional.

Para la selección del conjunto de patentes a analizar, se recurrió a la Clasificación Internacional de Patentes (IPC, según la sigla en inglés). Se trata de una serie de códigos, asignados por las oficinas de propiedad intelectual a cada documento, que se basan en los campos de aplicación de la invención patentada. El detalle de la definición está incluido en el Anexo I de este informe.

Gráfico 1. Publicaciones científicas mundiales sobre producción de hidrógeno



La extracción de datos y su análisis se realizó mediante la plataforma Intelligo,³ un explorador de información científica y tecnológica que permite realizar búsquedas en patentes y en documentos de acceso abierto, ofreciendo mapas conceptuales, indicadores básicos y acceso directo a los documentos a texto completo en su fuente original.

2.2. Investigación científica y desarrollo tecnológico en torno al hidrógeno verde en Iberoamérica

Como ya fue mencionado, la producción de hidrógeno verde en Iberoamérica es una nueva oportunidad para el desarrollo de la región. Sin embargo, no se trata sólo de tener un rol relevante en la producción de hidrógeno, como un nuevo *commodity*, sino también de aprovechar esa oportunidad para participar activamente en el desarrollo de tecnologías que agreguen valor a las ventajas naturales. En este terreno, el desarrollo de pilas de combustible o *fuel cells*, aparece como un campo promisorio. A continuación, se analizan las principales tendencias en la producción de conocimiento, mediante el análisis de publicaciones científicas, y en el desarrollo tecnológico, mediante patentes.

Producción de hidrógeno

Entre los diez años comprendidos entre 2012 y 2021 la producción científica sobre la obtención o producción de hidrógeno -ligado mayormente a un proceso de electrólisis basado en el uso de energías renovables- crece acompañando el interés global por el tema. A nivel mundial, se registraron en 2012 un total de 2.132 artículos en revistas indexadas en SCOPUS. Ese volumen creció un 188% en diez años, hasta alcanzar los 6.147 artículos en 2021 (**Gráfico 1**).

En la investigación sobre la producción de hidrógeno, el líder mundial es China, con 14.173 documentos acumulados en los diez años analizados en esta serie. El liderazgo chino no es sorprendente y se verifica en muchos campos de investigación. Sin embargo, en este caso su ventaja relativa es sumamente marcada; China participa en el 39% de los artículos publicados a nivel mundial. En segundo lugar aparece Estados Unidos, aunque con tan sólo 3.868 documentos en el decenio.

3. <http://explora-intelligo.info>

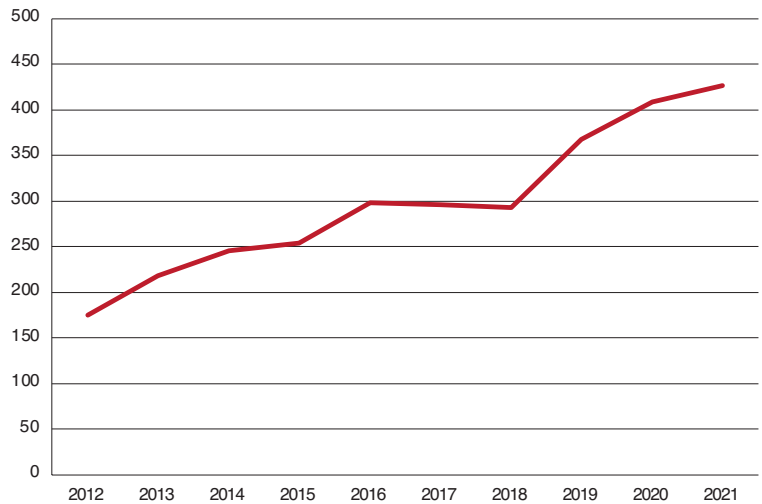
Es también muy relevante el papel de la India en esta temática, que con 2.232 artículos aparece en tercer lugar. Completan los cinco primeros puestos Corea del Sur, con 2.082 documentos, y Japón con 1.934. El primer país iberoamericano en cuanto a su producción científica en este tema es España, que aparece en el décimo puesto con 1.221. Es una posición consistente con la producción total mundial, donde España ocupa el puesto 11.

En ese contexto mundial, los países iberoamericanos registraron una producción total de 2.981 artículos en el mismo periodo. La tendencia fue al crecimiento de la cantidad anual de artículos, aunque con un llamativo estancamiento entre 2016 y 2018 (**Gráfico 2**).

Si bien no se trata de un volumen demasiado grande, representa el 8% de la producción mundial en este tema y es el mismo peso que tiene la región para el total de la base de datos, por lo que no se registra aquí ningún tipo de especialización. Además, esa participación en la literatura científica mundial relacionada con la producción de hidrógeno tuvo una tendencia decreciente.

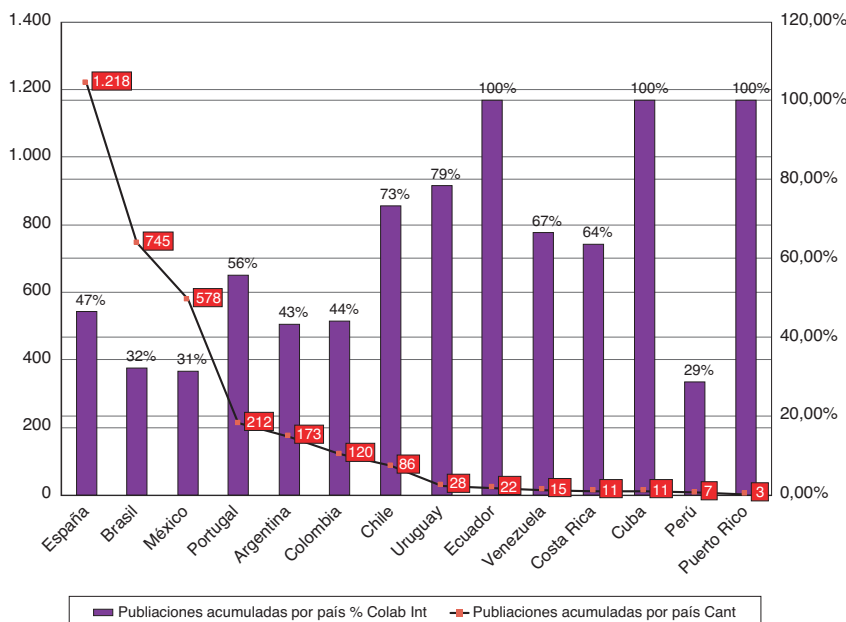
A lo largo del decenio analizado, el crecimiento de la producción científica iberoamericana fue del 143%; es decir, con una marcada alza aunque a un ritmo menor que el crecimiento de las publicaciones sobre la producción de hidrógeno a nivel mundial.

Gráfico 2. Publicaciones científicas iberoamericanas sobre producción de hidrógeno



Como se verifica habitualmente al analizar la ciencia y la tecnología en Iberoamérica, la distribución de capacidades es muy desigual. España se destaca, con 1.281 documentos acumulados entre 2012 y 2021, seguida de Brasil con algo más de la mitad de ese volumen y por México con 578. Más atrás aparecen Portugal, Argentina, Colombia y Chile. Llama la atención la baja producción de Chile en este terreno, a pesar de ser un país con gran potencial natural en la temática. Sin embargo, aparece en el séptimo lugar en la región, cuando en el total de la producción registrada en SCOPUS se ubica en el quinto puesto.

Gráfico 3. Publicaciones científicas sobre producción de hidrógeno y porcentaje de colaboración internacional (acumulado 2012-2021)



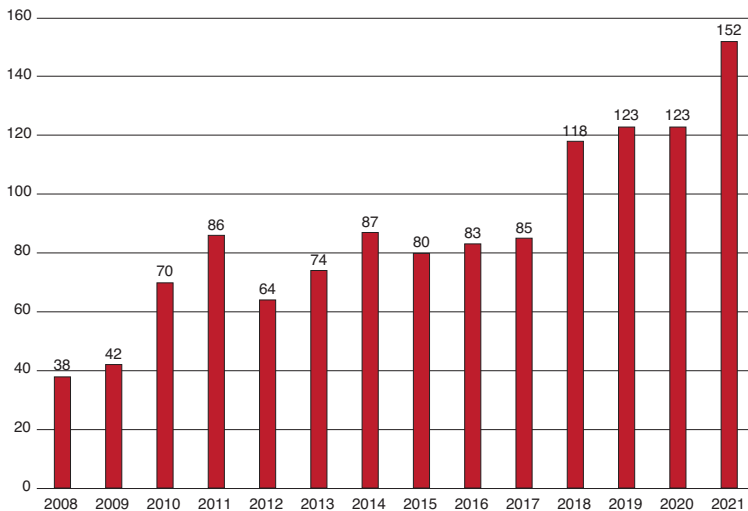
En un terreno tan promisorio en relación con su capacidad de revolucionar la transición energética en los próximos años, pero que a la vez tiene un volumen de investigación aún relativamente bajo, la colaboración internacional aparece como un factor clave para impulsar la frontera del conocimiento y generar masa crítica.

Los países iberoamericanos con mayor desarrollo relativo en esta temática son también los que menos tienden a colaborar internacionalmente. En el caso de España, el 46% de sus artículos fueron publicados en colaboración con autores de otros países del mundo. Brasil y México tienen valores algo menores, que rondan el 32%. Portugal tiene un patrón más parecido al de España, con un 55% de colaboración internacional, lo que puede resultar consistente con

Gráfico 4. Red iberoamericana de colaboración científica en la producción de hidrógeno



Gráfico 5. Patentes PCT asociadas a la electrólisis para la producción de hidrógeno por año de solicitud.



las dinámicas de investigación de la Unión Europea. Los latinoamericanos restantes con más de 100 artículos acumulados en el periodo, Argentina y Colombia, rondan el 44% de colaboración internacional.

Sin embargo, para analizar la existencia de un espacio colaborativo de investigación sobre la producción de hidrógeno en Iberoamérica se ha construido una red a partir de la firma conjunta de artículos por parte de autores de los distintos países de la región (**Gráfico 4**). Los lazos dan cuenta de esos vínculos de coautoría, que se incrementan en grosor en relación con la cantidad de artículos firmados conjuntamente. El tamaño de los nodos está dado por la cantidad de artículos acumulados por cada país en el periodo 2012-2021.

El resultado es una red en la que 12 de los 14 países iberoamericanos con publicaciones en este tema se encuentran conectados a la red. Las excepciones son Perú y Costa Rica. Entre los países conectados se destacan España, Brasil y México, no sólo por su volumen sino también por la cantidad de vínculos que establecen. Sin embargo, la colaboración iberoamericana no es de gran magnitud para estos países, ya que sólo el 10% de sus publicaciones presenta colaboración intrarregional. La copublicación regional es más importante para los países de desarrollo medio, como Argentina, Colombia y Chile, en los que se aproxima al 30%.

Para los países de menor desarrollo relativo en esta temática, la cooperación iberoamericana resulta clave. Por ejemplo, si bien tienen menos de 30 artículos acumulados en este periodo, Uruguay cuenta con el 75% de sus artículos firmados junto a otros autores de la región, mientras que en el caso de Cuba supera el 80%. En conjunto, se trata de una red medianamente conectada, en la que se producen el 27% de las conexiones posibles entre los 14 países activos en esta temática.

En el terreno del desarrollo tecnológico, es posible analizar las patentes registradas mediante el convenio PCT de la OMPI y asociadas con la electrólisis para la producción de hidrógeno. En este caso, dado que el volumen de documentos es menor, se han tomado las patentes solicitadas entre 2008 y 2021.

En total, se han identificado 1.225 registros de patente a nivel mundial, con una tendencia creciente, sobre todo a partir de 2018. En 2008 se solicitaron tan sólo 38 patentes relacionadas, mientras que en 2021 el número ascendió a 152 (**Gráfico 5**).

La titularidad de las patentes en esta temática está concentrada en países líderes a nivel mundial en desarrollo tecnológico y, razonablemente, comparte algunos de los rasgos vistos en la producción de artículos científicos. Japón y Estados Unidos lideran el ranking mundial con 279 y 227 patentes cada uno. Luego aparece Alemania, acumulando entre los tres primeros países el 50% de las patentes totales (**Gráfico 6**).

Completan el ranking de los cinco países con mayor titularidad de patentes Corea del Sur y China, aunque ambos por detrás de la posición que ostentan en el ranking de publicaciones. Entre los primeros 15 titulares de patentes, España es el único país de Iberoamérica.

El nivel de patentamiento en la región iberoamericana es mucho menor, alcanzando un total de 31 patentes PCT solicitadas en relación con la producción de hidrógeno entre 2008 y 2021. Entre ellas, España figura como titular en 18, Brasil en 4, México en 3, Portugal en 2 y Chile, Colombia y Costa Rica en una.

Pilas de combustible de hidrógeno

Entre 2012 y 2021, la investigación para el desarrollo de pilas de combustible de hidrógeno se mantuvo en expansión. En volumen, se trata de un área mucho mayor que la de la producción de hidrógeno, acumulando más del doble de artículos en SCOPUS, con un total de 87.818 artículos. Su crecimiento, sin embargo, fue mucho más moderado, alcanzando un 45% entre las puntas de la serie analizada (**Gráfico 7**).

En este terreno, los países de mayor producción científica son los mismos que en la producción de hidrógeno, dando cuenta de un desarrollo consistente a lo largo de la cadena de desarrollo del hidrógeno como clave para la transición energética. China lidera con 24.982 artículos acumulados, aunque su distancia con Estados Unidos, en el segundo lugar con 13.446, es menos importante en comparación con lo visto para la producción de hidrógeno. Completan la lista de los cinco países más productivos la India, Corea del Sur y Japón, con una producción acumulada que ronda los seis mil documentos en el decenio analizado.

La producción iberoamericana resulta mayor en volumen que la de producción de hidrógeno, aunque en términos relativos su papel a nivel mundial es menor. La región acumuló 5.309 artículos publicados en SCOPUS en el periodo analizado. Se trata de un 6% de la producción mundial; dos puntos porcentuales por debajo de su participación total en esa base de datos

Gráfico 6. Patentes PCT asociadas a la electrólisis para la producción de hidrógeno por país del solicitante

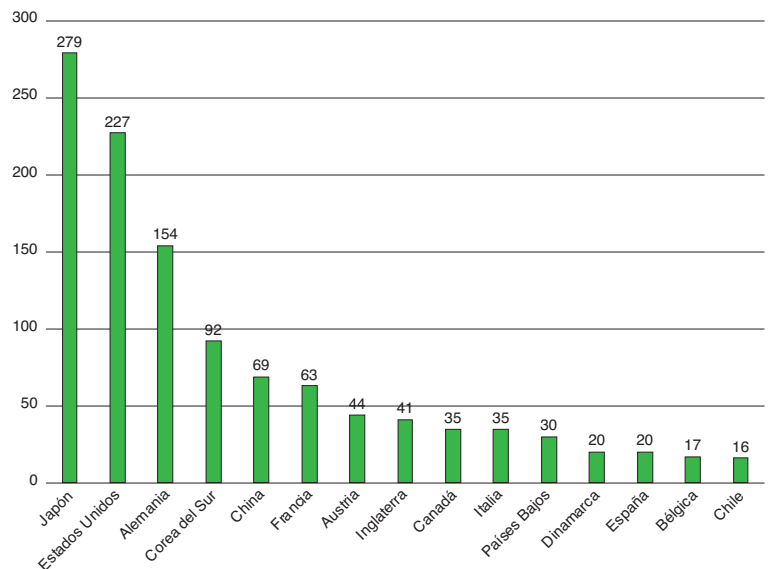


Gráfico 7. Publicaciones científicas mundiales sobre pilas de hidrógeno

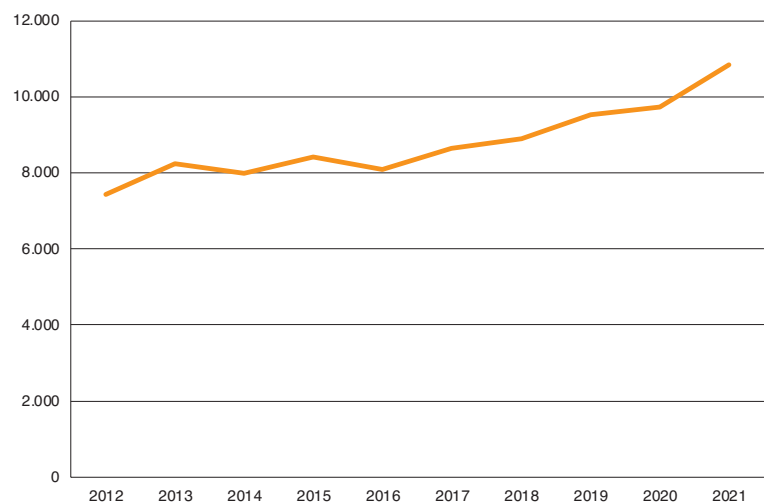


Gráfico 8. Publicaciones científicas iberoamericanas sobre pilas de hidrógeno

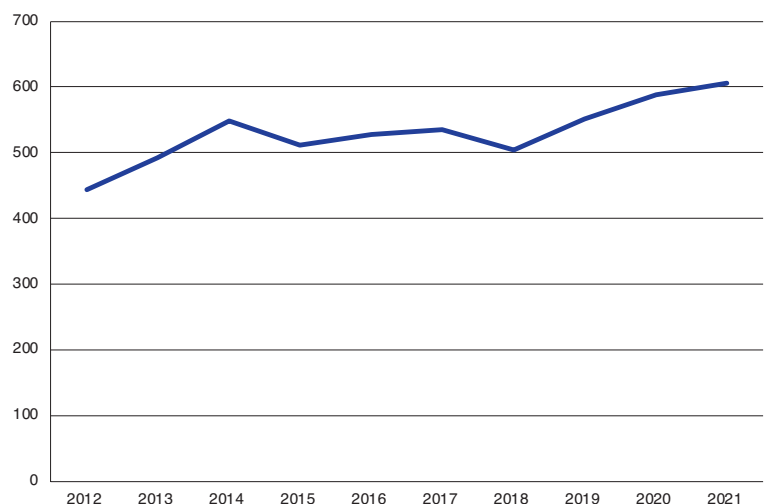
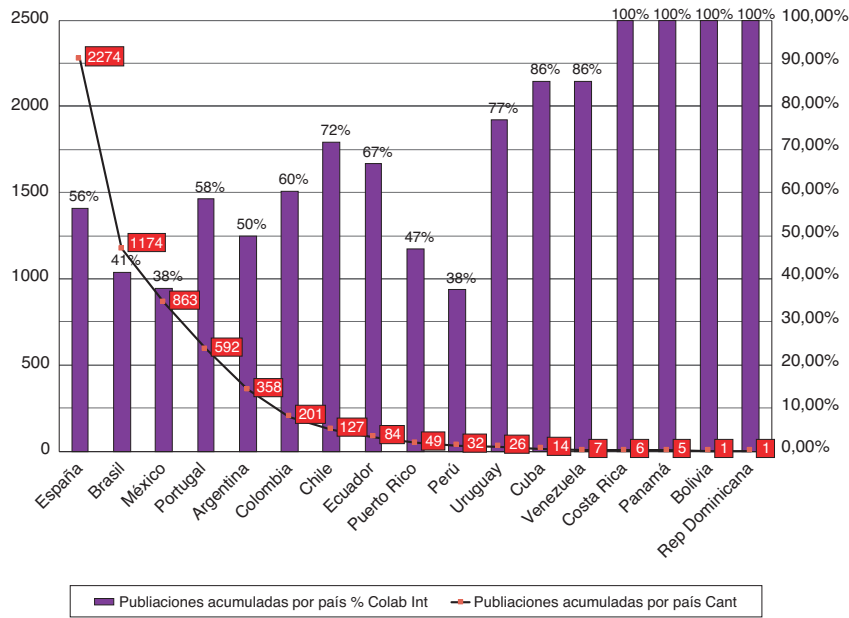


Gráfico 9. Publicaciones científicas sobre pilas de hidrógeno y porcentaje de colaboración internacional (acumulado 2012-2021)



(Gráfico 8). Además, presentó una tasa de crecimiento 10 puntos porcentuales menor a la de la producción mundial en esta temática, con un incremento del 36% entre puntas.

No es una buena señal, ya que da cuenta de una debilidad relativa de la región en el desarrollo de una tecnología que se muestra como clave para el futuro. No se trata de una excepción, dado el limitado desarrollo de la región en la investigación relacionada con tecnologías de punta.

A nivel regional, una vez más España aparece con una clara ventaja en términos de volumen de producción, acumulando 2.274 artículos en el decenio 2012-2021. A continuación aparecen Brasil, México y Portugal. Es de destacar el rol de Argentina en la investigación sobre pilas de hidrógeno, ya que aparece en el quinto lugar regional, delante de Colombia y Chile (Gráfico 9).

Gráfico 10. Red iberoamericana de colaboración científica en pilas de hidrógeno



La colaboración internacional de los países iberoamericanos en esta temática es también más intensa que en la producción de hidrógeno. Aunque el patrón comparado entre países es similar, con mayor colaboración de los de menor desarrollo relativo, el porcentaje de artículos en coautoría internacional es mayor en todos los casos. En España y Portugal se aproxima al 60%, mientras que al 40% en Brasil y México.

La red de colaboración iberoamericana aparece nuevamente estructurada en torno a los países de mayor producción; España, Brasil y México. De los 17 países de la región con actividad en este tema, 5 no cuentan con vínculos de coautoría con otros países iberoamericanos. Se trata, además de algunos de los de menor desarrollo relativo, pero que tienen toda su producción en coautoría con países fuera de la región (Gráfico 10).

En este caso, la colaboración regional es de mayor relevancia para los países iberoamericanos de desarrollo científico medio en este tema, en particular para Argentina, Colombia y Chile. Sin embargo, la desconexión

de cinco países hace que la red resultante esté menos conectada; existiendo tan sólo el 18% de los lazos posibles.

Si analizamos la cantidad de patentes solicitadas mediante el convenio PCT asociadas a la producción de pilas de combustibles de hidrógeno, vemos que el volumen de producción es algo mayor al de la temática de producción de hidrógeno, acumulando 1.660 registros entre 2008 y 2021. La cantidad de patentes solicitadas cada año se mantiene un poco más estable en los últimos diez años, entre 100 y 130 solicitudes anuales (**Gráfico 11**).

Al igual que en el desarrollo de tecnologías para la producción de hidrógeno, Japón, Estados Unidos y Alemania lideran el ranking de titularidad de patentes. En este caso la concentración es aún mayor, alcanzando al 60% de las invenciones (**Gráfico 12**).

La cantidad de patentes publicadas en la que figuran países iberoamericanos entre sus titulares es muy escasa, con tan sólo 12 registros. España concentra casi la totalidad al contar con 11 patentes y Brasil con una.

54

2.3. INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO SOBRE LITIO EN IBEROAMÉRICA

El otro elemento clave en la transición energética, y en el que la región puede tener un papel central por sus recursos naturales, es el litio. Como ya fue desarrollado, especialmente los países del triángulo del litio tienen una oportunidad de gran magnitud, pero una vez más resulta necesario avanzar también en el desarrollo y aplicación de tecnologías que permitan agregar valor a la producción primaria. En ese sentido, avanzar en el desarrollo y producción de baterías de litio es clave. A continuación, focalizando en la minería de litio y las baterías, se analizan las principales tendencias en la producción de conocimiento, mediante el análisis de publicaciones científicas, y en el desarrollo tecnológico, mediante patentes.

Minería de litio

La investigación relacionada con la minería de litio ha generado una producción de artículos muy baja. En 2012, a nivel mundial sólo se han identificado 30 artículos sobre este tema en revistas indizadas en SCOPUS. A partir de 2016 se observa un cambio de tendencia, momento en el cual la producción aumenta hasta un pico de 164 en 2021, el último año

Gráfico 11. Patentes PCT en pilas de hidrógeno por año de solicitud.

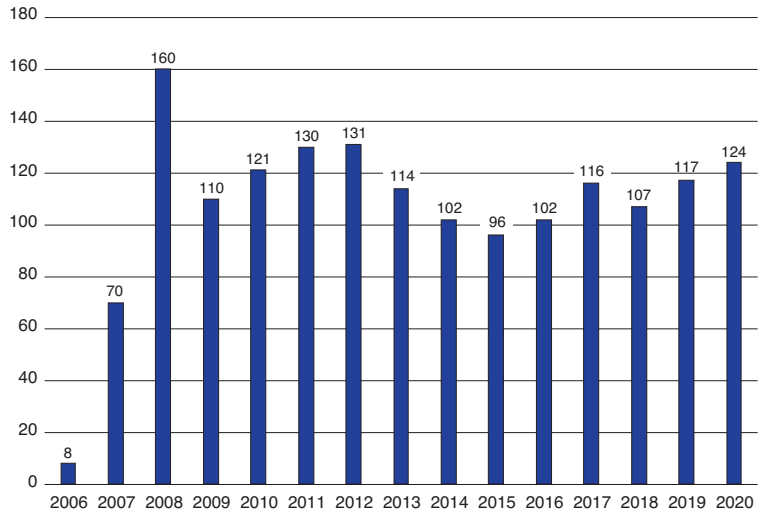


Gráfico 12. Patentes PCT en pilas de combustible de hidrógeno por país del titular

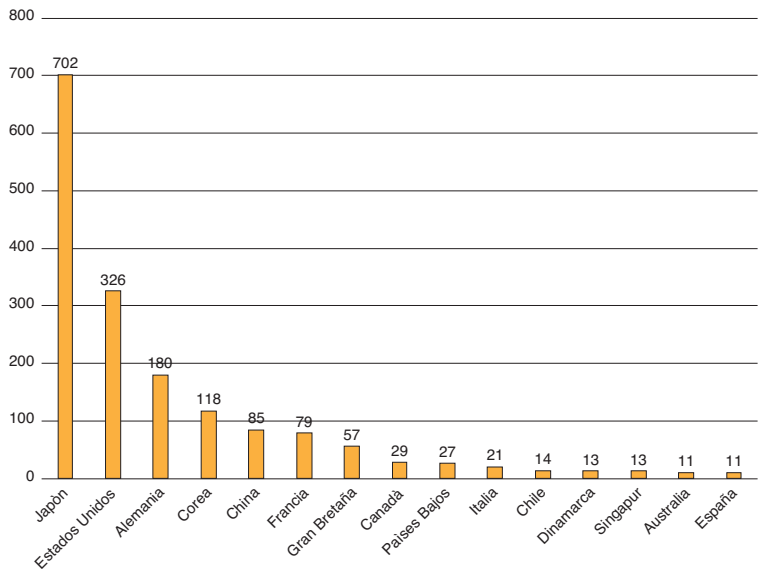


Gráfico 13. Publicaciones científicas mundiales sobre minería de litio

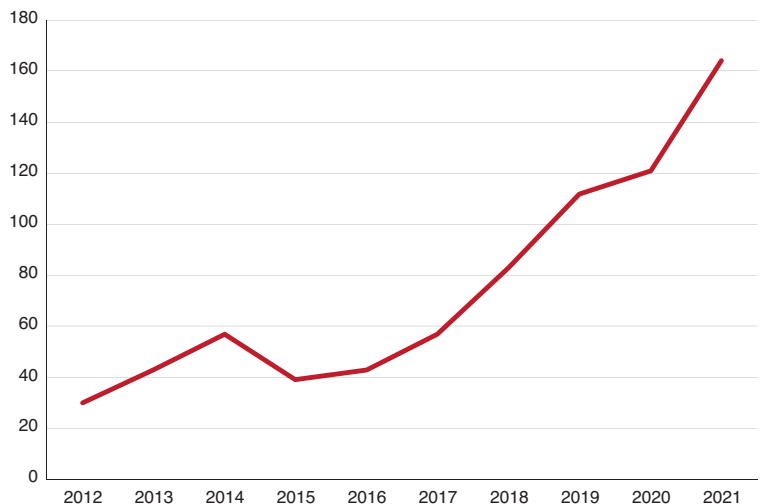
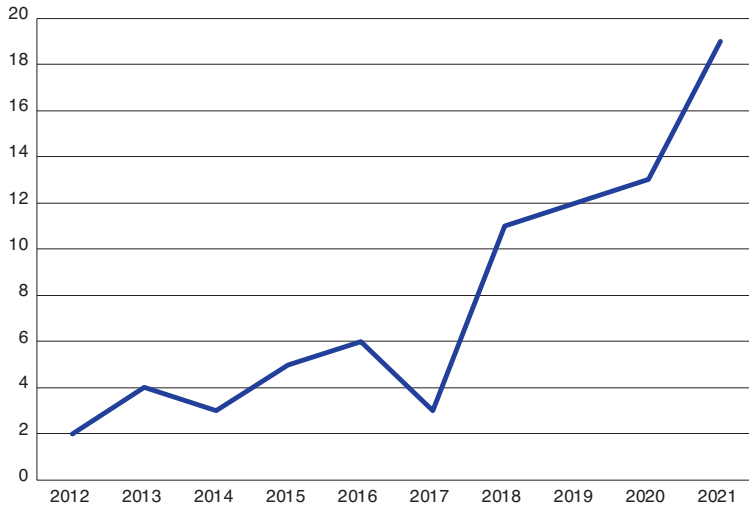


Gráfico 14. Publicaciones científicas iberoamericanas sobre minería de litio



analizado aquí. En total, entre esos dos años, se acumularon un total de 749 artículos en SCOPUS (**Gráfico 13**).

Una vez más, el país líder en términos de cantidad de artículos es China con 171 publicaciones, seguido de Estados Unidos con 114 documentos pero, a diferencia de lo que sucedía con los artículos científicos en el campo del hidrógeno, España se encuentra el quinto lugar a nivel mundial, luego de Alemania y Australia.

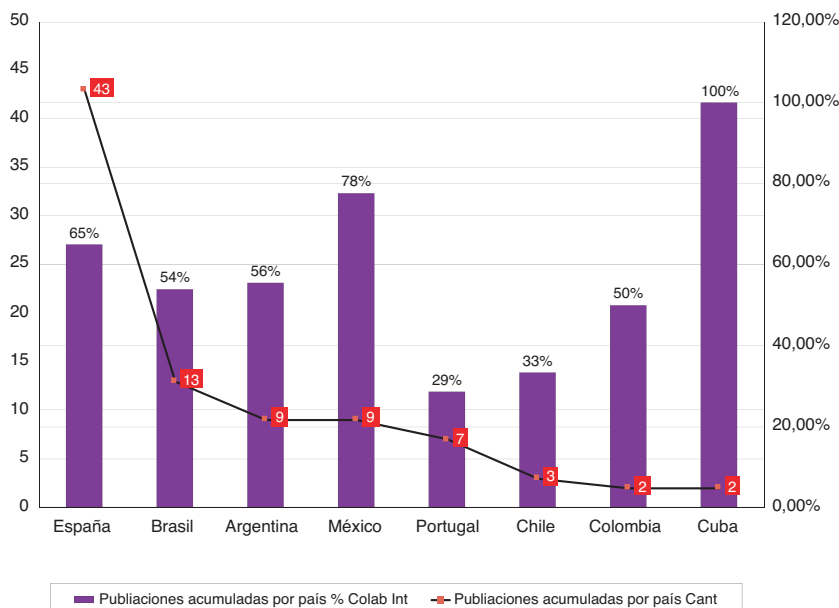
El conjunto de países de Iberoamérica cuenta con 78 publicaciones científicas acerca de la minería de litio, con una participación del 10% de la producción mundial en el tema. Es decir, dos puntos porcentuales más que el peso regional en el total de publicaciones. Si bien los valores son bajos, acumulando Iberoamérica tan sólo 78 artículos entre 2012 y

2021, la tendencia de crecimiento es similar a la del total acelerándose en los últimos cuatro años en análisis (**Gráfico 14**).

Hay un punto interesante en este mayor volumen relativo de la producción científica iberoamericana y que está relacionado con el desafío de la cooperación comunitaria -desarrollado anteriormente- y de los efectos de la minería sobre los habitantes de las zonas afectadas. En el total mundial, el 4% de los artículos relacionados con la minería de litio se publicaron en revistas de ciencias sociales. En Iberoamérica, en cambio, ese valor asciende a más del doble alcanzando el 10% del total. Aunque el valor estadístico en números tan pequeños debe ser relativizado, si se toman puntualmente los tres países del triángulo del litio, el 15% de los artículos pertenecen a las ciencias sociales y se orientan a los efectos socioambientales de la extracción de litio.

España, que figura entre los cinco países con mayor producción científica en litio, obviamente también lidera el ranking de países iberoamericanos con 43 registros. Además, con 65% de los artículos en coautoría internacional, cuenta con una alta colaboración. Le sigue Brasil con 13 publicaciones, de las cuales prácticamente la mitad son producto de trabajos colaborativos entre investigadores de diferentes países. Argentina y México cuentan con 9 publicaciones, con un nivel de colaboración internacional más alto en el caso del segundo (**Gráfico 15**).

Gráfico 15. Publicaciones científicas sobre minería de litio y porcentaje de colaboración internacional (acumulado 2012-2021)



La red de colaboración iberoamericana aparece nuevamente estructurada en torno al país de mayor producción, España, y con un vínculo de coautoría más fuerte entre los cuatro principales países en términos de producción en el tema: Brasil, Argentina y México. Chile, a pesar de ser un país relevante en el tema, no cuenta con publicaciones en coautoría regional (**Gráfico 16**).

La cantidad de patentes relacionadas a la obtención de litio a nivel mundial es baja, con 201 registros en la base de datos del convenio PCT. La evolución anual de las solicitudes presenta altibajos, lógicos dado el bajo volumen, pero muestra un claro cambio a partir de 2017. Entre 2017 y 2021, el promedio anual de patentes solicitadas en relación con la obtención de Litio es de 28,6, mientras que en la etapa previa había alcanzado las 7,2. (**Gráfico 17**).

A nivel mundial, Japón lideró el patentamiento, con 32 registros acumulados en este periodo. Le siguieron China y Estados Unidos, ambos con 30 registros. Australia, con 22, y Alemania, con 21, completan el top 5 de titulares de patentes (**Gráfico 18**).

Iberoamérica no suele destacarse por su nivel de patentamiento, y aún menos en un campo de tan bajo volumen como éste. La cantidad de patentes publicadas en la que figuran países iberoamericanos entre sus titulares es de 7. Es interesante que, a pesar del bajo número de registros totales, dos países del triángulo del litio lideran la región; se trata de Argentina y Chile con dos patentes cada uno. También cuentan con patentes sobre la extracción de litio Portugal, España y México.

Baterías de litio

La investigación mundial sobre baterías de litio, reflejada en la producción de artículos científicos ha tenido una rápida expansión, multiplicándose más de cuatro veces y media entre 2012 y 2021 según datos de SCOPUS. De esa forma, pasó de 752 documentos en 2012 a 3.506 en 2021 y totalizando 23.093 artículos en todo el periodo (**Gráfico 19**).

Una vez más, la investigación mundial está liderada por China, que acumula 9.108 artículos entre 2012 y 2021. Le siguen Estados Unidos, con menos de la mitad de los documentos -4.663- y Corea del Sur con 2.040. El primer país iberoamericano es, nuevamente, España en el puesto 13 con 428 artículos en revistas de SCOPUS.

Gráfico 16. Red iberoamericana de colaboración científica sobre minería de litio



Gráfico 17. Patentes PCT sobre producción de litio por año de solicitud.

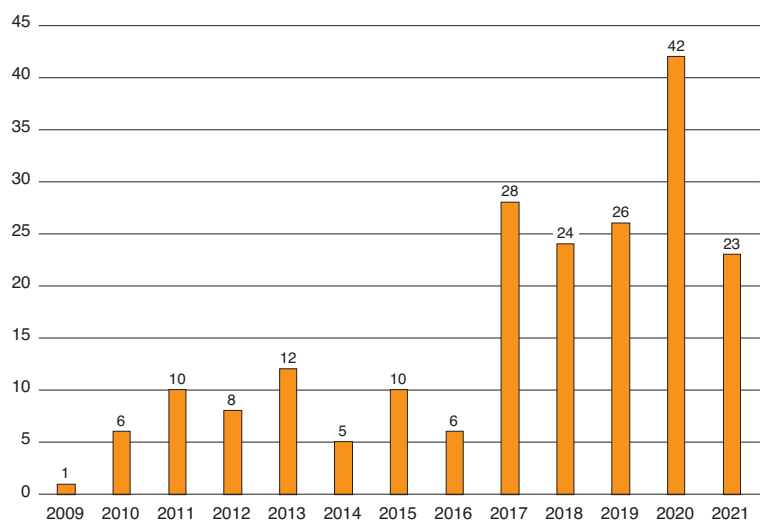


Gráfico 18. Patentes PCT sobre producción de litio por país del titular

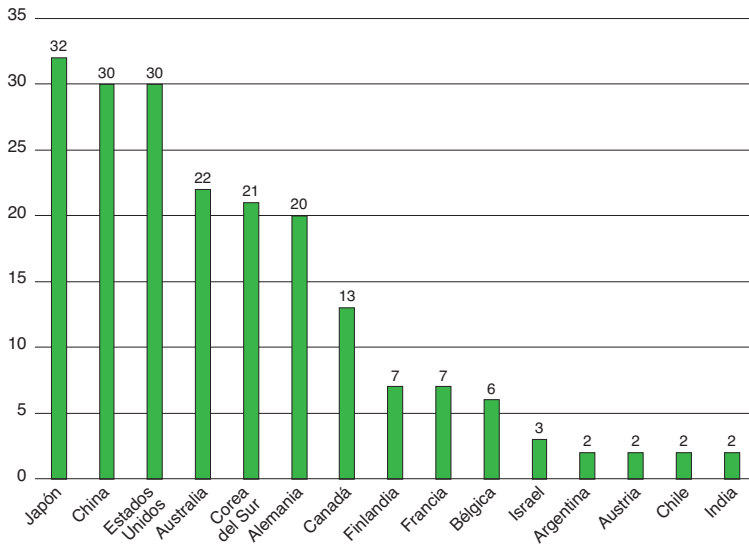


Gráfico 19. Publicaciones científicas mundiales sobre baterías de litio

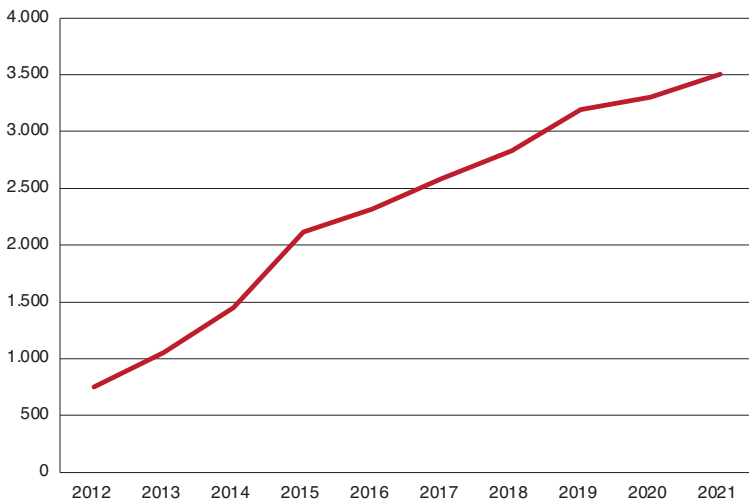
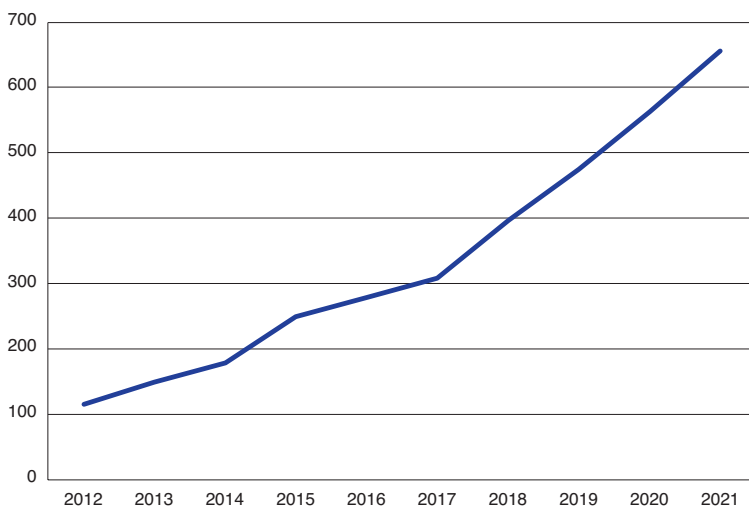


Gráfico 20. Publicaciones científicas iberoamericanas sobre baterías de litio



La producción iberoamericana sobre esta temática tiene una tendencia similar al desarrollo de las publicaciones a nivel mundial, aunque con un volumen relativo bajo que se mantiene en torno al 6% de la producción global. La cantidad de artículos firmados por autores de la región pasó de 444 en 2012 a 606 en 2021 (**Gráfico 20**).

Dentro de Iberoamérica, la producción está encabezada por España, que con 1.921 está cerca de cuadruplicar la producción acumulada entre 2012 y 2021 del país que ocupa el segundo lugar; Brasil con 568. Posteriormente aparecen Portugal, México y Argentina, que son los únicos que consiguen superar los 150 registros acumulados en este periodo (**Gráfico 21**). Una vez más, los países de mayor desarrollo son los que menos tienden a colaborar a nivel internacional. Es particularmente llamativo en los casos de Argentina y Brasil, que tan sólo han firmado en torno al 44% de sus artículos con autores de otros países.

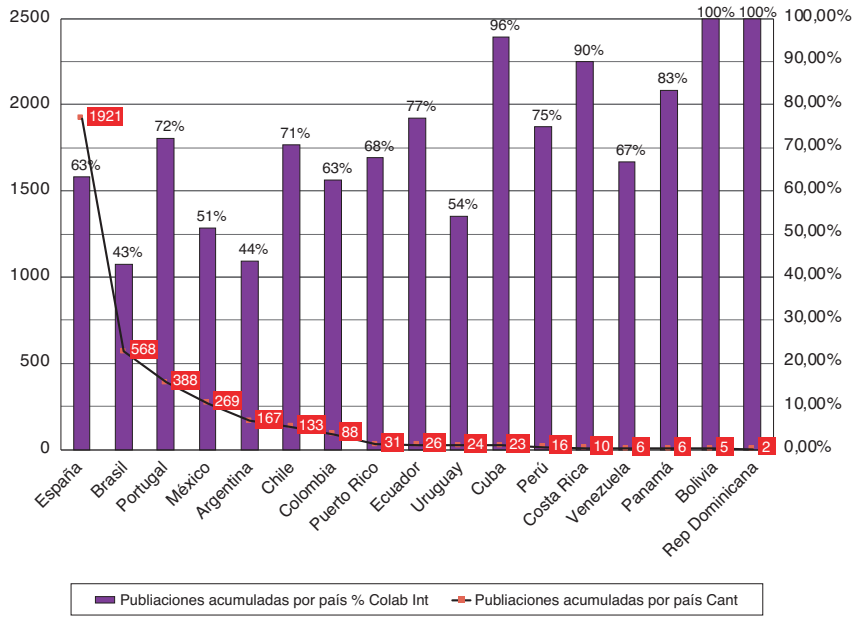
La colaboración iberoamericana en la investigación relacionada con el desarrollo de baterías de litio está organizada en torno al triángulo de los países más productivos en la temática: España, Brasil y Portugal. México, Argentina y Chile, que continúan el ranking de producción científica en esta área, muestran también una intensa colaboración regional. Puerto Rico, Panamá y Bolivia son los únicos países que aparecen desconectados de la red. En parte como consecuencia de esta desconexión, la densidad del grafo es relativamente baja, existiendo el 19% de los lazos de copublicación posibles (**Gráfico 22**).

El desarrollo tecnológico, medido mediante el patentamiento, tiene un volumen mucho mayor en el área de las baterías de litio. Entre 2006 y 2020, la cantidad de patentes en esta temática asciende a 8.048, con un crecimiento sostenido en los últimos quince años (**Gráfico 23**).

Japón es responsable del 40% de las invenciones relacionadas con las baterías de litio, lo que se condice con un país con un marcado liderazgo en la industria electrónica. Lo sigue Corea con 1.517 y luego China junto a Estados Unidos con 967 patentes y 949 patentes respectivamente (**Gráfico 24**).

En este terreno, el patentamiento de empresas radicadas en los países iberoamericanos es nuevamente muy limitado. Suma un total de 13 patentes, la mayor parte bajo titularidad de España con 9, mientras que Argentina, Chile, República Dominicana y Portugal cuentan con una.

Gráfico 21. Publicaciones científicas sobre baterías de litio y porcentaje de colaboración internacional (acumulado 2012-2021)



3. COMENTARIOS FINALES: SUSTENTABILIDAD E INTEGRACIÓN, LOS PRINCIPALES DESAFÍOS PARA IBEROAMÉRICA

58

Litio e hidrógeno verde son dos booms tecn-económicos que surgen para enfrentar la tarea de la descarbonización energética y desplegar la lucha contra la emergencia climática. Sin embargo, en el contexto de la creciente crisis ecológica que estamos padeciendo, con una situación peligrosa de sobrepasamiento muy acusado de varios límites planetarios, los gases de efecto invernadero son sólo una de las aristas del problema. Circunscribir el litio y el hidrógeno verde a tecnologías que reducen emisiones sin tener en cuenta otras consideraciones ecológicas implica asumir una perspectiva de sustentabilidad débil que no está, ni técnica ni moralmente, a la altura del reto del Antropoceno. Por sustentabilidad débil se entiende aquí un enfoque reduccionista de consecución de la sostenibilidad basado en la sustitución de tecnologías y la priorización de objetivos expresados en algún indicador simbólicamente privilegiado. Por el contrario, se entiende por sustentabilidad fuerte un enfoque más sistémico de consecución de la sostenibilidad donde la sustitución de tecnologías es complementada con importantes reformas sociales. Todo ello desde una perspectiva compleja que busca abordar la multidimensionalidad de la crisis ecológica en sus diferentes problemas interrelacionados, incluyendo el clima y un indicador como el CO2 atmosférico, pero yendo más allá.

Gráfico 22. Red iberoamericana de colaboración científica sobre baterías de litio



Gráfico 23. Patentes PCT sobre baterías de litio por año de solicitud.

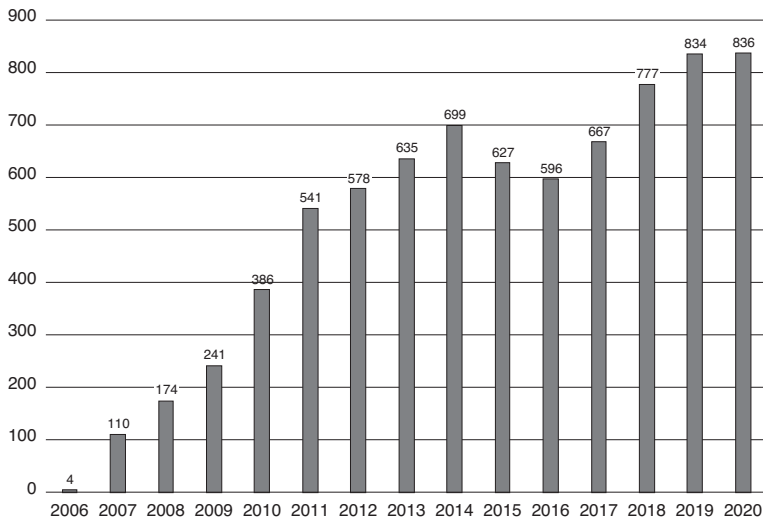
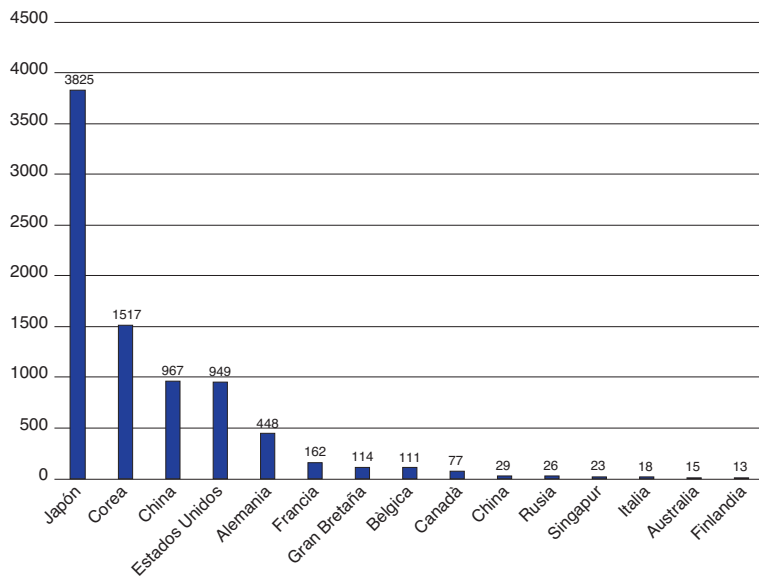


Gráfico 24. Patentes PCT sobre baterías de litio por país del titular



El desafío de la sustentabilidad fuerte nos remite a la necesidad de que los nuevos ciclos tecnológicos asociados a la transición energética se enmarquen dentro de un replanteamiento del paradigma del desarrollo sostenible, nacido con el informe Brundtland⁴ en 1987 y popularizado e institucionalizado tras la cumbre de Río 92. Nuestro momento histórico es otro. El intento de armonizar protección ambiental, cohesión social y las formas de entender el crecimiento económico que han sido predominantes en los últimos 30 años no ha cumplido con la meta que originalmente se había marcado. Después de tres décadas de implementación de la idea de desarrollo sostenible la capacidad ecológica de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades, que es el corazón de su definición, ha sido violentamente impugnada por el modo en que las generaciones del presente hemos satisfecho las nuestras. La desigualdad económica y la conflictividad socioambiental, pese a las polémicas que pueden suscitar las metodologías de medición comparativa de estos fenómenos, no presentan tampoco resultados que nadie pueda abandonar.

Por todo ello, en la tercera década del siglo XXI reducir cuantitativamente y de un modo contrastado los impactos materiales de la actividad humana sobre la biosfera se ha tornado el imperativo marco que debe condicionar todos los demás objetivos del desarrollo. Aunque ello exija redefinir la noción de crecimiento económico o impulsar cambios sustanciales en modos de vida culturalmente arraigados. Poco más allá de mitad de siglo las emisiones de CO2 deben haber desaparecido si queremos mantenernos dentro de un umbral de seguridad climática razonable. Del mismo modo, la destrucción acelerada de ecosistemas debe haberse detenido y a ser posible revertido en procesos restaurativos. Estos objetivos de supervivencia material básica, pues de ellos depende mantener las condiciones de existencia de nuestros sistemas sociales en parámetros civilizados, no pueden ser flexibles. Son las estrategias de negocio o los modelos de consumo los que deben adaptarse a sus exigencias.

En el caso del litio, el desafío de la sustentabilidad fuerte se encarna en el debate abierto sobre la movilidad de una sociedad descarbonizada y el grado de circularidad económica que podamos desplegar. Un

4. ONU (1987), Nuestro Futuro Común: Informe Brundtland, Nueva York.

replanteamiento global de los patrones de movilidad con el objetivo de favorecer la relocalización productiva, fomentar el teletrabajo o desincentivar la propiedad particular del automóvil favoreciendo modelos de uso compartido se conjugarían para reducir sustancialmente la demanda futura de litio. Con ello se rebajarían los impactos socioambientales de su minería, que afectarán especialmente a algunos de los países iberoamericanos. Además, se asegurarían esquemas de suministro estables al destensar la presión que los escenarios de demanda más alta ejercerían sobre una oferta geológica limitada y muy irregularmente distribuida. Lo mismo sucedería si la tecnología y el marco regulatorio avanzasen para expandir y consolidar el reciclaje del litio, que hoy es anecdótico.

La necesidad de un salto de escala en materia de reciclaje de minerales críticos y economía circular nos conecta también con el desafío de la sustentabilidad fuerte en el caso del hidrógeno verde. Más allá de los impactos socioambientales asociados a la sobredimensión de instalaciones renovables a la que debe aspirar un país exportador de hidrógeno verde, que en sí mismos son problemáticos, los escenarios de alta penetración de renovables están siendo discutidos por un número creciente de estudios. Estos se muestran escépticos sobre la posibilidad de que las reservas geológicas de algunos elementos puedan cubrir la demanda prevista. Según estas tesis, ciertos minerales pueden suponer cuellos de botella en los planes de despliegue de una planta nacional de energías renovables productora de hidrógeno verde. En los estudios de Antonio Valero y Alicia Valero, que lideran un equipo español experto en el cálculo del capital mineral del planeta Tierra, escenarios como el ya mencionado 2DS de la Agencia Internacional de la Energía van a implicar riesgos muy altos de suministro (demanda superior a los recursos conocidos) de teluro. Y riesgos altos de suministro (demanda superior a las reservas conocidas) de otros doce elementos: plata, cadmio, cobalto, cromo, cobre, galio, indio, litio, manganeso, níquel, platino y zinc. Esta escasez potencial, unida a los impactos socioambientales de las infraestructuras renovables y la minería, se combinan para encuadrar las futuras políticas públicas de hidrógeno verde en una deliberación más amplia: cómo ajustar las futuras explotaciones de litio e hidrógeno verde a un modelo de desarrollo diseñado en clave de sustentabilidad fuerte.

Los horizontes que se abren en esta tarea tienen que ver, en primer lugar, con la necesidad de una reducción absoluta y no solo relativa del consumo energético. Algo ya contemplado en la mayoría de los escenarios climáticos que son coherentes con los compromisos y los ritmos del Acuerdo de París. Lo sustentable es planificar una demanda de hidrógeno razonable dentro de un consumo energético racionalizado, más eficiente, y por tanto comparativamente menor al actual sin por ello afectar al bienestar de la población. Esto es especialmente relevante en algunos sectores como el transporte, ya que el papel del hidrógeno en un mix energético futuro está muy relacionado con la movilidad pesada de larga distancia. Un sector, el del transporte global de mercancías, que podría rebajarse sustancialmente con políticas serias favorecedoras de la relocalización productiva, los circuitos cortos de

comercialización y de alternativas más sostenibles, como el ferrocarril.

En segundo lugar, al igual que con el litio, es preciso desplegar un salto de escala en materia de economía circular. Este tendría implicaciones económicas (las plantas de recuperación de minerales críticos, todavía muy escasas, suponen enormes inversiones) pero también técnico-legislativas: el diseño de los aparatos modernos carece de estándares que faciliten el desensamblado para recuperar los minerales dispersos en ellos al final del ciclo de vida. En esta línea, necesitamos avanzar en marcos legales que promuevan productos robustos, modulares y fácilmente desmontables.

Por último, y como ya fue mencionado a lo largo del texto y se ha expuesto claramente en el análisis de publicaciones y patentes, Iberoamérica requiere de una fuerte iniciativa de cooperación para tener un papel relevante en el desarrollo e implementación de estas tecnologías. Cooperar, poniendo en común capacidades de investigación (personal, instalaciones, conocimientos) es una sugerencia frecuente en los diversos documentos que buscan asesorar a los decisores políticos latinoamericanos ante los retos de estas nuevas tecnologías.

Pero en un tema tan transversal como la transición energética, las posibilidades de este horizonte de colaboración regional no se limitan al I+D. Los retos transversales son mucho más amplios. La capacidad para las sinergias y las simbiosis también. Que tres países iberoamericanos geográficamente contiguos como Chile, Argentina y Bolivia concentren una porción tan significativa de las reservas de litio conocidas en el mundo ofrece una posibilidad de cooperación de alto impacto en la gobernanza económica global de este recurso.

Del mismo modo, ante la baja densidad de población y los déficits en redes ferroviarias, en América Latina el grueso del transporte de mercancías (un 90%) se realiza por carretera. Desplegar la infraestructura transfronteriza que permita sustituir los motores diésel de estos camiones por formas de movilidad sostenible supone una inmensa oportunidad para políticas industriales coordinadas en materia de hidrógeno o movilidad eléctrica. A su vez, América Latina cuenta con infraestructuras transfronterizas energéticas ya existentes que pueden servir de laboratorio para aprendizajes técnicos e institucionales a ambos lados de la frontera, como las grandes centrales hidroeléctricas.

Finalmente, América Latina es una región cuya red eléctrica está pobremente interconectada. Al igual que la Unión Europea se ha propuesto objetivos de interconexión eléctrica ambiciosos de aquí a 2030 como uno de los pilares estratégicos de su avance decidido hacia un mix energético 100% renovable, los países latinoamericanos podrían seguir un camino análogo. Y las posibilidades para la colaboración e integración regional no se agotan en América Latina: que España y Portugal estén adquiriendo un protagonismo energético creciente en el marco del *European Green Deal* convierte a la Organización de Estados Iberoamericanos en una institución-puente con capacidad para concebir,

facilitar y desplegar diferentes formas de ayuda mutua en el campo de la investigación científica y el desarrollo tecnológico entre dos regiones globales que comparten un elevado potencial para ejercer el liderazgo energético en un mundo post-carbono. Esto es central en la medida en que la ciencia -y también la educación- resultan clave, no sólo para el desarrollo de tecnologías, sino también para abordar la discusión de los desafíos políticos, económicos y sociales sobre bases más sólidas.

El análisis de las capacidades disponibles en la región, reflejadas en las publicaciones y patentes iberoamericanas, plantean algunas ventajas comparativas pero también debilidades, áreas de vacancia y grandes desafíos, como incrementar la colaboración entre países para alcanzar masa crítica o incentivar el desarrollo tecnológico y la integración del sector privado como un actor clave en este proceso.

Si se permite un paralelismo histórico especulativo, aunque no del todo carente de fundamento ni de interés, el secular anhelo de integración económica y política de los países iberoamericanos tiene en los requerimientos cooperativos de la transición energética una oportunidad de realizar avances sólidos. Como enseña el caso europeo, los procesos de integración regional exitosos dependen más de espacios parciales donde se institucionaliza la resolución cooperativa de problemas prácticos que de esquemas ideológicos marcados por un voluntarismo abstracto. La ciencia y la tecnología tienen todos los elementos para convertirse en uno de estos espacios.

¿Puede ser el litio o el hidrógeno verde en el espacio iberoamericano algo análogo a lo que fue el carbón y el acero después de la Segunda Guerra Mundial en el espacio europeo? La pregunta es imposible de contestar, pero es sin duda una pregunta políticamente estimulante.

Anexo I. Definiciones utilizadas en las búsquedas de publicaciones y patentes

Conjunto	Estrategia de búsqueda en publicaciones SCOPUS	Estrategia de búsqueda en patentes PCT
Producción de hidrógeno	TITLE-ABS-KEY ("hydrogen production")	ci:c25b1* AND hydrogen
Pilas de combustible	TITLE-ABS-KEY ("hydrogen" AND ("fuell cell" OR "fuel cells"))	ci:h01m8* AND hydrogen
Minería de litio	TITLE-ABS-KEY ("lithium" AND "mining")	ci:c22b26* AND lithium
Baterías de litio	TITLE-ABS-KEY ((("Li-ion" , "Li-ions" , "Li ion" , "Li ions" , "lithium ion" , "lithium ions" , "lithium-ion" ,) OR ("lithium-ions" AND ("cathode" , "anode" , "electrolyte" , "negative electrode" , "positive electrode" , "battery" , "cell" , "cathodes" , "anodes" , "electrolytes" , "batteries" , "cells" , "negative electrodes" , OR "positive electrodes"))))	ci:h01m4* AND lithium