

TAXONOMÍA DE LOS SISTEMAS DE INNOVACIÓN. HETEROGENEIDAD DE ESTRUCTURAS DE INNOVACIÓN DESDE LA TEORÍA DE GRAFOS

Taxonomy of Innovation Systems: Heterogeneity of Innovation Structures from Graph Theory

Héctor Eduardo Díaz Rodríguez¹

Mario Alberto Morales Sánchez²

RESUMEN

En este artículo se analizó la teoría de los Sistemas de Innovación (SI) destacando su carácter heterogéneo y la influencia de factores estructurales en la capacidad de innovación de los países. Con el uso de las metodologías de análisis de clúster y teoría de grafos se identificaron configuraciones diferenciadas que reflejan desigualdades significativas en variables clave como financiamiento, generación y uso de conocimiento y exportaciones de alta tecnología. Propone una tipología de sistemas: 1) sistemas de altas capacidades de generación de conocimiento, 2) sistemas con alto financiamiento y exportación tecnológica, 3) sistemas orientados a la innovación industrial, y 4) sistemas de aprendizaje, caracterizados por la dependencia tecnológica y baja integración. Se concluyó que las políticas de ciencia, tecnología e innovación (CTI) deben diseñarse considerando estas diferencias, fortaleciendo el financiamiento, articulación entre actores y capacidades de absorción, para promover una innovación más inclusiva y adaptada a las necesidades específicas de cada contexto.

Palabras clave: Sistemas de innovación, políticas de CTI, teoría de grafos, análisis de clúster.

Códigos JEL: O31, O38, C63, C38

¹ Universidad Autónoma Metropolitana: <hdiaz@correo.xoc.uam.mx>.

² Facultad de Economía, UNAM: <almoralesanchez@gmail.com>.

Este trabajo fue apoyado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Dirección General de Apoyo al Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, bajo el proyecto IN304625. Determinantes de la articulación de sistemas de innovación desde una perspectiva internacional comparada.

ABSTRACT

The article analyzes the theory of Innovation Systems (IS), highlighting its heterogeneous nature and the influence of structural factors on countries' innovation capacity. Using methodologies such as cluster analysis and graph theory, differentiated configurations are identified, reflecting significant inequalities in key variables such as funding, knowledge generation and use, and high-tech exports. It proposes a typology of systems: 1) systems with high knowledge generation capacities, 2) systems with strong funding and technological export focus, 3) systems oriented towards industrial innovation, and 4) learning systems, characterized by technological dependency and low integration. It concludes that science, technology, and innovation (STI) policies should be designed with these differences in mind, strengthening funding, actor articulation, and absorptive capacities to foster more inclusive innovation tailored to the specific needs of each context.

Keywords: Innovation systems, STI policies, graph theory, cluster analysis.

JEL codes: O31, O38, C63, C38

1. Introducción

La teoría de la innovación analiza cómo se producen, adoptan y difunden nuevas tecnologías, procesos y productos en entornos de organizaciones, sectores y países en contextos institucionales específicos (Nelson et al., 2018). La teoría de los Sistemas de Innovación (SI) amplía y complementa la teoría de la innovación enfocándose en los actores, instituciones e interacciones que determinan cómo ocurre la innovación en un entorno determinado (nacional, regional o sectorial).

Una veta de la teoría de los Sistemas de Innovación analiza los factores que en distintos niveles (micro, meso y macro) inciden en la capacidad de innovación de los países y regiones. A la sazón, y con variaciones en los énfasis, esos factores son: 1. Conocimiento, 2. Financiamiento, 3. Capacidades de Absorción, 4. Marco institucional, 5. Vínculos con capacidades industriales, y 6. Producción de tecnología.

Cada uno de esos elementos posee funciones y características específicas, pero en conjunto se entrelazan y estructuran en forma de sistemas, cuyo funcionamiento armónico tiene como resultado la aparición regular de procesos de innovación.

Siguiendo ese marco teórico, el desarrollo de políticas de CTI específicas que orienten y articulen su funcionamiento, se convierte en un elemento fundamental para la creación de ambientes de innovación exitosos, y cumple con por lo menos tres funciones sustantivas: 1. Incentivar su desarrollo en donde el sistema o sus elementos constituyentes sean incipientes, 2. Fortalecer los cimientos en donde esos elementos ya existan, y 3. Estructurar la política de CTI con la política industrial, a manera de articular la creación de conocimiento con su aplicación en el aparato productivo.

En algunos países, esos elementos se articulan de mejor manera que en otros. Sin embargo, no se puede soslayar que algunos países, o grupos de ellos, pueden compartir características en términos de las variables que componen sus sistemas de innovación (por ejemplo, el tamaño del esfuerzo dedicado a Investigación y Desarrollo [I+D], o proporción de la población dedicada a actividades de I+D). Sin embargo, tanto la teoría de la innovación como su aterrizaje práctico en políticas de CTI tienden a prestar poca atención a las diferencias estructurales derivadas de distintos niveles de desarrollo entre países.

Hay cierta evidencia que apunta a que más que un funcionamiento lineal y homogéneo de los SI existen diferencias significativas que derivan de factores estructurales que pueden estar vinculados con los niveles de desarrollo (esta evidencia se aborda en la sección 3).

Considerando lo anterior, este artículo tiene el objetivo de proponer una taxonomía de los sistemas de innovación, identificando las diferencias estructurales que los caracterizan y mostrando cómo dichas configuraciones inciden en la capacidad de innovación de los países. Así, el trabajo da cuenta, por una parte, de la heterogeneidad de los factores que componen los sistemas y, por otra, propone un marco teórico y empírico para estudiar y clasificar esa diversidad.

Se parte de la hipótesis de que, si se consideran esas diferencias, el impacto de cada factor sobre la capacidad de innovación no es homogéneo, sino que se encuentra filtrado por factores vinculados con el nivel de desarrollo de los países y la calidad de la articulación de los vínculos entre sus componentes, entre otros factores. En otros términos, existen distintas configuraciones de los factores que inciden en la capacidad de innovación, por lo que no es factible analizar a los procesos de innovación a partir de una teoría homogénea, debido a las diferencias derivadas de factores estructurales, como el nivel de desarrollo.

En esa dirección, este estudio busca contribuir a la construcción de una teoría que considere la heterogeneidad de los sistemas de innovación y que, derivado

de ello, reconozca que las trayectorias de innovación no pueden analizarse mediante esquemas uniformes (como típicamente se hace en la teoría de los si). La propuesta de taxonomía desarrollada busca responder a ese faltante, ofreciendo una clasificación que refleja la diversidad estructural de los sistemas y sus implicaciones para el diseño de políticas de CTI.

Con ese objetivo, esta investigación se estructura de la siguiente forma: en la sección posterior a esta introducción se desarrolla la revisión de la literatura; en la sección tres se establecen los hechos estilizados que dan origen a la hipótesis relacionada con distintas configuraciones de si. En la cuarta sección se describen las bases de datos y metodologías (análisis de clúster y teoría de redes o grafos) que permiten realizar el análisis empírico y la contrastación de la hipótesis. En la sección quinta se presentan los resultados y en la sexta se discuten sus implicaciones y se propone una taxonomía de sistemas de innovación, que puede funcionar tanto en términos teóricos como empíricos; por último, en la séptima se estructuran las conclusiones.

2. Revisión de la literatura

La comprensión del proceso de innovación ha evolucionado con el tiempo. En el inicio, se consideraba un fenómeno que ocurría prioritariamente en las empresas, dependiente en alto grado de las habilidades de empresarios visionarios (Schumpeter, 1939; 2021), y como un proceso endógeno en condiciones de desequilibrio (Yoguel et al., 2013). En esta concepción seminal se asumía que la inversión en investigación científica básica es capaz por sí sola de producir de manera lineal productos capitalizables en el mercado.

A lo largo del último siglo, esa concepción de innovación ha sufrido modificaciones sustantivas, hasta conceptualizarse recientemente como un proceso social que depende del funcionamiento de un sistema que opera en diferentes niveles (nacional, regional o sectorial; Nelson et al., 2018). Asimismo, se ha transitado progresivamente de un enfoque lineal de la ciencia hacia una visión de la innovación como resultado de un proceso social, interactivo y complejo (Nelson et al., 2018; Harper, 2018).

El cambio en la comprensión de los factores que influyen en la innovación y de los actores que intervienen en ella se debe, en parte, a la consolidación de un marco teórico en la década de 1980 conocido como la «teoría evolutiva» (Nelson et al., 2018). Autores como Nelson y Winter (1982), Freeman (1987), Lundvall et al.

(2002), Dosi (1988), Hodgson y Lamberg (2018), Metcalfe y Hughes (1993) y Pérez (1996), entre otros, han contribuido a desarrollar esta corriente de pensamiento sobre la innovación.

Esta perspectiva entiende la innovación como un proceso dinámico y endógeno que ocurre dentro de un sistema complejo en el que participan diversos actores con capacidades de aprendizaje y objetivos diversos. Este sistema se encuentra influido por factores que van desde la creatividad empresarial hasta elementos sociales, culturales, de mercado, así como por la creación de leyes, normas y arreglos institucionales. En este marco, la innovación se concibe como un esfuerzo colectivo que surge de la forma en que se estructura y expande el conocimiento tanto en las organizaciones e instituciones que lo producen como en la sociedad en su conjunto (Dosi et al., 2017; Dutrenit, 2009; Pérez, 2010a; Schot y Steinmuller, 2018; UNCTAD, 2021a).

En este punto, el financiamiento es fundamental, ya que el desarrollo y la implementación de actividades innovadoras dependen de flujos de recursos adecuados desde el comienzo. Además, es esencial que los resultados sean económicamente rentables para las empresas y generen beneficios sociales para el Estado. La forma en que se financian estas actividades está influida tanto por la expectativa de ganancias que perciben las empresas como por el valor que el Estado les otorga al considerarlas un motor de crecimiento (Schot y Steinmueller, 2018; Díaz y Morales, 2023).

Autores como Hall y Lerner (2010) han enfatizado que la falta de financiamiento es uno de los principales obstáculos para el desarrollo innovativo, especialmente en las etapas iniciales de desarrollo, donde la distancia entre el conocimiento científico y la materialización de innovaciones en el mercado es más amplia debido a la incertidumbre y el riesgo inherentes.

Debido a ello, el Estado ha desempeñado un rol fundamental en la creación de mercados, contribuyendo a los procesos que impulsaron las revoluciones industriales (Pérez, 2010; 2019; Mazzucato, 2018; 2019; 2022). Más recientemente, su participación ha sido clave en el desarrollo de las Tecnologías de la Información (TI) y en las tecnologías vinculadas a la transición energética. En este contexto, es necesario repensar y teorizar la función del Estado, considerándolo no solo como un facilitador, sino como un actor que colabora en la generación de valor social y actúa como diseñador y creador activo de mercados.

El éxito en la innovación no solo depende del financiamiento estatal y privado, sino también de factores como el nivel general de educación, las habilidades y

capacidades de los trabajadores, aspectos que se relacionan con el concepto de capital humano en la teoría del crecimiento endógeno, que asume que en una función de producción del tipo $Y_t = AK_t^\alpha L_t^{1-\alpha}$ el factor trabajo mejora su productividad en la medida en la que la «calidad» del capital humano sea mayor.

En síntesis, es indispensable la cooperación entre múltiples actores, incluyendo el Estado, el sector privado, las universidades y la sociedad civil, para promover un flujo efectivo de conocimiento que, mediante arreglos institucionales, permita la construcción de sistemas de innovación funcionales (Pérez, 2019).

Esta perspectiva dio lugar a la denominada «teoría de la triple hélice», un marco conceptual desarrollado por Leydesdorff y Etzkowitz (1996) para explicar la importancia de las interacciones entre el gobierno, la industria y la academia en el ámbito de la innovación y su vínculo con el crecimiento. Este enfoque marca un avance respecto a la tradicional visión lineal de la innovación, que se centraba en la transferencia de conocimiento desde la academia hacia la industria, y analiza más el entramado complejo de los procesos de innovación, aproximándose más al concepto de Sistemas de Innovación (SI) (Arocena y Sutz, 2016).

Sin embargo, las condiciones en las que la innovación se desarrolla como un sistema, así como el nivel de enfoque en el que ello ocurre (nacional, regional o sectorial), son objeto de un extenso debate y varían según la naturaleza del sector en cuestión (Dutrénit, 2009). Por ello, es necesario un análisis más detallado sobre la escala de operación del sistema. En este contexto, resulta relevante examinar los factores transversales que, de manera general, se consideran determinantes de la capacidad de innovación dentro de la teoría de los sistemas de innovación (Hodgson y Lamberg, 2018; Schot y Steinmueller, 2018).

El conocimiento es uno de los principales elementos del SI. En los últimos 40 años, las rápidas transformaciones tecnológicas se han basado en la conexión entre el desarrollo científico, los avances tecnológicos y su aplicación económica, lo que ha llevado a algunas teorías a definir a la sociedad actual como una sociedad del conocimiento (Martínez, 2006; Torrent, 2016; Kuhlmann y Rip, 2018).

El conocimiento se relaciona directamente con las capacidades de absorción, entendidas como la habilidad para adquirir, asimilar y aplicar conocimiento externo en una organización. Este concepto, propuesto por Cohen y Levinthal (1990), es clave para la innovación y el aprendizaje organizacional, influyendo especialmente en función de los niveles educativos.

La relación entre conocimiento y capacidades para generar innovaciones depende de cómo los agentes perciben oportunidades dentro de las estructuras de

incentivos institucionales (North, 1994; Hodgson y Lamberg, 2018). La interacción entre instituciones, entorno y entidades sociales y económicas constituye un tercer componente de los SI.

El desarrollo del conocimiento científico requiere como una condición necesaria de financiamiento, pero su naturaleza incierta y el tiempo necesario para convertirlo en productos rentables suelen desviar las señales de inversión hacia otros sectores. Por ello, es necesario reducir los riesgos asociados. Históricamente, el Estado ha asumido esta tarea de forma temporal, facilitando el camino hasta que las expectativas de ganancia atraigan a las empresas privadas, que entonces comienzan a financiar la innovación. El financiamiento es, por tanto, un componente clave de los Sistemas de Innovación, vinculado a la creación de incentivos adecuados para captar inversiones en actividades innovadoras (Mazzucato, 2018; Rangel, 2012; Arocena y Sutz, 2016).

Los elementos descritos (creación de conocimiento, capacidades de absorción, marco institucional y financiamiento) están en mayor o menor medida presentes en los SI. Sin embargo, una característica fundamental de la capacidad de generación de innovaciones es la fortaleza con la que se articulan esos elementos. Una forma en la que típicamente ello se mide (Albornoz, 2009) es mediante las aplicaciones de diseño industrial que de forma indirecta permite aproximar mediciones de la creación de conocimiento, la percepción de oportunidades de rentabilidad en el patentamiento y su aplicación directa a actividades económicas (industriales) (Kuhlmann y Rip, 2018).

Los actores y la forma en la que se encuentran articulados difieren en cada economía (o, en el mejor de los casos, entre grupos de ellas), dando lugar a formas y estilos de innovación con resultados diferenciados, más que a estructuras y recetas de políticas de CTI universalmente válidas (Schot y Steinmueller, 2018).

En años recientes, en algunos estudios se expresa preocupación por analizar comparativamente este fenómeno en economías de alto y bajo ingreso (Lee y Lee, 2020; Malerba y McKelvey, 2020; UNCTAD, 2021b). Estas contribuciones resaltan la importancia de reconocer la heterogeneidad estructural y las trayectorias que puede ser divergentes de los SI, aunque lo hacen con enfoques distintos al de esta investigación.

En muchos países de América Latina, los incentivos, la interacción entre actores y los resultados de sus SI están influidos por su proceso de industrialización. En la primera mitad del siglo XX, la industrialización tardía impulsó un rápido crecimiento económico, pero no se acompañó de investigación científica, ni de

innovación basada en capacidades propias, generando una desconexión entre la producción local de tecnología y las necesidades del sector productivo.

En contraste, los países con industrialización temprana o aquellos que superaron brechas de desarrollo lograron estructuras de *SI* más integradas. Esa integración estableció los cimientos del crecimiento económico de largo plazo de sus economías. A nivel teórico, esas diferencias llevaron a ampliar las conceptualizaciones para entender los *SI*, diferenciándolos por ámbitos de agregación y ocurrencia geográfica, originando los conceptos de sistemas nacionales, sistemas regionales y sistemas sectoriales de innovación (Kuhlmann y Rip, 2018). En esta investigación, ya que la unidad de análisis es el país, la construcción teórica descansa principalmente en el concepto de sistemas nacionales.

3. Hechos estilizados

La primera aproximación para establecer si hay diferencias de los factores que inciden en la capacidad de innovación cuando se consideran los niveles de desarrollo, consiste en segmentar las economías en función de su nivel de ingreso.

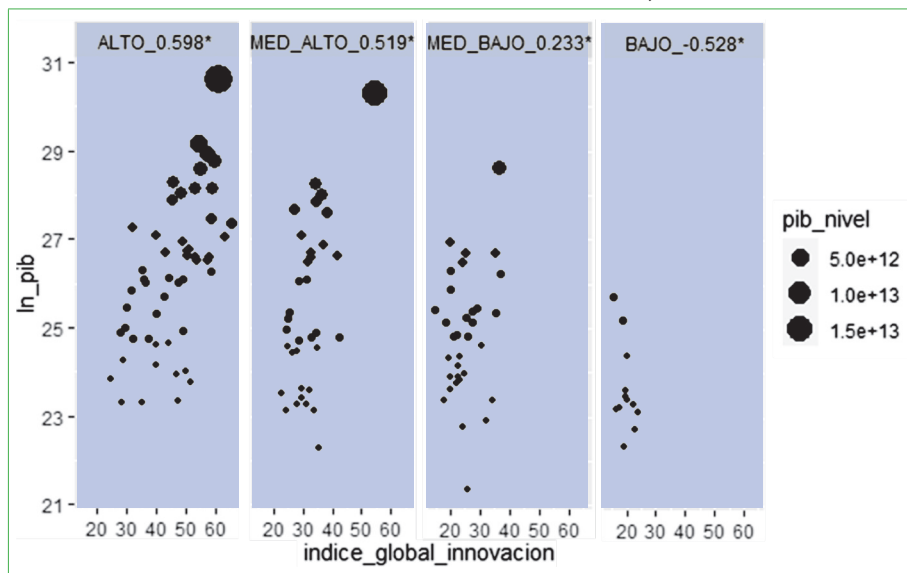
La gráfica 1 muestra la correlación entre la capacidad de innovación de las economías (medida por el Índice Global de Innovación³ [IGI]) y su nivel de producción (logaritmo natural del PIB) dividida en cuatro niveles de ingreso.⁴ Se puede apreciar que, si bien existe una asociación significativa entre ambas variables para el conjunto de países de ingreso alto, dicha asociación tiende a ser más tenue a medida que las economías descienden en el nivel de ingreso, hasta perder toda correlación para países de ingreso bajo.

Ello, en principio, muestra un nivel de correlación no lineal (como suele sugerir la teoría) entre la capacidad de innovación y su impacto en el nivel de producción.

³ El IGI es un indicador que evalúa y clasifica el nivel de innovación de países de todo el mundo y mide la capacidad de las economías para desarrollar y aplicar innovación a partir de siete pilares, constituidos a partir de 81 variables. Es publicado por la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) en colaboración con otras instituciones.

⁴ El nivel de ingreso se calcula mediante el Producto Interno Bruto per cápita, utilizando las medidas estándar de clasificación del Banco Mundial mediante el método Atlas.

GRÁFICA 1. INNOVACIÓN Y NIVEL DE PRODUCCIÓN, 2021



(*) Coeficiente de correlación de Pearson.

Fuente: Elaboración propia con datos del World Bank National Accounts Data, OECD National Accounts Data Files y el Índice Global de Innovación, WIPO.

Si se segmentan los factores que, por una parte, determinan la capacidad de innovación y, por otra, son resultado de ella, es posible analizar algunas diferencias adicionales que permiten profundizar en la importancia del nivel de desarrollo y otros elementos estructurales como factores a tomar en cuenta en el análisis de los procesos de innovación.

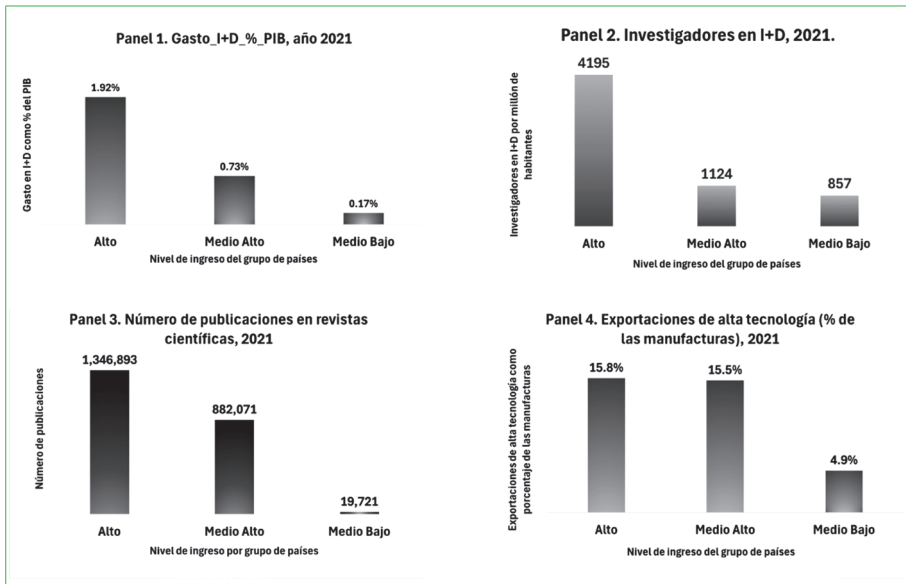
En esa dirección, la gráfica 2 se divide en cuatro paneles; los paneles 1, 2 y 3 muestran variables de entrada de la capacidad de innovación, mientras que el panel 4 es una variable de resultado de esos procesos.

En el caso del panel 1, se observan diferencias significativas en el gasto destinado a actividades de I+D para los tres grupos de países. En términos de esta variable, el grupo de países de altos ingresos invierte en promedio dos puntos porcentuales de su producción para el financiamiento de la investigación y el desarrollo, mientras que los países de ingreso medio-alto destinan el 0.7%; el grupo de países de ingreso bajo apenas el 0.17 por ciento.

El panel 2 muestra el número de investigadores por millón de habitante; de nuevo, se aprecian diferencias significativas para cada nivel de ingreso. El grupo

de países de ingreso alto invierten recursos para contar con 4195 investigadores dedicados a actividades de I+D por cada millón de habitantes, mientras que los países de ingreso medio-alto disponen de una cuarta parte (1124 por millón), y los países de ingreso medio-bajo 857 en promedio. Ello es reflejo de las capacidades de absorción de los países.

GRÁFICA 2. VARIABLES SELECCIONADAS DIVIDIDAS POR NIVEL DE INGRESO



Fuente: Elaboración propia con datos de Banco Mundial, 2024 (2021, último año disponible).

El panel 3 muestra el número total de publicaciones en revistas científicas. De forma acumulada, el grupo de países de altos ingresos produce poco más de 1 millón 300 mil artículos anuales, equivalente al 60% del conocimiento generado en el mundo por ese mecanismo. El grupo de países de ingreso medio-alto publica el 39.2% (882 mil) del total mundial. Cabe resaltar que esta cifra es relativamente elevada por el efecto que genera China, que produce el 75% del total de este grupo de países.

Por su parte, los países de ingreso medio-bajo apenas producen 0.8% del total de publicaciones (19 721). Ello da cuenta de la disparidad en la generación de conocimiento entre países cuando se establece una diferenciación por niveles de ingreso.

Por último, el panel 4 muestra las exportaciones de alta tecnología como porcentaje del valor de sus manufacturas. Se aprecia una relativa igualdad entre los grupos de países de ingreso alto y medio-alto, con cifras de alrededor del 15 por ciento. Ese efecto es resultado de dos factores; por un lado, la disgregación productiva, fruto del desarrollo de producción mediante cadenas globales de valor y, por otro, nuevamente el efecto que China genera en el grupo de países de ingreso medio-alto.

La falta de capacidades productivas, de conocimiento y de innovación de los países de ingreso medio-bajo, no les permite aprovechar beneficios similares de la disgregación productiva de los países de ingreso alto, generando que apenas produzcan el 5% de sus manufacturas como exportaciones de alta tecnología.

En cualquier caso, la información de esta sección muestra diferencias significativas tanto en variables de entrada, como de resultado de la capacidad de innovación cuando se consideran los niveles de desarrollo. Ello sugiere la existencia de procesos no homogéneos y no lineales al interior de los sistemas de innovación, así como la importancia de considerar esas diferencias para analizar la relación entre innovación y crecimiento.

Sin embargo, incluso considerando esos contrastes y agrupando a los países en función de sus niveles de desarrollo, pueden existir diferencias significativas en los factores que conforman sus sistemas de innovación. Esas diferencias pueden estar originadas, en principio, por el tamaño de las economías, la importancia que asignan a actividades de I+D, el volumen de su comercio exterior o distintos patrones de especialización productiva y comercial, y pueden propiciar un entendimiento erróneo de las estructuras de innovación.

Como ejemplo, considérese el caso de dos economías del mismo grupo (ingresos altos y altamente innovadoras) en las gráficas 1 y 2, como son Finlandia y Estados Unidos.

A pesar de pertenecer al mismo grupo en la segmentación anterior, tienen características estructurales radicalmente distintas. Para el año 2023, Finlandia tenía una población de poco más de 5 millones y medio, mientras que la de EE. UU. era de 334 millones de habitantes. Finlandia tenía 7548 investigadores en I+D por cada millón de habitantes, mientras que EE. UU. 4451. Finlandia exporta el 9.9% del total de sus manufacturas como exportaciones de alta tecnología, mientras que EE. UU. el doble. Por último, Finlandia es un país mucho más equitativo en términos de la distribución de su ingreso, con un índice de Gini de 0.26, comparado con un valor de 0.41 para Estados Unidos.

Todo ello da cuenta de que, si bien ambas pueden considerarse como economías desarrolladas, las diferencias en sus características sugieren que deberían tener un tratamiento distinto en cuanto a su agrupación. Una forma de agrupar objetos en función de la similitud que guardan sus características es mediante el análisis de clúster, metodología que aquí se utiliza y que se describe en la sección 4.

Ello, en principio, permite realizar segmentaciones *ad-hoc*, que consideren como punto de partida las diferencias entre los elementos que constituyen los sistemas de innovación. Ello se realiza en las secciones 4 y 5.

4. Datos y metodología

Considerando el marco de la teoría de la innovación descrito en la sección 2, se define aquí el concepto de estructura de Sistema de Innovación como la manera única y particular en que se configuran y conectan los elementos dentro de un sistema de innovación.

Esta configuración y conexión se ven influidas por factores como la dependencia de trayectoria (*path dependence*), así como por políticas industriales y de CTI que modifican las capacidades de las organizaciones y la velocidad de su aprendizaje (Cimoli et al., 2017). Además, la solidez de los vínculos está condicionada por la estructura de incentivos del sistema institucional y por la percepción de rentabilidad, ya sea económica o social, de los agentes tanto públicos como privados.

Desde una perspectiva teórica (Viotti et al, 2022; Quintero, 2010; Cooke, 2005; Dutrenit, 2009), se identifican varios componentes clave en un sistema de innovación: 1) la generación de conocimiento,⁵ 2) el financiamiento, 3) la capacidad de absorción, 4) la estructura de incentivos institucionales, 5) la relación entre el conocimiento generado y su aplicación en la industria, y 6) la producción de tecnología. Esta estructura permite asociar los componentes teóricos con variables proxy, facilitando el análisis de los sistemas de innovación y las estructuras organizativas industriales subyacentes mediante las metodologías seleccionadas.

⁵ Las publicaciones corresponden a todos los campos del conocimiento y la información proviene de las bases de datos del Banco Mundial (2024).

4.1 Datos

Los datos fueron obtenidos de los Indicadores de Ciencia y Tecnología del Banco Mundial (Banco Mundial, 2024). Estos indicadores son métricas cuantitativas para evaluar y monitorear el desempeño y evolución de las economías en áreas relacionadas con la ciencia, la tecnología, la innovación y el conocimiento.

Las variables proxy que representan componentes de los sistemas de innovación, así como sus respectivas definiciones, se muestran en el cuadro 1.

CUADRO 1. CONSTRUCCIÓN DE VARIABLES DEL MODELO

COMPONENTE PROXY DEL SISTEMA DE INNOVACIÓN	NOMBRE DE LA VARIABLE	DEFINICIÓN
Marco institucional	Solicitudes de patentes, residentes	Solicitudes de patente son las solicitudes de patente presentadas en todo el mundo a través del procedimiento del Tratado de Cooperación en materia de Patentes o en una oficina nacional de patentes por los derechos exclusivos sobre un invento, un producto o un proceso que presenta una nueva manera de hacer algo o una nueva solución técnica a un problema. Una patente brinda protección respecto de la invención al dueño de la patente durante un periodo limitado que suele abarcar 20 años
Financiamiento	Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB)	Los gastos en investigación y desarrollo son gastos corrientes y de capital (público y privado) en trabajo creativo realizado sistemáticamente para incrementar los conocimientos, incluso los conocimientos sobre la humanidad, la cultura y la sociedad, y el uso de los conocimientos para nuevas aplicaciones. El área de investigación y desarrollo abarca la investigación básica, la investigación aplicada y el desarrollo experimental
Generación de conocimiento	Artículos en publicaciones científicas y técnicas	Los artículos en publicaciones científicas y técnicas se refieren a la serie de artículos científicos y de ingeniería publicados en los siguientes campos: física, biología, química, matemática, medicina clínica, investigación biomédica, ingeniería y tecnología, y ciencias de la tierra y el espacio
Vínculos con capacidades industriales	Aplicaciones de diseño industrial por parte de residentes	Las solicitudes de diseño industrial son solicitudes para registrar un diseño industrial ante oficinas nacionales o regionales de Propiedad Intelectual (PI) y designaciones recibidas por las oficinas relevantes a través del Sistema de La Haya
Capacidades de absorción	Investigadores dedicados a la investigación y desarrollo (por cada millón de personas)	Los investigadores dedicados a la investigación y desarrollo son profesionales que se dedican al diseño o creación de nuevos conocimientos, productos, procesos, métodos o sistemas, y a la gestión de los proyectos correspondientes. Se incluyen los estudiantes de doctorados (nivel 6 de la CINE 97) dedicados a investigación y desarrollo
Exportación de tecnología	Exportaciones de alta tecnología como % del total de manufacturas	Se consideran exportaciones de alta tecnología a aquellas exportaciones derivadas de sectores intensivos en tecnología avanzada, como los equipos aeroespaciales, productos farmacéuticos, computadoras y maquinaria de precisión, electrónica, y equipos de telecomunicaciones

Fuente: Elaboración propia con base en definiciones del Banco Mundial (2024).

4.2 Metodologías

En esta sección se presentan y describen las metodologías que fundamentan el análisis empírico de la investigación, a saber: análisis de clúster y teoría de grafos.

4.2.1 Análisis de clúster

El análisis de clúster es una técnica estadística considerada como de aprendizaje no supervisado en la ciencia de datos, que tiene como objetivo agrupar observaciones o datos en subconjuntos homogéneos (clústeres o conglomerados), de manera que los datos de un mismo clúster sean similares entre sí (dado un conjunto de características de agrupamiento) y, al mismo tiempo, lo más diferentes posible a las observaciones de otros clústeres (Mackay, 2003).

Así, la metodología de clúster es un método de clasificación de datos que busca separar un conjunto de n observaciones en k grupos, donde cada observación se asigna al grupo, cuyo valor promedio esté más próximo. Existen diversos algoritmos para realizar esta agrupación, pero el que se emplea en esta investigación es el algoritmo de k -medias, el cual permite clasificar N observaciones (cada una representada como un vector real de d dimensiones en un espacio de I dimensiones) en K grupos. Cada grupo se caracteriza por un vector $M(k)$, que corresponde con su media, y se calcula a partir de la siguiente función:

$$d(x, y) = \frac{1}{2} \sum (X_i - Y_i)^2 \quad \dots (1)$$

La ecuación 1 representa el primer paso del proceso de *clustering*, mediante el cual la función distribuye los valores a su media más cercana; el segundo se realiza mediante un proceso de asignación con el cual cada valor de n se agrupa con su media más próxima mediante la función:

$$K^{(n)} = \operatorname{argmin}_k \{d(m^k, x^n)\} \quad \dots (2)$$

El tercer paso se establece con la actualización del proceso de iteración, proceso mediante el cual se recalculan las medias de la ecuación 2 incorporando cada una de las nuevas observaciones, a través del uso del algoritmo:

$$m^{(k)} = \sum_k^{(n)} r X^{(n)} / r^{(k)} \quad \dots (3)$$

En la ecuación (3), el factor $r^{(k)}$ se corresponde con la asignación de la media (k) en el proceso representado por la función:

$$r^{(k)} = \sum_k^{(n)} r \quad \dots (4)$$

El proceso iterativo continúa hasta que cada observación haya sido asignada a su centro más cercano, estado en el que el proceso se detiene.

4.2.2 Análisis de grafos

El análisis de grafos constituye un conjunto de herramientas para modelar y analizar sistemas complejos basados en redes. Se conforma a partir de modelos matemáticos que permiten estudiar estructuras formadas por nodos u objetos y las conexiones que hay entre ellos, denominados enlaces. Tiene como objetivo identificar patrones y estructuras en redes para analizar la interacción de los elementos dentro de un sistema (Aggarwal, 2011).

Formalmente, un grafo G se define a partir de pares ordenados de la forma:

$$G = (V, E) \quad \dots (5)$$

Donde V es un conjunto finito de nodos y E las conexiones entre los nodos.

El grado de un nodo en un grafo dirigido $G = (V, E)$, donde V es el conjunto de nodos y E es el conjunto de aristas, se define como el número de aristas incidentes en V (Fortunato, 2010); para el caso del grado de entrada, se define por

$$deg_{in}(v) = \{u \in V | (u, v) \in E\} \quad \dots (6)$$

$$deg_{out}(v) = \{u \in V | (v, u) \in E\} \quad \dots (7)$$

En el caso de los datos aquí analizados, que representan variables vinculadas con factores de incidencia en la innovación⁶ y países, se trata de grafos dirigidos (del

⁶ Es importante señalar que la variable utilizada como resultado de innovación es el Índice Global de Innovación (IGI), que constituye un indicador integral del desempeño innovador de los países.

país a la variable). Por ello, medidas como el grado y la centralidad de grado⁷ de la red será la misma para cada nodo.

La utilización conjunta del análisis de clúster y de grafos permite, por una parte, clasificar países en función de la similitud de sus características estructurales y, por otra, facilita una representación visual y relacional de esas agrupaciones, evidenciando los nodos centrales, la densidad de las conexiones y la forma en que interactúan los elementos dentro de cada conglomerado. Esta complementariedad metodológica facilita una interpretación de la complejidad con la que actúan los sistemas de innovación.

5. Resultados

Con la aplicación de las metodologías propuestas, se estimaron cuatro conglomerados⁸ representados mediante teoría de grafos para el año 2021⁹ con la intención de establecer distintas tipologías o estructuras de sistemas de innovación en función de las diferencias en las variables que lo constituyen. Para la estimación de los conglomerados, se estimó el promedio normalizado de las variables descritas en el cuadro 1 (Solicitudes de patentes, Aplicaciones de diseño industrial, Gasto en I+D como porcentaje del PIB, Publicaciones en revistas científicas, Investigadores y Exportaciones de alta tecnología) para el año 2021.

En términos de ingreso promedio, los clústeres presentan diferencias notorias: el clúster 1 agrupa economías de alto ingreso, el clúster 2 también corresponde a países de alto ingreso, pero con una configuración particular vinculada al sector externo; el clúster 3 (China) es un caso único, y el clúster 4 agrupa mayormente economías de ingreso medio y medio bajo. Esta clasificación permite analizar de forma distinta la segmentación realizada por niveles de ingreso, ya que los clúste-

⁷ Es una medida que indica la importancia de un nodo dentro de una red. Se define como el número de conexiones directas que un nodo tiene con otros nodos, es decir, es el conteo de las adyacencias de un nodo.

⁸ El criterio para establecer el número de clústeres fue mediante la estimación del índice de silueta, que mide el grado de similitud dentro de un clúster en comparación con los elementos de otros clústeres. Para determinar el número óptimo de clústeres, se calcula el índice para diferentes valores de k , seleccionando el valor de k que maximiza el índice.

⁹ Último año con información disponible.

res permiten identificar configuraciones estructurales diferenciadas más allá de los umbrales de ingreso per cápita¹⁰.

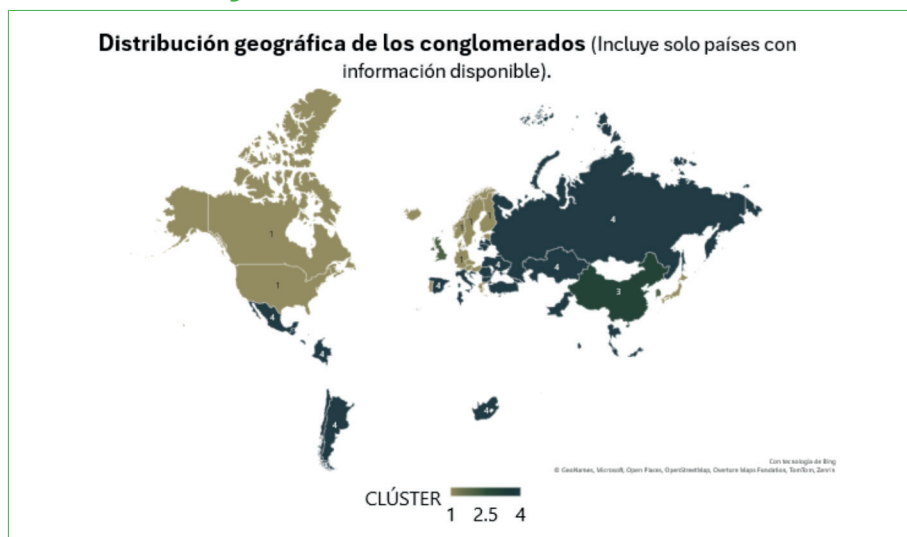
La normalización se lleva a cabo mediante:

$$IN_x = VX_{jt}/VX_{i_max} \quad \dots (8)$$

Donde: IN_x es el índice normalizado de la variable X , VX_{jt} es el valor de la variable X para el país «j», y VX_{i_max} es el valor de la variable X para el país líder. El resultado es siempre un índice que asume valores entre 0 y 1, donde 1 es el valor del país líder. Valores por debajo de 1 representan la distancia de cada país respecto al líder en cada variable.

La gráfica 3 muestra la distribución geográfica de los países analizados; los países pertenecientes a cada clúster se señalan en diferentes colores para su fácil localización en el mapa. Se observa que el clúster 4 es el que abarca extensión geográfica más amplia.

GRÁFICA 3. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS CLÚSTERES DE INNOVACIÓN



Fuente: Elaboración propia con estimación de conglomerados con información del Banco Mundial, 2023.

¹⁰ Si bien futuros desarrollos metodológicos podrían robustecer el análisis mediante la construcción de ratios, como patentes por investigador o publicaciones por habitante.

Posteriormente, se estimó el grafo 1, que muestra los resultados del análisis para el año 2021, último año con información disponible. Como se puede apreciar, se establecen cuatro grupos de países claramente diferenciados, cuyas características se describen a continuación.

Clúster 1. El conglomerado 1 para el año 2021 se encuentra integrado por 16 países,¹¹ en su mayoría economías del ingreso alto. Como conglomerado, concentran una alta proporción de las capacidades de generación de conocimiento produciendo el 47% de las publicaciones científicas del mundo y, en promedio, tienen cerca de 5500 investigadores por millón de habitantes, esto es, cuatro veces más que los países de los clústeres 3 y 4 para ese año. Tienen un marco institucional sólido, generando el 27% de las aplicaciones mundiales de patente, pero vinculan mucho menos esas capacidades con la industria, generando solo el 12% de las aplicaciones de diseño industrial.

Clúster 2. En el conglomerado 2 se encuentra integrado por solo dos países, Corea del Sur y Singapur, hecho que indica que, por sus características estructurales vinculadas a la exportación de alta tecnología, altos niveles de inversión en I+D y el número más grande de investigadores por país, merezcan un tratamiento por separado. Las particularidades de este clúster se discuten en la siguiente sección, aunque en este punto cabe resaltar su alta capacidad de exportación de tecnología, que representa casi la mitad de la totalidad de sus manufacturas.

Clúster 3. Este clúster está integrado por un solo país, China, el que tiene el promedio más alto en términos de las variables analizadas en este estudio (cuadro 1), lo que se refleja en la capacidad de su sistema de innovación y su tamaño en el grafo 1.

Clúster 4. El conglomerado 4 es el más grande en términos del número de países que lo integran con 26 naciones: Chile, Colombia, Costa Rica, Chipre, España, Georgia, Grecia, Guatemala, Croacia, Hungría, Italia, Kazajistán, Sri Lanka, Lituania, Letonia, México, Mauricio, Malasia, Pakistán, Portugal, Rumania, Rusia, Tailandia, Túnez, Turquía, Ucrania y Sudáfrica. En su mayoría, son economías de ingreso medio-alto

¹¹ Los países que integran este clúster son Australia, Canadá, República Checa, Alemania, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Reino Unido, Grecia, Hungría, Islandia, Japón, Noruega, Portugal, Suecia y Estados Unidos.

y medio-bajo. En conjunto, generan el 19% de las publicaciones científicas, el 2% de las solicitudes de patentes y el 9% de las aplicaciones de diseño industrial a nivel mundial.

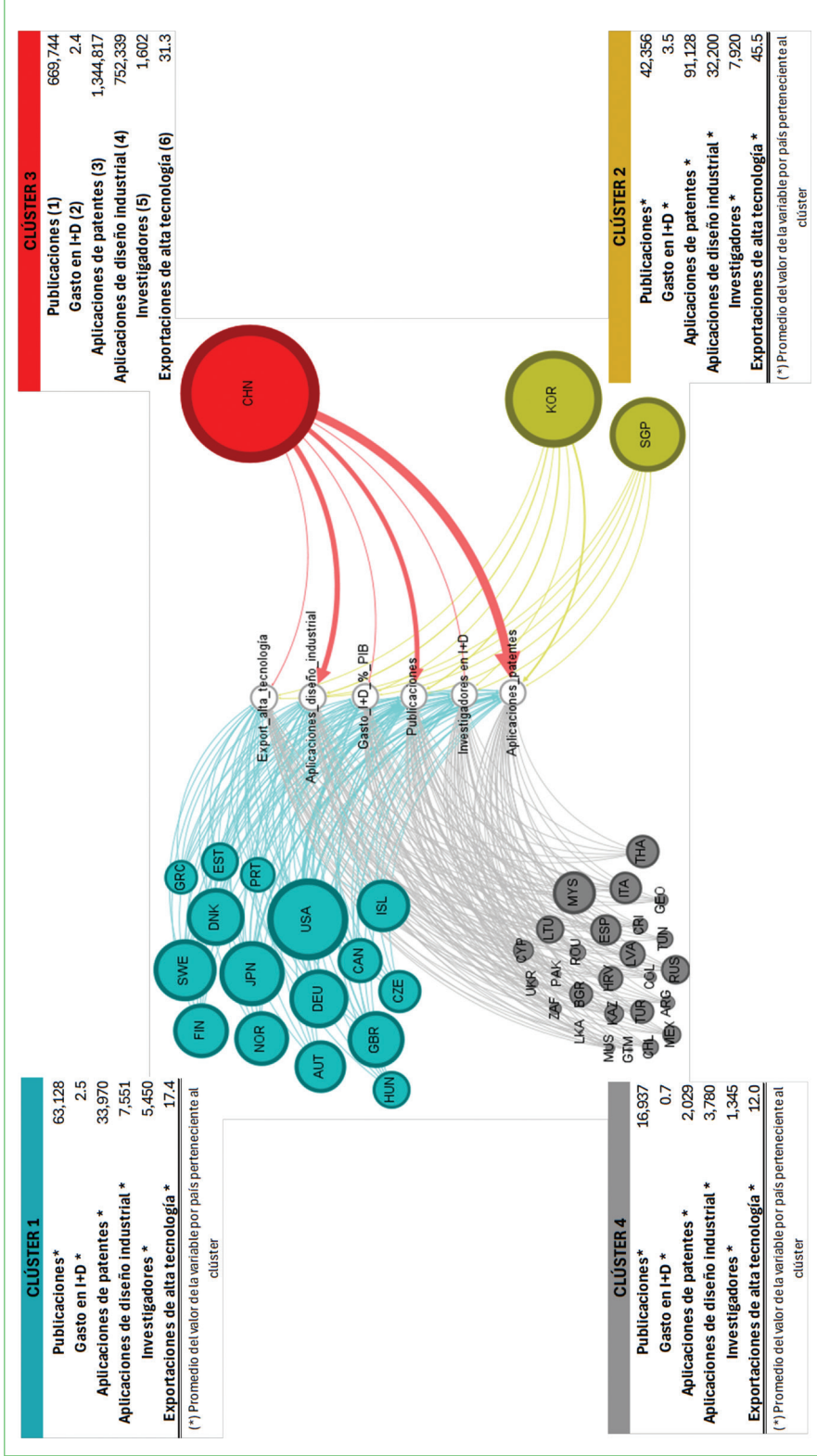
CUADRO 2. DISTRIBUCIÓN DE VARIABLES DEL SISTEMA DE INNOVACIÓN POR CLÚSTER

CLÚSTER	PUBLICACIONES (1)	GASTO EN I+D (2)	APLICACIONES DE PATENTES (3)	APLICACIONES DE DISEÑO INDUSTRIAL (4)	INVESTIGADORES (5)	EXPORTACIONES DE ALTA TECNOLOGÍA (6)
1	47%	2.53%	27%	12%	5,450	17.4%
2	4%	3.48%	8%	6%	7,920	45.5%
3	30%	2.41%	62%	72%	1,602	31.3%
4	19%	0.66%	2%	9%	1,345	12.0%

(1) Porcentaje del total de las publicaciones mundiales.
(2) Promedio de los países del clúster del Gasto en I+D como porcentaje del PIB.
(3) Porcentaje del total de las aplicaciones de patente mundiales.
(4) Porcentaje del total de las aplicaciones de diseño industrial mundiales.
(5) Promedio del número de investigadores por millón de habitantes de los países del clúster.
(6) Promedio de los países del clúster de las exportaciones de alta tecnología como porcentaje de las manufacturas.

Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial, 2023.

GRAFO 1. TIPOLOGÍA DE LOS SISTEMAS DE INNOVACIÓN



*El tamaño de cada nodo (país) se determina normalizando cada variable y calculando la importancia de cada país en el promedio normalizado de la totalidad de los componentes. Entre más grande es el nodo (esfera), más importante es en el promedio de todas las variables normalizadas.

6. Discusión

Los resultados de la sección previa muestran evidencia relacionada con un aspecto fundamental que es necesario analizar para entender la conformación teórica y práctica de los sistemas de innovación, a saber: la conformación de sistemas de innovación heterogéneos con características estructurales diversas.

En este punto, es importante señalar que el análisis empírico (clúster y grafos) se basa en metodologías lineales. Sin embargo, el objetivo es de naturaleza descriptiva y comparativa, es decir, mostrar configuraciones estructurales diferenciadas. Por tanto, los resultados no deben leerse en términos de un proceso evolutivo definido, sino como evidencia en un punto de la diversidad de trayectorias posibles dentro de los sistemas de innovación.

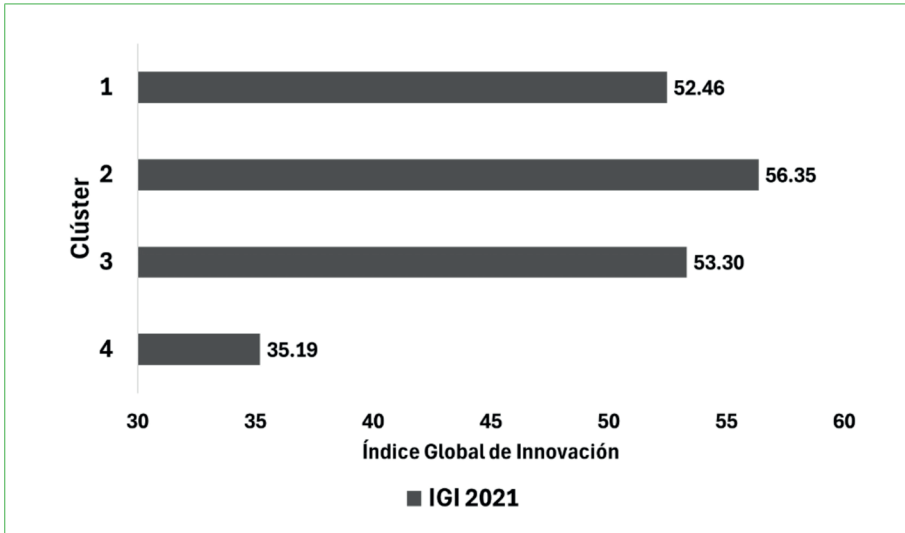
a) Configuración de Sistemas de innovación heterogéneos

La teoría de la innovación descrita en la sección 2 permite entender de manera secuencial la articulación de los elementos que conforman un sistema de innovación. Esa articulación es lineal, es decir, describe situaciones en las que cada elemento se vincula con otro para, de forma secuencial, abonar a la aparición de procesos de innovación.

Sin embargo, los resultados analizados en la sección previa dan cuenta de la conformación de distintas estructuras de innovación, tres de ellas con distintas configuraciones en cuanto a sus elementos, pero relativamente exitosas en la generación de innovaciones. Como se aprecia en la gráfica 4, para el año 2021 el Índice Global de Innovación¹² de los clústeres 1, 2 y 3 es similar, oscilando entre los 52 y 56 puntos, mientras que el conglomerado 4 presenta pobres resultados en términos de innovación.

¹² El Índice Global de Innovación mide la capacidad de innovación de 132 economías en todo el mundo, clasificando los resultados de la innovación en función de 81 variables, entre las que destacan variables del entorno político, educación, infraestructura y creación de conocimiento, entre otras. Se publica por la Organización Mundial para la Propiedad Intelectual.

GRÁFICA 4. ÍNDICE GLOBAL DE INNOVACIÓN POR CLÚSTER, 2021



Fuente: Elaboración propia con datos del Índice Global de Innovación, OMPI, 2023.

Ello aporta evidencia de que más que un sistema de innovación único se debe discutir en términos de «Sistemas de Innovación», con estructuras sistémicas diferenciadas, pero con resultados exitosos en términos de creación de procesos innovativos (conglomerados 1, 2 y 3), y en el caso del clúster 4, «Sistemas de Aprendizaje». Considerando esas características estructurales, es posible establecer una tipología general de sistemas de innovación, descrita a continuación.

Aunque los valores del IGI de los clústeres 1, 2 y 3 son relativamente similares, la diferencia esencial radica en la composición estructural de sus sistemas: alta generación de conocimiento (clúster 1), alto financiamiento y exportación tecnológica (clúster 2) y orientación industrial (clúster 3). De este modo, la taxonomía propuesta se valida no por la magnitud absoluta del IGI, sino por la diversidad de configuraciones internas que el IGI no captura.

Clúster 1. Sistema de altas capacidades de generación de conocimiento. El clúster 1 se caracteriza por contar con altas capacidades en términos de generación y absorción de conocimiento. En promedio, cada país de este conglomerado genera más de 63 mil publicaciones anuales en revistas científicas que, sumadas, representan el 47% de las publicaciones mundiales. Cada país perteneciente a este clúster cuenta

con 5500 investigadores por cada millón de habitantes, lo que representa el 64% del total de investigadores en I+D en el mundo.

En contraste con esas altas capacidades, el clúster muestra una capacidad de patentamiento mucho menor. En cuanto a aplicaciones de patentes, cada país produce 34 mil, es decir, el 27% de las patentes generadas en el mundo, y produce apenas el 12% de las aplicaciones de diseño industrial mundiales (34 mil por cada país integrante). Ese relativamente menor potencial de apropiación del conocimiento que generan tiene como uno de sus resultados una baja capacidad de exportación de alta tecnología (17.5% del total de sus manufacturas), lo que representa la mitad del clúster 3 y casi una tercera parte del clúster 2.

Clúster 2. Sistema de alto financiamiento y exportación tecnológica. Este clúster se caracteriza por contar con el más alto financiamiento para actividades de I+D con el 3.5% de su PIB, lo que representa 50% más que los clústeres 1 y 3 y seis veces más que el clúster 4. Asimismo, se diferencia por contar con altas capacidades de absorción, representado por la más alta cantidad de investigadores en I+D de todos los clústeres, con casi 8 mil por cada millón de habitantes, esto es, 50% más que el clúster 1 (en su mayoría, países desarrollados), y cinco veces más que China y el resto de los países de ingreso medio.

Esa configuración específica tiene como resultado que casi la mitad del total de sus manufacturas (46%) se encuentre volcada al sector externo mediante exportaciones de alta tecnología, lo que representa tres veces más que los conglomerados 1 y 3 y 50% más que China.

Clúster 3. Sistema de innovación de alta capacidad industrial. El clúster 3 está constituido por un solo país, China, que por sus características estructurales no puede ser agrupado con ninguna otra economía. A pesar de no contar con un número elevado de investigadores (1600 por cada millón de habitantes, lo que representa el 1.1% del total mundial), es capaz de generar el 30% de las publicaciones científicas mundiales, lo que le permite estructurarse como un sistema altamente innovador (gráfica 4, ICI) y volcado a en su totalidad a la producción industrial.

En esa dirección, China, como conglomerado único, genera el 62.3% de las aplicaciones de patentes a escala mundial y casi tres cuartas partes de las aplicaciones de diseño industrial del orbe (72%). La combinación de alta capacidad de generación de conocimiento volcada al sector industrial les permite exportar 31.3% del total de sus manufacturas como exportaciones de alta tecnología.

Esa conformación como sistema y orientación industrial tiene su origen en los programas de planificación y desarrollo estatal de China, como el programa *Made in China 2025*, que busca posicionar a China como líder mundial en sectores tecnológicos clave, como inteligencia artificial, biotecnología, robótica y vehículos eléctricos (Valencia, 2021). Estos resultados sugieren, por lo menos, la dirección que adoptará en los siguientes años el liderazgo tecnológico con China a la cabeza, si bien es claro que es necesario analizar la dinámica evolutiva de cada conglomerado para entender esa trayectoria.

Muestra de ello es que China pasa de tener 359 274 publicaciones en 2013 a casi el doble (669 744) en 2021, con solo un incremento de 0.4 puntos porcentuales del gasto en I+D, lo que nos habla de mayor eficiencia en la generación de conocimiento y su aplicación práctica en las esferas industriales.

Clúster 4. Sistema de aprendizaje. El conglomerado 4 es el más grande en términos del número de países que lo integran y se halla constituido por economías que prácticamente no generan innovaciones (ICI de 35 puntos), con bajas capacidades de generación de conocimiento (3.7% de las publicaciones mundiales) y absorción del mismo (1300 investigadores por millón de habitantes), y muy bajo financiamiento a actividades de I+D (0.6% del PIB en promedio). Esa configuración estructural de sus sistemas de innovación tiene, además, el rasgo de que sus elementos constituyentes se encuentran débilmente vinculados entre sí, lo que tiene como resultado una baja apropiación y articulación con el sector industrial. Como clúster, apenas genera el 2.5% de las aplicaciones mundiales de patentes (a pesar de ser el clúster más grande en cuanto al número de países que lo integran) y tan solo el 9% de las aplicaciones de diseño industrial.

Los factores anteriores resultan en una vinculación débil con el sector externo en términos de exportaciones de alta tecnología, con apenas el 12% del total de sus manufacturas.

Por las características anteriores resulta difícil conceptualizarlo como un sistema de innovación en el sentido tradicional del término (de la teoría descrita en el apartado 2), siendo más factible caracterizarlo como un «sistema de aprendizaje». Ello implica, en principio, que el proceso de cambio tecnológico ocurre de forma distinta en los países no desarrollados y que, por lo general, más que producir innovaciones en sentido convencional del término, está limitado a la absorción de las innovaciones producidas en otras latitudes y a los procesos de aprendizaje que puedan derivar del uso y aplicación de esas innovaciones tecnológicas en sus economías.

En esa dirección, autores como Cooke (2005) distinguen dos tipos de procesos de aprendizaje: 1) el aprendizaje mediante la producción (*learning by producing*), que implica adquirir conocimientos con la práctica, el uso o la interacción en las actividades habituales de producción, y 2) procesos de aprendizaje más avanzados, que abarcan la investigación, la exploración y la combinación de paradigmas tecnológicos para crear nuevas tecnologías. La mayor parte de los países de este conglomerado se ubican principalmente en el primer tipo de proceso; particularmente los países de América Latina siguen esa trayectoria de forma marcada.¹³

Debido a las contrastantes capacidades de los sistemas de innovación de los conglomerados 1, 2 y 3, respecto al 4 es posible anticipar en los próximos años una profundización de la dependencia tecnológica de los países integrantes de este clúster.

No solo se encuentran lejos del liderazgo innovador de los países integrantes del resto de los clústeres, sino que su falta de creación de capacidades internas condiciona la posibilidad de trascender de los sistemas de aprendizaje tipo *learning by producing* hacia sistemas de aprendizaje más avanzados que comprendan procesos de investigación, exploración y aprendizaje para la combinación de los paradigmas tecnológicos.

En síntesis, en oposición a lo planteado por la teoría de la innovación, existe una configuración heterogénea de sistemas de innovación que permite caracterizarlos en función de la estructura de sus componentes; ello nos permite establecer una tipología de 4 sistemas, cada uno con las características específicas descritas en los párrafos anteriores y que sintéticamente son:

1. Sistema de altas capacidades de generación de conocimiento
2. Sistema de alto financiamiento y exportación tecnológica
3. Sistema de innovación orientado a la producción industrial
4. Sistema de aprendizaje

¹³ En el caso de México, algunas de las variables son incluso más bajas que el promedio del grupo al que pertenece, incluso si se comparan con países de América Latina. Por ejemplo, el promedio de investigadores por millón en el clúster al que México pertenece es de 1300, mientras que en México son apenas 310 por cada millón. Para el año de estudio (2021), el Sistema Nacional de Investigadores reportó 33 165 miembros. En el caso de la variable gasto en I+D, en 2021 el promedio del grupo fue de 0.59% del PIB y la de México de 0.39 por ciento.

Esta tipología o arquitectura de los sistemas de innovación permite analizar de cerca la forma específica en la que ocurren los procesos de innovación y aprendizaje, centrándonos en sus características particulares más que en propuestas genéricas de políticas de CTI que parten de una teoría general que, si bien explica satisfactoriamente algunas realidades, es inoperante cuando se aplica a países con características distintas a los países más innovadores.

7. Conclusiones

La investigación confirma que los sistemas de innovación son configuraciones diversas y heterogéneas. Estas diferencias están influidas por factores como el nivel de desarrollo, capacidades de absorción, financiamiento y articulación entre actores, lo que invalida enfoques generalistas para el diseño de políticas de innovación.

Una conclusión fundamental es que los sistemas de innovación no son estructuras homogéneas aplicables universalmente, sino configuraciones diversas que responden a las condiciones específicas de cada contexto. Este enfoque crítico contradice la noción tradicional de que hay un modelo único y replicable de innovación.

En su lugar, se enfatiza que los sistemas de innovación deben analizarse como estructuras dinámicas influidas por factores como 1) los niveles de desarrollo (los países desarrollados presentan sistemas integrados con alta capacidad de generación de conocimiento, mientras que los países en desarrollo tienen sistemas fragmentados y dependientes), 2) capacidades de absorción (la habilidad de los actores para adoptar y adaptar conocimiento externo varía significativamente, dependiendo de factores como la inversión en educación, formación de investigadores y acceso a tecnología); 3) articulación de actores (los sistemas exitosos dependen de la cooperación efectiva entre gobierno, industria, academia y sociedad. En contextos menos desarrollados, estas relaciones tienden a ser débiles o inexistentes), y 4) factores institucionales (las normas, políticas y marcos regulatorios juegan un papel crucial en estructurar los incentivos y las interacciones entre los actores del sistema).

Esta diversidad hace necesario abandonar el enfoque de «recetas universales» y reemplazarlo por estrategias que reconozcan y aprovechen las fortalezas y limitaciones de cada sistema, promoviendo intervenciones específicas que respondan a las necesidades locales.

En esa dirección, se establecen cuatro tipologías de Sistemas de Innovación, cada una con características estructurales específicas, a saber: 1) sistemas con altas capacidades de generación de conocimiento, 2) sistemas con alto financiamiento y enfoque en exportación tecnológica, 3) sistemas orientados a la innovación industrial (como el caso de China), y 4) sistemas de aprendizaje, caracterizados por su limitada capacidad de innovación y dependencia de tecnologías externas. Los países con menor ingreso presentan importantes déficits en financiamiento, generación de conocimiento y capacidades de absorción, perpetuando una brecha tecnológica global.

Asimismo, se resalta la importancia de la articulación de los actores pertenecientes a cada tipo de sistema de innovación. Un sistema de innovación efectivo depende de la cooperación entre el gobierno, la industria y las instituciones académicas. Sin una articulación adecuada, los procesos de innovación tienden a ser menos efectivos, especialmente en economías en desarrollo.

En relación con este punto, se destaca que los países categorizados dentro de los sistemas de aprendizaje enfrentan dificultades significativas para avanzar hacia configuraciones más avanzadas, debido a su limitada capacidad para generar conocimiento propio y vincularlo con su aparato productivo.

Lo anterior tiene implicaciones importantes en términos de políticas de ciencia, tecnología innovación y su vínculo con políticas industriales. Los hallazgos destacan la necesidad de analizar y entender a partir de enfoques diferenciados en la implementación de políticas de CTI, adaptadas a las características específicas de cada país o clúster. Esto incluye el fortalecimiento del financiamiento, desarrollo del capital humano y mayor integración entre actores. Ello sugiere que las políticas industriales y de CTI deben diseñarse de forma diferenciada y adaptativa, basadas en la estructura y capacidades específicas de cada país o grupo.

En esa dirección, el conjunto de políticas debe considerar por lo menos los siguientes elementos basados en las características particulares de cada clúster:

Diseño de políticas diferenciadas. Como primer paso en el diseño de políticas, se debe reconocer la diversidad de sistemas de innovación y, en función de ello, implementar estrategias de desarrollo gradual para sistemas de aprendizaje, enfocándose primero en fortalecer capacidades de absorción y posteriormente en procesos de generación de conocimiento.

Fortalecimiento del financiamiento. Incrementar la inversión en I+D, especialmente en países de ingreso medio y bajo, donde los recursos destinados son significativamente inferiores (promedio de 0.17% del PIB en países de ingreso bajo frente a 2% en países de ingreso alto). Asimismo, se deben diseñar mecanismos de financiamiento público-privado que reduzcan los riesgos para las empresas y faciliten la implementación de proyectos de innovación.

Desarrollo de capital humano. Implementar políticas educativas que formen investigadores y profesionales capacitados para liderar procesos de innovación, así como la promoción de programas de cooperación internacional que permitan la transferencia de conocimientos y la formación de talento en países menos desarrollados.

Articulación de actores. Se debe fomentar la colaboración entre gobierno, academia e industria mediante incentivos, como subsidios, créditos fiscales o fondos concursables. Paralelamente, se pueden establecer plataformas de interacción (como parques tecnológicos, clústeres industriales o laboratorios de innovación abierta) que faciliten el intercambio de conocimiento y recursos.

Por último, los países del clúster 4 son de especial interés, ya que México se ubica en ese grupo. Sin ahondar en particularidades, algunas conclusiones se pueden señalar para este grupo. Para los sistemas de aprendizaje, se sugiere priorizar políticas orientadas a fortalecer las capacidades de absorción mediante inversión sostenida en educación superior y formación de investigadores, variables particularmente bajas en este conjunto de economías y, de forma paralela, crear mecanismos de articulación (casi inexistentes) entre universidades, industria y gobierno, como parques tecnológicos y fondos de innovación conjunta. También se pueden establecer estrategias graduales que permitan transitar desde procesos de aprendizaje por producción hacia esquemas más avanzados de investigación y desarrollo.

Finalmente, hoy no se puede soslayar que ese conjunto de políticas debe partir de un enfoque basado en la sustentabilidad y, en el caso de los países del conglomerado 4, también de la búsqueda equidad. Para ello, se deben priorizar innovaciones orientadas a resolver problemas sociales y ambientales, así como orientadas a reducir desigualdades en el acceso a tecnologías y recursos, garantizando que los beneficios de la innovación sean inclusivos.

Referencias

- Aggarwal, C. C. (2011). *An introduction to Social Network Data Analytics* (pp. 1-15). Springer US.
- Arocena, R., y Sutz, J. (2016). *Innovación y Sistemas Nacionales de Innovación en procesos de desarrollo. Repensando el desarrollo latinoamericano. Una discusión desde los sistemas de innovación*. Universidad Nacional de General Sarmiento.
- Banco Mundial (2024). Indicadores de ciencia y tecnología, DataBank. <<https://datos.bancomundial.org/tema/ciencia-y-tecnologia?view=chart>>.
- Cimoli, M., Dosi, G., y Stiglitz, J. E. (2017). *Los fundamentos de las políticas industriales y de innovación. Políticas industriales y tecnológicas en América Latina* (pp. 467-480). CEPAL. LC/TS. 2017/91.
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity: A new Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128-152.
- Cooke, P. (2005). Regional Innovation System, Asymmetric Knowledge and the Legacies of learning. En: Rutten, R. & Boekema, F. (Eds.), *The Learning Region: Foundations, State of the Art, Future*. Edward Elgar.
- Díaz, H., y Morales, M. (2023). Transferencia tecnológica e innovación sectorial en México. *Análisis Económico*, 38(98), 69-92.
- Dosi, G. (1988). Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation. *Journal Of Economic Literature*, 1120-1171.
- Dosi, G., Pereira, M. C., & Virgillito, M. E. (2017). The Footprint of Evolutionary Processes of Learning and Selection Upon the Statistical Properties of Industrial Dynamics. *Industrial and Corporate Change*, 26(2), 187-210.
- Dutrénit, G. (2009). Sistemas regionales de innovación: un espacio para el desarrollo de las pymes. El caso de la industria de maquinados industriales, Introducción. UAM.
- Fortunato, S. (2010). Community Detection in Graphs. *Physics Reports*, 486(3-5), 75-174.
- Freeman, C. (1987). *Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan*. Pinter.
- Hall, B. H., & Lerner, J. (2010). *The Financing of R&D and innovation*. In *Handbook of the Economics of Innovation* (vol. 1, pp. 609-639). North-Holland.
- Harper, D. A. (2018). Innovation and Institutions from the Bottom up: an Introduction. *Journal of Institutional Economics*, 14(6), 975-1001.

- Hodgson, G. M., & Lamberg, J. A. (2018). The Past and Future of Evolutionary Economics: Some Reflections Based on New Bibliometric Evidence. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 15.
- Kuhlmann, S., & Rip, A. (2018). Next-generation Innovation Policy and Grand Challenges. *Science and Public Policy*, 45(4), 448-454.
- Lee, K., & Lee, J. (2020). National Innovation Systems, Economic Complexity, and Economic Growth: Country Panel Analysis Using the US Patent Data. *Journal of Evolutionary Economics*, 30(4), 897-928.
- Leydesdorff, L., & Etzkowitz, H. (1996). Emergence of a Triple Helix of University—Industry-Government Relations. *Science and Public Policy*, 23(5), 279-286.
- Lundvall, B. Å., Johnson, B., Andersen, E. S., & Dalum, B. (2002). National Systems of Production, Innovation and Competence Building. *Research Policy*, 31(2), 213-231.
- MacKay, D. J. (2003). *Information Theory, Inference and Learning Algorithms*. Cambridge University Press.
- Malerba, F., & McKelvey, M. (2020). Knowledge-intensive Innovative Entrepreneurship Integrating Schumpeter, Evolutionary Economics, and INNOVATION SYSTEMS. *Small business economics*, 54(2), 503-522.
- Martínez, E. (2006). *La institucionalización de la ciencia y la tecnología en América Latina*. RICYT.
- Mazzucato, M. (2018). Mission-oriented Innovation Policies: Challenges and Opportunities. *Industrial and Corporate Change*, 27(5), 803-815.
- Mazzucato, M. (2019). *El Estado emprendedor. Socializar riesgos y recompensas. Propuestas para el Desarrollo* (III), 225-244.
- Mazzucato, M., Schaake, M., Krier, S., & Entsminger, J. (2022). *Governing Artificial Intelligence in the Public Interest*. ucl Institute for Innovation and Public Purpose. Working Paper Series (IIPP WP 2022-12). April, 2, 2023.
- Metcalfe, J. S., & Hughes, K. (1993). *Technology Policy and Innovation Systems from an Evolutionary Perspective. The Future of UK Competitiveness and the Role of Industrial Policy*, 226.
- Nelson, R., & Winter, S. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press.
- Nelson, R. R., Dosi, G., Helfat, C. E., Pyka, A., Saviotti, P. P., Lee, K., & Malerba, F. (2018). *Modern Evolutionary Economics: An Overview*. Cambridge University Press.
- North, D. C. (1994). El desempeño económico a lo largo del tiempo. *El Trimestre Económico*, 61(244 (4)), 567-583.

- Pérez, C. (1996). Nueva concepción de la tecnología y sistema nacional de innovación. *Cuadernos de CENDES*, 13(31), 9-33.
- Pérez, C. (2010a). Dinamismo tecnológico e inclusión social en América Latina: una estrategia de desarrollo productivo basada en los recursos naturales. *Revista Cepal*.
- Perez, C. (2019). *Transitioning to Smart Green Growth: Lessons from History*. In *Handbook on Green Growth* (pp. 447-463). Edward Elgar Publishing.
- Quintero, L. J. (2010). Aportes teóricos para el estudio de un sistema de innovación. *Innovar*, 20(38), 57-76.
- Rangel, M. B. (2012). Aspectos conceptuales sobre la innovación y su financiamiento. *Análisis Económico*, 27(66), 25-46.
- Schumpeter, J. A. (1939). *Business Cycles: A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. McGraw-Hill.
- Schumpeter, J. A. (2021). *The Theory of Economic Development*. Routledge. <<https://doi.org/10.4324/9781003146766>>.
- Schot, J., & Steinmueller, W. E. (2018). Three Frames for Innovation Policy: R&D, Systems of Innovation and Transformative Change. *Research Policy*, 47(9), 1554-1567.
- Torrent, J. (2016). La economía del conocimiento y el conocimiento de la economía. *Oikonomics Revista de Economía, Empresa y Sociedad*, 5.
- UNCTAD (2021a). *Informe sobre tecnología e información 2021*. UNCTAD, ONU.
- UNCTAD (2021b). *Technology and Innovation Report 2021: Catching Technological Waves, Innovation with Equity*. Naciones Unidas. United Nations Digital Library System.
- Valencia, A. (2021). *El Plan Made in China 2025: Desarrollo de industrias 4.0 en China y sus impactos en las relaciones políticas y económicas con sus principales socios comerciales*. Universidad Pontificia.
- Viotti, E. B., Santos, D., Cavalcante, T., Pinho, R., & Costa, L. R. M. D. (2022). Innovation Output Indicators: Relevance for Policies, the EU 2020 Indicator and an Alternative Proposal. *Revista Brasileira de Inovação*, 21.
- Yoguel, G., Barletta, F., & Pereira, M. (2013). De Schumpeter a los postschumpeterianos: viejas y nuevas dimensiones analíticas. *Problemas del desarrollo*, 44(174), 35-59.