

# El principio de causalidad en la Investigación y Desarrollo de los países

• Pablo Díaz

Dr. en Física, Universidad de La Frontera, Temuco.



*Sin un cambio importante en la inversión y la infraestructura, no podremos ser actores en el siglo XXI “ni en ningún siglo” si seguimos utilizando la misma receta. Quizás, en medio de la actual discusión constituyente, la comunidad científica tecnológica deba hablar más fuerte que nunca para que se genere la infraestructura necesaria, ya que, como los datos lo muestran, no podemos violar una de las leyes de la física más relevantes, la causalidad.*

## Introducción

Investigación y desarrollo es una temática recurrente en los círculos académicos. En el presente artículo discutiremos con cifras la conexión existente entre inversión y consumo energético con dos indicadores relacionados: el número de artículos científicos y el número de solicitudes de patentes industriales. Esto lo aplicaremos a un grupo representativo de países.

### Los artículos científicos.

Para quienes no les es familiar el tema, los artículos científicos representan una de las principales vías que la comunidad científica utiliza para comunicarse a nivel global. En general, un artículo científico resume el trabajo de uno o un grupo de científicos, los cuales relatan sus resultados mediante un escrito altamente especializado. Para que estos sean publicados, deben ser enviados a una revista científica cuyos editores envían el escrito a otros expertos en la materia para ser revisado: los referís. Este es un proceso ciego, en el sentido que quienes envían el escrito desconocen quién lo revisa. Dependiendo del veredicto de los referís, los editores toman la decisión de aceptar o rechazar la publicación. Existen miles de revistas científicas, en todas las áreas del conocimiento y con diferentes niveles de exigencia para aceptar los trabajos. Dos de las más conocidas son Nature [1] y Science [2]. Como veremos de los datos que presentaremos más adelante, la búsqueda de publicar los resultados científicos a través de este camino es un método global, en rápido aumento, sobre todo en Asia. En nuestro país, como en muchos lugares del mundo existe una fuerte crítica a lo que parece ser una paperitis global, sin embargo, esto no parece ser una preocupación para aquellos países que buscan liderar el siglo XXI, como podremos ver de los datos.

### Las solicitudes de patentes industriales

En el ámbito de las aplicaciones que llevan a productos con im-

pacto económico directo, el patentamiento de las ideas se ha vuelto cada vez más importante para que los creadores puedan mantener el control económico de sus inventos. A diferencia de los artículos científicos, los cuales suelen provenir de grupos concentrados en universidades y centros de investigación, las patentes industriales se concentran en individuos, grupos o empresas que buscan potencialmente comercializar el producto cuyo derecho de propiedad intelectual buscan preservar. Prácticamente todos los países tienen oficinas de patentes en las cuales ingresan solicitudes de individuos, grupos o empresas de cualquier país. Estas pasan por un proceso de revisión centrado en que la idea que se busca patentar sea suficientemente distintiva de otras ya patentadas. Como veremos, hay una relación importante entre el número de patentes industriales solicitadas asociadas a un país, con el nivel de industrialización de este.

En resumen, nosotros analizaremos como se relaciona el número de artículos científicos y las solicitudes de patente con la inversión en Investigación y Desarrollo (I&D).

### Metodología

Uno de los principales indicadores es el porcentaje del PIB que los países invierten en I&D medido en USD. Este indicador fue obtenido desde los datos del Banco Mundial [3] y hemos tomado el último informado por los países, que en su mayoría corresponde al año 2020. Para llevar este porcentaje a dólares, hemos tomado el PIB 2020 de los países también desde el Banco Mundial. Además, tomamos los datos de consumo de energía eléctrica de los países [4] Nosotros analizaremos como se correlaciona el monto en USD y el porcentaje de energía consumida asociada con la cantidad de artículos científicos publicados y el número de solicitudes de patentes, ambas cifras para el año 2020. El número de artículos será obtenido directamente desde la colección principal de la base científica WOS (Web of Science) [5], la cual es una de las más importantes. WOS no es la única base de datos cien-

tífica, por lo tanto, los números que mostraremos no pueden ser considerados como toda la productividad científica de los países, sin embargo, es lo suficientemente grande para reflejar tendencias a nivel global. El número de solicitudes de patentes industriales por país fue obtenido desde la WIPO (World Intellectual Property Organization) [6]. La mirada es la de una caja negra, en el sentido que el input es la inversión en I&D y el resultado son los artículos científicos y las solicitudes de patentes, sin analizar en extenso las particularidades. En este sentido, existen discusiones, principalmente en algunos círculos académicos, de la validez, en particular a lo que se refiere en los artículos científicos, de si esta es la "forma correcta de comunicar la ciencia". Esta discusión se da mayormente en países occidentales y latinoamericanos, pero, como veremos de los datos, este lejos de atenuar el impulso, sobre todo en Asia y Oceanía, donde países como China, Corea del Sur y Australia, han venido incrementando fuertemente esta forma de hacer ciencia e industria. Nuestro análisis es solo una foto del momento (año 2020) y no contempla la velocidad con las cuales las cifras cambian en el tiempo.

### Indicadores de I&D por país para el año 2020.

La Tabla 1 muestra algunos datos relacionados con I&D de algunos países industriales y algunos países latinoamericanos, incluido Chile. La primera columna nos muestra el monto en millones de USD (MM USD) gastados por los países en I&D y la segunda columna a que porcentaje del PIB corresponden. Como podemos ver, EE. UU. lidera la inversión seguido por China, con un porcentaje de inversión del 3.45% del PIB. Llama la atención que porcentualmente China aún no se coloque al nivel de EE. UU. pensando en que es un objetivo declarado de su gobierno llegar a ser la primera potencia científica y tecnológica, sin embargo, como lo veremos más abajo, la situación es distinta cuando se analiza la energía (en KWhr) que se utiliza para este fin. En Europa, Alemania supera por lejos la inversión en el tópico, tanto desde el punto de vista del monto como del porcentaje, lo cual se ve reflejado en los resultados, como veremos más abajo y es ampliamente cono-

cido al ser considerada como el motor industrial de Europa. Desde un punto de vista porcentual, el primero a nivel mundial es Israel, país que ha incrementado fuertemente su inversión I&D los últimos años y se ve reflejado en un avance interesante en medicina y tecnologías de la información; aunque tiene una pequeña población, la inversión supera a España, Brasil e India (donde este último tiene una población de aproximadamente 140 veces la de Israel). En porcentaje, Corea del Sur ocupa el segundo lugar, ocupando el quinto puesto de la lista al considerar el monto en USD. El caso de Corea del Sur es quizás uno de los más notables, un país que en 1980 publicaba 189 artículos científicos y que en el año 2020 publicó 89.818 (WOS). En la época de los 80s el país decidió convertirse explícitamente en un país cuya actividad se basaría en matemáticas y física, pasando de ser un país agrícola a un exportador de bienes de alta tecnología. Los primeros años la inversión se centró en la educación de su población, enviando miles de personas jóvenes a estudiar a EE. UU. y Europa. Luego se generó una infraestructura científica tecnológica, formada por universidades, centro de investigación básica y centros de investigación aplicada. Esta infraestructura está altamente coordinada y mantiene una fuerte vinculación con la industria y las fuerzas armadas. Los resultados están a la vista. Por otro lado, Japón, que fue el primer tigre asiático, aunque ha perdido importancia relativa, sigue invirtiendo fuerte en I&D lo cual le ha significado seguir siendo un actor relevante actualmente.

El caso latinoamericano es definitivamente aparte. Dar una explicación medianamente razonable supera de lejos el objetivo del presente artículo. Por ahora, diremos que, tal y como se suele decir, son factores culturales. Trataremos de concretarnos solo en los números. Por ejemplo, salvo Brasil, ninguno de los países en la lista se supera el 0.5% del PIB de inversión en I&D. Por otro lado, el caso brasileño muestra que, por si sola, una mayor inversión en I&D no logra que un país alcance el desarrollo, aunque al ser una excepción, solo confirma la regla.

En la Tabla 1 también se incluye el consumo de energía eléctrica

	Inversión en I&D (MM US)	% I&D del PIB [7]	PIB 2020 (MM USD) [8]	Consumo en GWhr [9]	Consumo en GWhr (% I&D)	Población en millones [10]
EE. UU.	722.430	3,45	20.940.000	3.897.887	134.477	329,5
China	353.280	2,40	14.720.000	6.875.089	165.002	1402,0
Japón	164.308	3,26	5.040.108	903.699	29.461	125,8
Alemania	119.508	3,14	3.806.000	500.350	15.711	83,2
Corea del Sur	78.451	4,81	1.631.000	531.258	25.554	51,8
Reino Unido	46.307	1,71	2.708.000	289.688	4.954	67,2
Australia	24.357	1,83	1.331.000	237.388	4.344	25,7
Israel	21.869	5,44	402.000	59.193	3.220	9,2
España	18.062	1,41	1.281.000	256.482	3.616	47,4
Brasil	17.485	1,21	1.445.000	540.997	6.546	212,6
India	17.312	0,66	2.623.000	1.229.388	8.114	1380,0
México	3.228	0,30	1.076.000	267.340	802	128,9
Nueva Zelanda	2.996	1,41	212.500	41.170	580	5,1
Argentina	1.792	0,46	389.590	121.564	559	45,4
Chile	860	0,34	252.900	75.302	256	19,1
Colombia	787	0,29	271.300	69.857	203	50,9
Ecuador	435	0,44	98.810	26.353	116	17,6
Perú	343	0,17	202.000	49.121	84	33,0

Tabla 1. Indicadores de I&D por país.

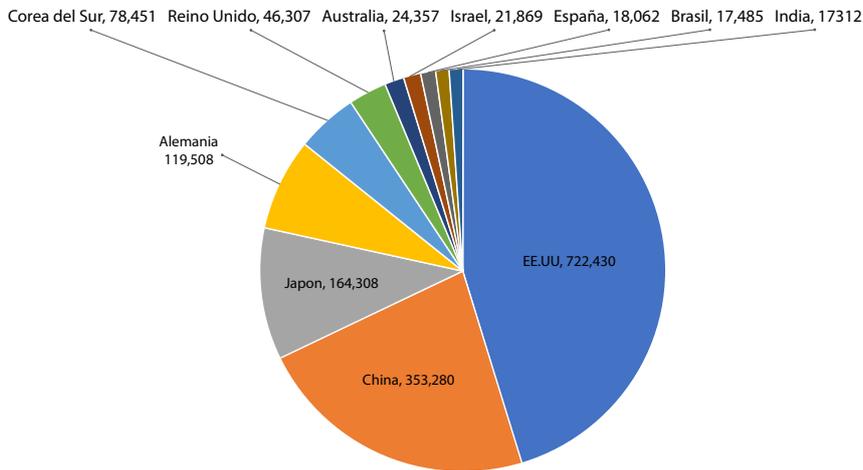
ca de los países. Si hipotetizamos que la energía se reparte más o menos correlacionada con la actividad económica, podemos encontrar un valor aproximado de cuanto energía eléctrica se consume en las actividades relacionadas con I&D, tomando el correspondiente porcentaje de la energía total consumida. La penúltima columna muestra cual sería este monto. Así, el país que más energía consume en I&D sería China, el segundo EE. UU., el tercero Japón, el cuarto la Corea del Sur, dejando a Alemania en el quinto lugar. Las figuras 1 y 2 muestran las proporciones en I&D desde un punto de vista del monto de dinero y del monto de energía cinética, respectivamente. Esta mirada es novedosa y busca conectar la actividad en I&D con una variable física ajena a las percepciones humanas como lo es la energía.

### Productividad en artículos científicos y solicitudes de patentes por país para el año 2020.

La Tabla 2 muestra el número de artículos científicos (AC) y de solicitudes de patentes (SP) por país. El país que más artículos científicos generó fue EE. UU., seguido por China, Reino Unido y Alemania, y el que más solicitudes de patente presentó fue China. Esto es una muestra que por ahora EE. UU. sigue siendo la primera potencia científica. En Europa el primer lugar lo ocupa El Reino Unido, lo cual se correlaciona con el hecho que el país alberga las universidades más prestigiosas de la región. En Asia, China ha tomado la delantera, aunque Japón sigue siendo un actor relevante, sumado a Corea del Sur las últimas décadas. Destacamos la potencia científica de Australia, país que, teniendo una pequeña población en comparación a los países asiáticos mencionados, supera en número de artículos a Corea del Sur y se acerca a Japón.

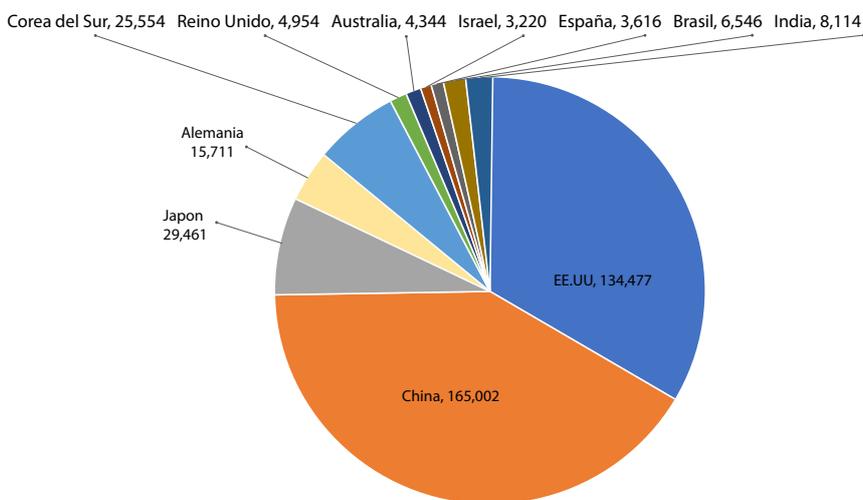
Respecto de las solicitudes de patentes, China es el indiscutible líder mundial, seguidos por EE. UU. y Japón, siendo nuevamente este último el tercer lugar. En Europa, Alemania supera por mucho a los demás, lo cual es evidencia de la potencia de la industria alemana. Un caso impresionante es el de Corea del Sur, país que supera por mucho a Alemania, teniendo una menor población. Es evidente que Asia está liderando esta etapa del desarrollo industrial humano, ya que, sumadas las solicitudes de patentes de China, Japón y Corea del Sur, estas superan por mucho a los países europeos y americanos de la lista.

La Fig. 3 muestra gráficamente la suma de los AC y las SP. Como ya lo hemos mencionado, la fuerza de Asia queda en evidencia. Se observa que Alemania, la potencia industrial europea, queda en cuarto lugar, detrás de Corea del Sur. Es interesante



**Figura 1**

*Inversión en I&D en millones de USD de los países industriales de la Tabla 1.*



**Figura 2**

*Porcentaje del consumo de energía eléctrica en GWhr utilizando el porcentaje de inversión en I&D respecto del consumo total en energía eléctrica.*

	Artículos Científicos (AC) [11]	Solicitud de Patentes (SP) [12]	AC+SP
EE. UU.	773.260	496.123	1.269.383
China	617.014	1.441.086	2.058.100
Japón	125.862	423.264	549.126
Alemania	179.101	168.092	347.193
Corea del Sur	89.818	260.614	350.432
Reino Unido	226.928	53.079	280.007
Australia	117.508	11.907	129.415
Israel	29.925	16.223	46.148
España	118.569	10.170	128.739
Brasil	92.819	7.271	100.090
India	148.550	37.895	186.445
México	33.994	2.102	36.096
Nueva Zelanda	18.231	2.377	20.608
Argentina	17.981	1.239	19.220
Chile	17.381	862	18.243
Colombia	14.093	597	14.690
Ecuador	4.424	48	4.472
Perú	4.744	218	4.962

**Tabla 2.** Artículos científicos y solicitudes de patentes por país en el año 2020.

que, en los casos de China, Japón y Corea del Sur, el número de SP es muy superior al número de AC, lo cual revela un énfasis importante en la aplicación del conocimiento en el desarrollo industrial. En este sentido, en el mundo occidental de la lista, solo Alemania muestra la misma característica, ya que en el todo los demás la cantidad de AC supera por lejos el número de SP.

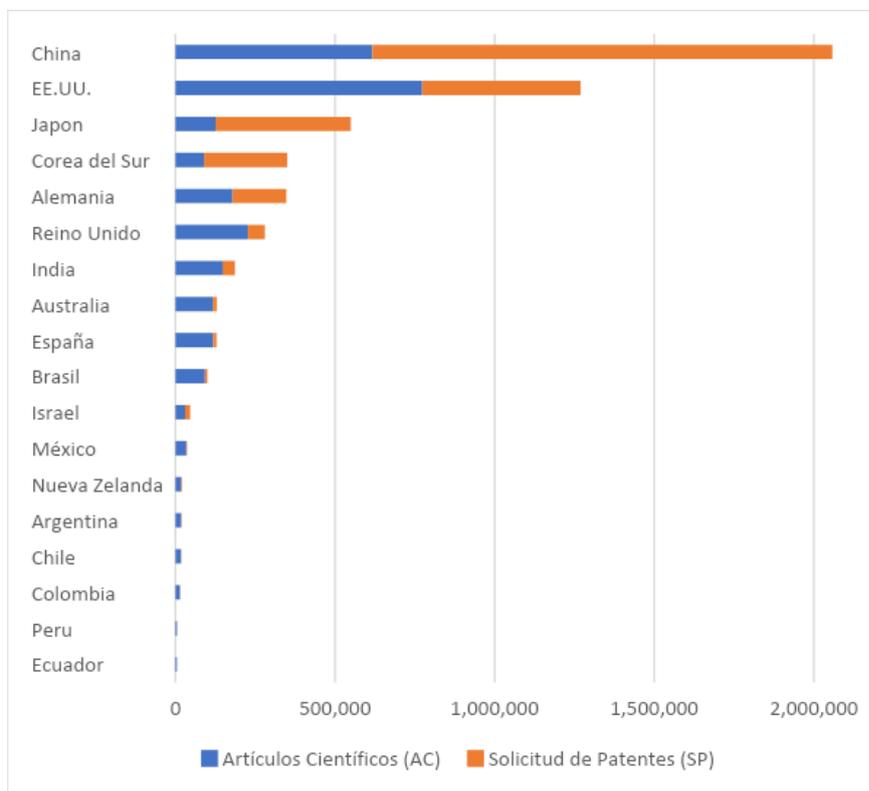
Nuevamente Latinoamérica muestra una diferencia abismante, ya que solo Brasil destaca por la cantidad de AC (aunque con una población muy superior). Es dramático observar que Nueva Zelanda, un país de 5 millones, supera a Argentina y Colombia, con poblaciones 10 veces superior. Más abajo discutiremos estos mismos números por millón de habitantes, lo cual nos dará una nueva perspectiva de la situación.

### ¿Gasto en dólares o en energía?

Ahora, volveremos a nuestra caja negra. Analizaremos la relación entre el gasto en I&D vs el número de AC y SP.

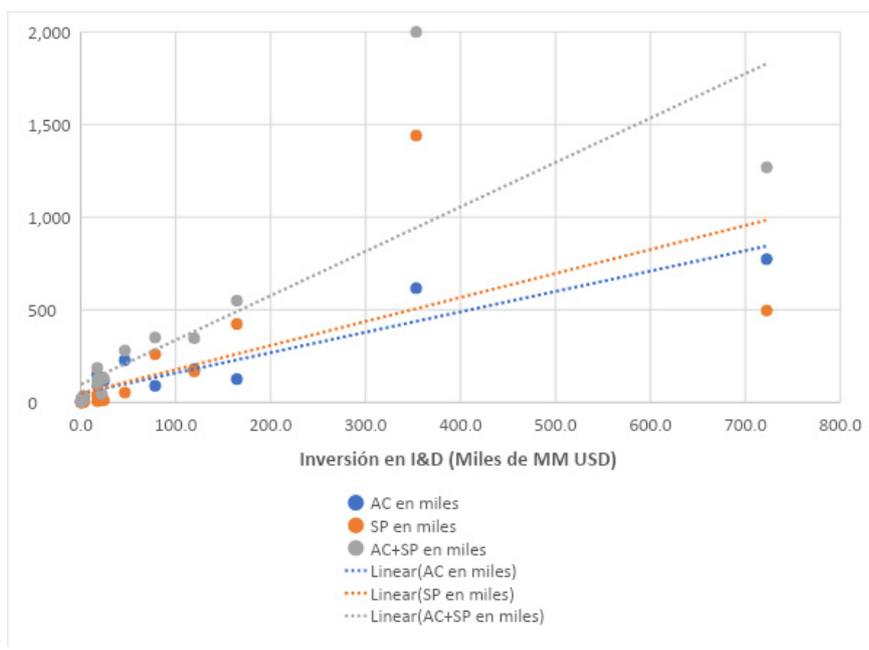
La Fig. 4 muestra una gráfica del número de AC y SP vs la inversión en I&D. Las rectas representan la regresión lineal donde R<sup>2</sup> representa el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. En palabras simples, mientras más cercano a 1 sea R<sup>2</sup>, mejor es el ajuste, el cual, en el presente caso, es lineal. Podemos ver que existe una mejor correlación entre en el gasto en I&D y el número de artículos (AC) científicos que el número de solicitudes de patentes (SP). Las razones para esta diferencia pueden ser variadas y un análisis acabado supera el presente artículo. Sin embargo, es evidente que a mayor inversión en I&D tendremos un mayor número de AC y SP.

Una cuestión relevante que surge al considerar el gasto en USD, es el hecho de lo que se puede hacer con un dólar es distinto dependiendo el país. Es por esta relatividad, que podremos nuestra atención en el consumo energético, el cual, al estar medido en unidades de energía (kWh) es independiente de las percepciones humanas. Como ya mencionamos, hipotetizamos que si en lugar de considerar el porcentaje del PIB gastado en I&D (medido en USD), utilizamos el mismo porcentaje, pero de la energía total consumida por un país, la correlación con la cantidad de AC+SP será aún mayor. Los datos de este consumo estimado se encuentran la penúltima columna de la Tabla 1 y se encuentran parcialmente representados en la Fig. 2. La gráfica de la Fig. 5 muestra un resultado notable y consistente con nuestra hipótesis. La correlación respecto de la regresión lineal, representada por R<sup>2</sup>, muestra una leve baja para el número de AC, pero muestra un importante incremento con el número de SP, pasando de



**Figura 3**

Gráfico de los datos de la Tabla 2.



**Figura 4**

Número de artículos científicos y solicitudes de patentes en función del gasto en I&D en miles de MM USD.

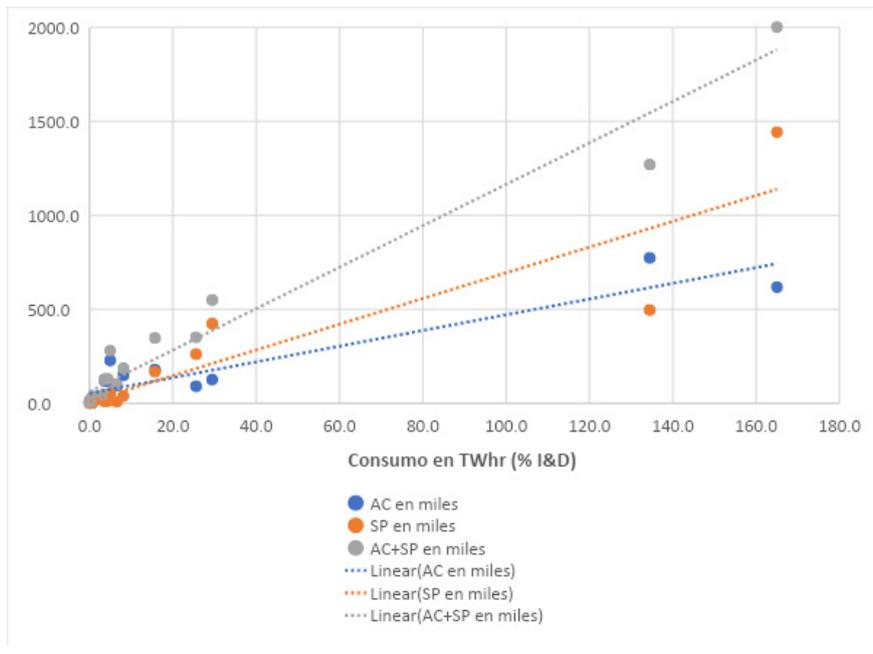
0.53 cuando se utiliza el presupuesto en USD a 0.87 cuando se utiliza el porcentaje relativo al consumo de energía. Aún más sorprendente es el incremento de la correlación con el total de AC más SP. Esto nos muestra que, al considerar pesos similares para los AC y las SP, se consigue una impresionante correlación con el gasto de energía. Sin duda, se puede buscar una mejor correlación con el peso relativo entre los AC y las SP, pero eso lo dejaremos para un análisis futuro. Por ahora, podemos decir que la energía requerida para ambos tipos de productos, resultados de las actividades de investigación y desarrollo, requieren de gastos energéticos equivalentes. Además, el hecho de mostrar tan alta correlación es un indicador que este gasto por cada producto (AC o SP) es más o menos el mismo independiente del país. La física no falla, nuestras actividades están sujetas a variables físicas más que a percepciones de valor. Una economía que base sus cál-

culos en el consumo energético, en lugar del costo en USD (u otra moneda) tendrá una base más sólida a la hora de estimar los resultados de sus actividades. Además, estos resultados muestran que abaratar el costo de la energía puede disparar la capacidad de una economía. Finalmente, desde el punto de vista de los resultados, China ya superó a EE. UU. en I&D, no por invertir más dinero, si no por invertir más energía.

### Productividad por número de habitantes.

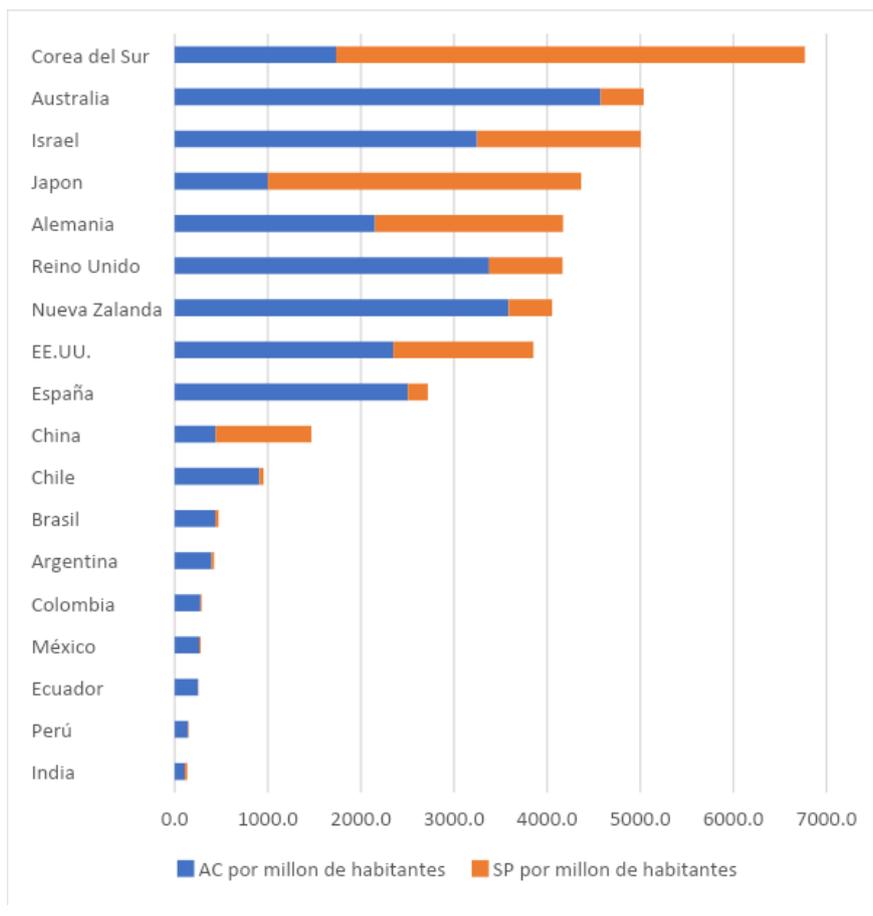
Para poder realizar un análisis más justo respecto de la productividad de los países, analizaremos los indicadores de la Tabla 2 por cada millón de habitantes. El gráfico de la Fig. 6 muestra la situación de forma clara: Corea del Sur es el país más productivo en términos de los indicadores que hemos discutido. Le siguen Australia, el cual viene a ser el más productivo desde el punto de vista de los artículos científicos. Llama la atención que el porcentaje de inversión en I&D es mucho menor al de Corea del Sur, lo cual podría ser un indicio que es más costosos el patentamiento industrial, sin embargo, las razones pueden ser multifactoriales. Otro país que destaca es Israel, el cual, según los datos de la UNESCO (<https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?locations=IL-KR>), ha mantenido por dos décadas un porcentaje de inversión en I+D de 4% o más. Otro caso notable es el de Nueva Zelanda, el cual muestra indicadores muy similares a Australia. Estos dos países, Australia y Nueva Zelanda, comparten raíces culturales similares con El Reino Unido, llamando la atención lo similares que son en términos de productividad, a pesar de estar ubicados (respectos del UK) en lugares geográficos tan diferentes. China aparece en el lugar 10, lo cual muestra que aún tienen un enorme potencial para crecer, si suponemos que en el futuro se parecerá en términos de productividad a sus vecinos Corea del Sur y Japón. De ser así, es difícil imaginar el mundo en el cual China dominará el panorama mundial.

Nuevamente tratamos de forma separada el caso Latinoamericano, cuyas raíces culturales comunes también marcan pronunciadas similitudes en la productividad y en la proporción AC/SP. Aquí destaca claramente Chile, quién en productividad de AC supera a China y está muy cercano a Japón. Esto habla muy bien de la comunidad científica nacional, la cual, aunque cuenta con un bajo porcentaje de inversión en I&D, comparada con Japón o China, tiene indicadores similares a estos. Sin embargo, todos los países muestran una baja tasa de patentamiento lo cual habla



**Figura 5**

Número de artículos científicos y solicitudes de patentes en función del consumo eléctrico correspondiente al porcentaje invertido en I&D.



**Figura 6**

Gráfico de los datos de la Tabla 2 para Latinoamérica por millón de habitantes.

de una fuerte inmadurez a la hora de generar productos de base científica-tecnológica y/o nuestra capacidad de proteger la propiedad intelectual.

### Conclusiones

Existe una fuerte correlación entre la inversión en I&D con la suma del número de artículos científicos y el número de solicitudes de patentes. Esta correlación es aún mejor si, en lugar de considerar el porcentaje de inversión en USD, se considera el mismo porcentaje, pero del consumo de energía eléctrica. Este resultado no es evidente y no ha sido explorado en la mayoría de los análisis del tema. Esto último implica que, abaratar la producción de energía trae como una consecuencia directa un aumento de la capacidad de producir ciencia y tecnología (o cualquier otra actividad humana). Quizás es mejor comenzar a hablar del consumo energético de nuestras actividades en lugar del valor en dinero, la física no falla.

En Latinoamérica, las conversaciones respecto de incrementar la inversión en I&D se repiten continuamente en círculos académicos, pero sin mayor impacto en quienes toman las decisiones, es decir, el mundo político (sea quién sea quien gobierne). Esto es tan evidente, que, en Chile, el currículo de ciencias en los colegios no solo no se ha fortalecido, si no que se ha debilitado fuertemente en los últimos años. Aún así, la comunidad científica nacional, comparada con los países de la región, es altamente productiva, lo cual habla de algunas particularidades de nuestro sistema de ciencia y tecnología que han dado buenos resultados. Sin embargo, tenemos una fuerte debilidad cuando se trata de generar propiedad industrial, tal que en el futuro próximo habrá que seguir construyendo una infraestructura que apunte en esa dirección. Pero cuidado, no hay que, como se dice en términos coloquiales, desvestir un santo (a medio vestir) para vestir a otro santo desnudo. Debemos seguir fortaleciendo nuestra capacidad científica, pero debemos redoblar los esfuerzos para que el conocimiento se transforme en productos

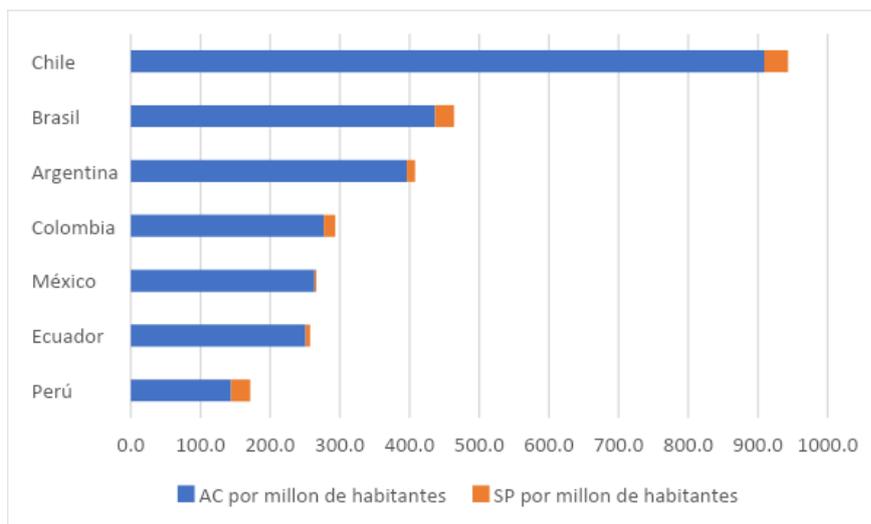


Figura 6

Gráfico de los datos de la Tabla 2 para Latinoamérica por millón de habitantes.

que impacten nuestra sociedad. Esto no puede significar que los científicos tengamos que generar patentes, significa que hay que formar gente con las capacidades necesarias para hacerlo. Debemos recordar que, décadas atrás, Corea del Sur era un país agrícola, lo que vino a cambiar por las decisiones de los dirigentes del país quienes decidieron hacer de Corea un país cuya educación se basa en las matemáticas y las ciencias: el resultado es evidente. Ellos generaron un ecosistema, muy similar al de Alemania, en el cual conviven universidades, centros de investigación básica y centros de investigación aplicada, los cuales, de forma coordinada, trabajan para fortalecer las actividades productivas del país. Quizás, en medio de la actual discusión constituyente, la comunidad científica tecnológica deba hablar más fuerte que nunca para que se genere la infraestructura necesaria, ya que, como los datos lo muestran, **no podemos violar una de las leyes de la física más relevantes, LA CAUSALIDAD**. Sin un cambio importante en la inversión y la infraestructura, no podremos ser actores en el siglo XXI (ni en ningún siglo) si seguimos utilizando la misma receta.

### Referencias

- [1] <https://www.nature.com>
- [2] <https://www.science.org>
- [3] <https://datos.bancomundial.org>
- [4] datos informados en el sitio web <https://countryeconomy.com>
- [5] <https://clarivate.com/products/web-of-science/>
- [6] <https://www.wipo.int/portal/en/index.html>
- [7] Banco mundial, <https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS>
- [8] Banco mundial, <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD>
- [9] Datosmacro, <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-consumo>
- [10] Banco mundial, <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL>
- [11] Colección principal Web of Science.
- [12] World Intellectual Property Organization, [https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo\\_pub\\_941\\_2021.pdf](https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_941_2021.pdf)



Universidad Central



# CONOCE NUESTROS

# POSTGRADOS

Tan flexibles como tú necesitas

[www.ucentral.cl](http://www.ucentral.cl)