

Nivel de desarrollo como determinante de la capacidad de innovación. Evidencia para 132 economías con el uso de redes neuronales artificiales*

Level of development as a determinant of innovation capability. Evidence for 132 economies using artificial neural networks

MARIO ALBERTO MORALES SÁNCHEZ**
HÉCTOR EDUARDO DÍAZ RODRÍGUEZ***

Abstract

Innovation is increasingly recognized as a determinant of the level of economic activity; however, studies that analyze the determinants of innovation do not usually pay attention to the levels of development of the economies in which these processes occur. This paper aims to analyze whether the impact of the factors that determine innovation is the same for economies with different levels of development, or if, on the contrary, there is a differentiated hierarchical order of these factors. To do this, data from 132 countries in the period 2013-2021 are analyzed using artificial neural networks. The results show that the determinants of innovation have a different impact depending on the level of development of the economies. A detailed analysis of the order of impact of the variables that affect innovation allows us to conclude that it is necessary to consider the hierarchical order of the variables to understand how the different innovation processes occur and how they impact the determination of the product per inhabitant, otherwise; public policies aimed at encouraging innovation can be sterile.

Key words: *Innovation, Development, Artificial Neural Networks.*

JEL codes: *O31, O33, C45*

* Agradecemos los valiosos comentarios de los evaluadores y revisores anónimos de este artículo, así como del editor de la revista, Rómulo Chumacero. Sus comentarios han sido fundamentales para el resultado final de la investigación.

** Universidad Nacional Autónoma de México. Email: albertoms@economia.unam.mx

*** Universidad Autónoma Metropolitana. Email: hectorduardo12@hotmail.com

Resumen

La innovación es cada vez más reconocida como factor determinante del nivel de actividad económica; sin embargo, los estudios que analizan los factores determinantes de la innovación no prestan atención a los niveles de desarrollo de las economías en las que estos procesos ocurren. El objetivo de esta investigación es analizar si el impacto de los factores que determinan la innovación es el mismo para economías con distintos niveles de desarrollo, o si por el contrario, existe un orden jerárquico diferenciado de esos factores. Para ello, se analizan datos de 132 países en el periodo 2013-2021 mediante redes neuronales artificiales. Los resultados muestran que los factores determinantes de la innovación tienen un impacto distinto en función del nivel de desarrollo de las economías. Un análisis detallado del orden de impacto de las variables que inciden en la innovación permite concluir que es necesario considerar el orden jerárquico de las variables para entender el cómo ocurren los distintos procesos de innovación y cómo estos impactan la determinación del producto por habitante, de lo contrario; las políticas públicas destinadas a incentivar la innovación pueden resultar estériles.

Palabras clave: *Innovación, Crecimiento Económico, Redes Neuronales Artificiales.*

Códigos JEL: *O31, O33, C45*

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la discusión sobre los determinantes del nivel de actividad económica en los últimos años ha cobrado fuerza la hipótesis que establece que el progreso tecnológico conducido por los diversos procesos de innovación constituye el motor fundamental del crecimiento y, por lo tanto, del nivel acumulado de producción. Dichos procesos de innovación ocurren en determinados contextos geográficos e institucionales y, en conjunto, explican el surgimiento, extensión y permanencia de trayectorias exitosas de crecimiento (Dosi y Cimolli, 1994; Dosi et al., 2003; Watkins et al, 2015; Fagerberg et al, 2018; UNCTAD, 2021). En consecuencia, se asume la existencia de una relación directa entre los diversos factores que explican la innovación tecnológica y el nivel de desarrollo económico. Organismos internacionales como la OECD, el Banco Mundial y la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO por sus siglas en inglés), han enfatizado la importancia que tienen los procesos de innovación en la actividad económica de los países, debido, entre otras causas, a que incrementan la productividad multifactorial en diversos sectores industriales (OECD: 2011, 2010).

La hipótesis que la innovación tecnológica es un factor fundamental del nivel de actividad económica, plantea que la ventaja competitiva de las empresas y las naciones radica en su capacidad para crear nuevos productos, procesos y servicios. Los procesos de innovación dependen de las habilidades y capacidades de las empresas para generar y asimilar conocimiento mediante actividades de investigación y desarrollo aplicadas a nuevos productos y procesos, los cuales se llevan a cabo por personal especializado, así como de su interrelación con la matriz de instituciones nacionales en la que se encuentran insertas, la infraestructura disponible para el desarrollo de dichas capacidades y el grado de desarrollo de los mercados.

Tomando en cuenta lo anterior, la WIPO publica el Índice Global de Innovación en el que se miden 7 dimensiones para determinar el grado de desarrollo innovador a nivel nacional. Estas dimensiones son: 1) instituciones; 2) capital humano e investigación; 3) infraestructura; 4) sofisticación de los mercados; 5) sofisticación en los negocios; 6) los resultados de las actividades tecnológicas y de conocimiento; y 7) los resultados de las actividades creativas. Estas dimensiones están compuestas a su vez de diversos indicadores.

A pesar de la clara correlación positiva entre innovación y actividad económica (véase más adelante), persiste aún una controversia no resuelta por los modelos que miden la relación entre esas variables, relativa a la dirección de causalidad.

Es claro que los países con mayores niveles de producción (y mayor grado de desarrollo) son aquellos que presentan mayores niveles de innovación y desarrollo tecnológico, pero persiste la siguiente interrogante: ¿la existencia de un grado mayor de innovación explica el nivel de actividad económica diferenciada entre países; o bien, ¿la existencia de cierto grado de desarrollo facilita la aparición de procesos innovadores? Sin pretender cerrar ese debate aún abierto, este artículo intenta aportar algunos elementos explicativos sobre la base que existe una correlación positiva (y en todo caso, bidireccional) entre innovación y nivel de desarrollo (medido por el nivel de producción per cápita).

La teoría de la innovación (principalmente, postschumpeteriana) plantea que una parte muy importante nivel de actividad económica tiene como origen la existencia de sistemas integrados que posibilitan la existencia continua de innovaciones. En ese sentido, la innovación es el motor de la actividad económica, de donde se deduce que la innovación causa al nivel de producción por habitante. Partiendo de esa base, se deduce que, es necesario fomentar el desarrollo de aquellos elementos que inciden en la capacidad de innovación de los países mediante políticas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI), como una estrategia de crecimiento.

Si bien, esa idea es valiosa en principio, el presente estudio considera que el desarrollo de los elementos que determinan la capacidad de innovación se

encuentra determinado por factores ligados al nivel de desarrollo de los países, por lo que es necesario prestar atención al nivel de desarrollo como elemento determinante del éxito de políticas de innovación.

Considerando lo anterior, el objetivo de la presente investigación es analizar si los factores generalmente aceptados como determinantes de la innovación y referidos anteriormente, se encuentran determinados por el grado de desarrollo (nivel de producción per cápita) de los países. Dicho de otra manera, se busca determinar si los factores capaces de explicar los procesos de innovación difieren en función del nivel de desarrollo de los países en los que esos procesos tienen lugar.

La hipótesis de la que se parte es que el nivel de producción per cápita y el grado de desarrollo alcanzado incide de manera profunda en los procesos que determinan del nivel de desarrollo tecnológico y, en consecuencia, que los determinantes de los distintos procesos de innovación en las economías de altos niveles de ingreso son distintos de aquellos que se presentan en las economías con niveles de ingreso bajos.

Estos resultados pueden arrojar luz sobre la importancia de determinadas dimensiones para el desarrollo de procesos de innovación en contextos nacionales, en los que el nivel de ingresos per cápita se encuentra por debajo de las principales potencias económicas.

La identificación diferenciada de aquellos factores puede ser crucial para establecer políticas públicas focalizadas que permitan elevar el nivel de innovación y progreso tecnológico en economías con ingresos medios y bajos.

Con la intención de someter a contraste la hipótesis del orden jerárquico de los factores que inciden en la capacidad innovadora depende del nivel de desarrollo alcanzado por los países, se utilizan datos del Índice Global de Innovación de la WIPO para 132 países, durante el periodo 2013-2021. Los países se dividen en 3 grupos en función de su nivel de ingresos (medio-bajo, medio-alto y alto) y mediante la metodología de Redes Neuronales Artificiales se analiza el orden de jerarquía de las dimensiones que explican el progreso tecnológico para cada grupo de países. Los resultados muestran que la importancia y orden de impacto de las variables que determinan los procesos de innovación se modifican en función de nivel de ingresos per cápita de las economías.

El artículo se encuentra estructurado de la siguiente manera: en la siguiente sección se presenta la discusión teórica sobre los componentes más importantes de los procesos de innovación; en el tercer apartado se muestran algunos hechos estilizados relativos a la relación entre nivel de desarrollo e innovación; en el cuarto apartado se analiza la base datos utilizada y se expone la metodología de Redes Neuronales Artificiales (RNA); en el quinto apartado se muestran los resultados y se sintetiza la discusión que se desprende a partir de los mismos; finalmente se exponen las conclusiones.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

El debate económico sobre la relación entre innovación (en ese entonces considerada más bien cómo progreso tecnológico) y crecimiento comienza a mediados del siglo XX con las aportaciones seminales de Solow (1956) y Swan (1956). En particular Solow planteó que una parte importante del incremento del producto nacional no se explica por el rendimiento de los factores productivos, sino por un elemento no considerado que denominó originalmente como “residuo”, el cual posteriormente fue conocido como cambio técnico. Lo que en realidad determina el nivel de actividad económica en algunos países fue un cambio en la naturaleza cualitativa de la función de producción resultado de dos desplazamientos simultáneos: un cambio en su pendiente producto de una modificación en la intensidad relativa de los factores de producción (rendimientos crecientes a escala), y un desplazamiento “hacia arriba” derivado del efecto de la utilización de nuevos insumos tecnológicos. Posteriormente, Schumpeter (1939/2002) propone que el cambio tecnológico mantiene una preeminencia sobre otros factores económicos para explicar las fluctuaciones cíclicas del sistema económico. En este proceso la innovación tecnológica emerge como el elemento dominante. UN mayor nivel de producción se logra por dos vías principalmente: por la participación porcentual creciente en el PIB de los sectores en los que se generan las innovaciones; y por la reconversión acelerada de otros sectores que adoptan los nuevos productos ofertados por los primeros. En consecuencia, existirá mayor producción en aquellos países en los que la innovación tecnológica suscita procesos cíclicos de mejoras continuas en empresas y sectores económicos (Morales, 2018).

A partir de estos aportes seminales sobre la importancia de tecnología en los procesos de determinación del nivel de actividad económica, se han elaborado una gran cantidad de contribuciones que ponen énfasis en la importancia de la innovación como factor determinante del nivel de actividad económica; sin embargo, la mayoría de los esfuerzos, en consonancia con la teoría de la innovación, ha sido desarrollada sin poner especial atención en el nivel de desarrollo de las economías. Ello implicaría, en principio, que todos los factores son igualmente importantes para todos los países, sin importar su nivel relativo de desarrollo. De ahí, la importancia de incorporar el nivel de desarrollo como elemento que puede incidir los factores que determinan la innovación y su impacto en la actividad económica.

Mucha de la literatura desarrollada en esa dirección pone el acento en algún elemento particular del proceso de innovación. A continuación, se exponen brevemente algunos de ellos.

2.1 Importancia de las Instituciones

Algunos teóricos de la innovación han postulado que el surgimiento y evolución de los procesos de desarrollo tecnológico que conlleva la emergencia de innovaciones productivas y organizacionales ocurre dentro de un régimen específico de interacciones organizacionales, que han denominado Sistema Nacional de Innovación (SNI). Desde sus formulaciones originales, el concepto de SNI ha sido definido como una estructura institucional que confiere un soporte amplio, social y organizacional, para la generación y difusión de las nuevas tecnologías, así como un medio de asegurar que dichas tecnologías tengan una influencia amplia y permanente en el conjunto de la sociedad y en el nivel de actividad económica. En este sentido Freeman (1987) establece que el SNI puede conceptualizarse como una red de instituciones públicas y privadas cuya función es principalmente la de promover e impulsar el desarrollo de nuevas las tecnologías. Por su parte, Lundvall plantea una idea más amplia al considerar que todo resultado innovador es una consecuencia directa de un proceso previo de aprendizaje organizacional, por lo que el SNI se encuentra conformado por todos los aspectos de la estructura económica y del entramado institucional que afectan dichos procesos de aprendizaje (Lundvall, 1992).

A su vez, Freeman (1987) denota con el concepto de institución diversos tipos de organizaciones colectivas estructuradas, tales como ministerios o agencias gubernamentales, empresas, organizaciones educativas o de capacitación y estructuras industriales. En el mismo sentido, Nelson y Rosenberg (1993) identifican como actores institucionales del SNI a cierto tipo de estructuras organizacionales, tales como la empresa, los laboratorios industriales de investigación y las universidades que producen personal científico capacitado. En el mismo sentido, Niosi et al (1993) proponen una definición de SNI que de algún modo sintetiza las posturas anteriores al considerar que un sistema donde interaccionan empresas privadas y públicas, universidades y empresas con el objetivo de producir ciencia y tecnología dentro de los límites de las fronteras nacionales. Es un sistema abierto en tanto mantiene intercambios de conocimiento y otros factores con el exterior, pero sus vínculos internos son más fuertes que los externos. Los agentes internos se vinculan entre sí a través flujos financieros, relaciones legales y políticas, flujos tecnológicos, científicos y de información, así como flujos sociales. En términos analíticos, el SNI se define como un conjunto de instituciones interrelacionadas que producen, difunden y adaptan conocimiento tecnológico. Niosi (2002) define a las instituciones como “hábitos, rutinas, reglas, normas y leyes que regulan la interacción entre los individuos y moldean la interacción social”. Este planteamiento consiste en suponer que las organizaciones son una especie de instituciones formales encargadas de establecer los incentivos necesarios para la generación y difu-

sión del conocimiento tecnológico, pro que en el desempeño del SNI también repercute la influencia de otro tipo de instituciones “informales”, tales como los hábitos, normas, etc., cristalizadas en determinadas políticas públicas nivel nacional (North, 1994; Mazzucato, 2014; Golichenko, 2016).

Si bien, el acento se ha puesto en la configuración de factores nacionales para la elaboración de políticas, también existe un ámbito regional que ha sido abordado para analizar el papel de las instituciones y su vínculo con la innovación. Buesa et al, (2006) analizan la configuración de sistemas regionales de innovación para España, concluyendo que, en el caso español, las instituciones regionales son incluso más importantes que los nacionales para determinar la capacidad innovadora regional.

2.2 Capital Humano y Actividades de Investigación

La formación de capital humano en ciencia y tecnología es un antecedente fundamental para la creación de capacidades tecnológicas y de innovación. En tanto que la tecnología es, en última instancia, conocimiento social materializado en nuevos productos y procesos (Antonelli, 2008), el capital humano encargado de generar, almacenar y transmitir dicho conocimiento es un factor clave en la dinámica de innovación a nivel nacional, regional y local.

Si bien puede no existir una correlación directa entre creación de conocimiento e innovación, es posible suponer que a mayor cúmulo de conocimiento social habrá mayores oportunidades para el despliegue de procesos amplios e innovación (desde la generación de nuevas combinaciones exitosas hasta su aceptación e implementación social). Dicho de otra manera, una sociedad con buenos niveles educativos necesariamente tendrá mejores oportunidades para el despliegue de capacidades tecnológicas y de innovación (Pelinescu, 2015).

En el contexto anterior, la formación de capital humano especializado en áreas científicas y tecnológicas resulta crucial en cualquier ámbito de innovación. En tanto que la generación de conocimiento social es, en primera instancia, una actividad de formación y capacitación de recursos humanos, un factor importante a considerar en el ámbito de la medición de las capacidades de innovación en una región es la estructura y la dinámica de la educación (Boztosun et al, 2016). La mayor inversión en recursos humanos se verifica a través de variables específicas como el incremento de la matrícula universitaria en áreas científicas y tecnológicas, la creación de infraestructura para la investigación aplicada, y la calidad de los procesos de enseñanza aprendizaje.

Autores como y Etzkowitz (2000) y Valero y Van Reenen (2016), han planteado que las universidades tienen al menos tres misiones fundamentales que, desde nuestra perspectiva, impulsan el mayor volumen de actividad económica en un contexto determinado. Por un lado, las universidades, más allá de las

tareas relacionadas con el proceso enseñanza-aprendizaje, tienen la responsabilidad de hacer extensivas sus actividades para fomentar el desarrollo de las comunidades y regiones que las albergan. Por otro lado, transfieren conocimiento hacia otros actores (empresas, centros públicos, etc.) que incentiva las actividades de innovación. Y, finalmente, realizan labores de emprendimiento, utilizando el conocimiento generado para crear valor, a través de la creación de *spin-offs* y otros mecanismos que las acercan al mercado al mismo tiempo que generan recursos propios.

La configuración institucional para la formación de recursos y apoyo para el desarrollo de capital humano también constituye un elemento importante que ha sido estudiado en diferentes latitudes; por ejemplo, Afcha & Lucena, (2022), analizan el impacto de los subsidios en I+D en España, encontrando evidencia que estos ejercen un impacto diferenciado en las firmas españolas, aunque en general, los subsidios tienen un impacto pequeño en la generación de conocimiento tecnológico.

2.3 Infraestructura

Diversos autores han enfatizado la importancia de la creación de infraestructura en el volumen de actividad económica (véase por ejemplo Canning *et al*, 1994). Sin embargo, persiste una controversia parecida a la que se refirió anteriormente respecto a la relación innovación y volumen de producción. Algunos autores sostienen que la creación de infraestructura es necesaria para generar procesos de crecimiento acumulado, que se refleje en un mayor PIB, mientras que otros plantean que, antes bien, la mayor actividad económica demanda mayores inversiones en infraestructura (Palei, 2015). Respecto a esta controversia, estudios recientes demuestran que la inversión en infraestructura resulta crucial para mantener el nivel de actividad económica, aunque esta debe verse acompañada de determinadas estructuras institucionales y características económicas que le confieran un soporte adecuado (Salehi y Ramirez, 2003; Palei, 2015)

En el caso particular de la generación de innovación tecnológica parece claro que su aparición y desarrollo depende de la inversión deliberada en cierta infraestructura que le confiera soporte. Tal es el caso, por ejemplo, el caso de la inversión en Tecnologías de la Información y Comunicación. Algunos autores han planteado que, para el caso de países industrializados como Estados Unidos, el volumen de producción y aumento de la productividad han sido acompañados de una fuerte inversión en TIC y en su amplia difusión (Galindo, 2008; Stanley, Doucouliagos & Steel, 2018).

En el caso de los SNI discutidos anteriormente, es claro que su naturaleza es la creación de una infraestructura básica basada en la colaboración

interinstitucional, que garantice adecuados niveles de generación, difusión y asimilación de conocimientos, necesarios para la generación y transmisión de innovaciones en una sociedad.

2.4 Sofisticación de los Mercados

Una característica fundamental que permite evaluar la importancia de los procesos de innovación es el impacto potencial que pueden tener en los mercados. Es sabido que la diferencia más importante entre los procesos de innovación e invención es que, a diferencia de los primeros, los segundos tienen un impacto positivo en los mercados que contribuye con la creación de valor.

Aportaciones seminales como la de Dosi et al., (1990), han permitido establecer que la capacidad de innovación en los países se encuentra fuertemente correlacionada con el desempeño comercial. Una de las características cruciales del proceso de innovación es la difusión paulatina de sus resultados, vía difusión de conocimiento y tecnologías (Castaldini et al., 2009). Uno de los mecanismos principales de difusión del conocimiento tecnológico es el comercio internacional que se realiza entre los países productores de tecnología y los países receptores. Si bien el comercio por sí mismo no garantiza el desarrollo de capacidades locales de innovación, lo cierto es que su existencia facilita el intercambio tecnológico en aquellos países capaces de absorber, copiar o replicar las tecnologías provenientes del exterior.

La sofisticación de los mercados implica que la creación y mantenimiento de vínculos comerciales externos e internos se materializa en la existencia de mercados estructurados para permitir el intercambio entre los productores de tecnología, por un lado, y los consumidores intermedios y finales, por el otro. En la medida en que dichos mercados se consolidan, existe un mayor flujo de conocimiento que facilita los procesos de aprendizaje y la mejora continua de los nuevos productos y procesos. Este círculo de influencia positiva contribuye con el fortalecimiento de los mercados existentes y con la creación de nuevos, los cuales emergen para satisfacer nuevas demandas (Paun, 2019).

2.5 Sofisticación de los Negocios

El término “sofisticación en los negocios” refiere la eficacia de las redes de negocios, las operaciones y las estrategias que desarrollan las empresas para mejorar sus niveles de productividad, eficiencia y obtención de ganancias (Dima et al., 2018). Estudios recientes han encontrado una relación positiva entre la sofisticación de mercado y la generación de innovaciones tecnológicas, así como su relación positiva con un ambiente macroeconómico estable (Kirkkaleli y Ozun; 2019). Esto es así debido a que la sofisticación de los nego-

cios, entendida como mayor calidad en las relaciones comerciales, implica que las empresas de una región aumentan y profundizan sus relaciones con otras empresas y otros agentes, lo que les permite obtener mayores oportunidades de crear valor. Cuando se refiere el término “calidad” no solo se considera una mayor concordancia mutua en los negocios entre dos o más empresas, sino también una estrategia de largo plazo que les permite crear conjuntamente nuevas soluciones tecnológicas, productivas y organizacionales. Implica también la diversificación de relaciones; una empresa con mayor diversificación tendrá mayor probabilidad de absorber conocimientos necesarios para generar nuevas soluciones, pero también tendrá mayor probabilidad de encontrar más y mejores oportunidades de profundizar las relaciones en el sentido referido anteriormente.

A su vez, la sofisticación de los negocios, implica que las empresas, al mismo tiempo que están creando y mejorando sus redes de interacción, permiten la participación de otros agentes en dichas redes (por ejemplo: proveedores locales), permitiendo de esta manera el incremento en las actividades de negocios que tendrán un impacto positivo en el volumen de producción en el mediano y largo plazo, así como en el mantenimiento de la estabilidad macroeconómica necesaria para continuar el proceso de sofisticación de los negocios.

2.6 Resultados de las Actividades Tecnológicas y de Conocimiento

La innovación tecnológica, en última instancia, puede conceptualizarse como la materialización de cierto tipo de conocimiento aplicado. Dicho de otra manera, toda actividad innovadora que despliegue soluciones tecnológicas u organizacionales es en sí misma resultado de actividades cognitivas (Rosenberg, 1982). A partir de este razonamiento es factible proponer que todo resultado innovador es al mismo tiempo un resultado de la actividad cognitiva de un grupo de agentes; aunque no todos los resultados en materia cognitiva necesariamente se traducen en soluciones innovadoras.

Tomando en cuenta lo anterior, diversos organismos internacionales (OECD, UNESCO, Eurostat, etc.) han diseñado una batería de indicadores que midan los resultados de las actividades de innovación. Todos estos organismos coinciden en establecer que es factible medir el avance en los procesos de innovación mediante sencillos indicadores, los cuales son útiles también para comparar el progreso a nivel nacional. Dichos indicadores se relacionan sobre todo con la adquisición paulatina de habilidades de innovación materializadas en patentes, gasto en I+D, etc.; o la modificación de la forma en que se producen y distribuyen los bienes y servicios, lo cual puede manifestarse en la proliferación del trabajo a distancia, o el uso generalizado de lo que se conoce como *e-applications*, comercio electrónico, etc. (Torrent, 2016).

Se considera que los resultados de las actividades de innovación impactan positivamente en el volumen de producción de un país determinado, y que este proceso es cíclico, ya que a mayor grado de desarrollo, mayores posibilidades existen de expandir los procesos que generan innovación. No obstante, estos indicadores de resultado no miden toda la actividad innovadora, principalmente en países de bajos ingresos en los que la innovación puede encontrarse en estados mucho más básicos que en los países desarrollados (Villavicencio et al., 2012).

Un resultado importante, que vincula las actividades institucionales de innovación, la formación de capital humano y el desarrollo orientado de tecnología, son los parques industriales, que han tenido un crecimiento importante en todo el mundo en los últimos 10 años. En general, su creación sigue el objetivo de crear sinergias entre firmas dedicadas a actividades conexas. Albahari et al, (2022), realizan una revisión exhaustiva de la literatura relacionada en el periodo 1987-2021 y encuentran evidencia contrastante sobre la eficacia de estas herramientas (parques industriales) de política de innovación, tecnología y desarrollo local.

2.7 Resultados de las Actividades Creativas

Finalmente, una dimensión importante que recientemente se comienza a tomar en cuenta en los debates sobre los determinantes del desarrollo es lo que se ha denominado “actividades” “economía” o “industrias creativas”. Esta idea implica la consideración de actividades que involucran la novedad como forma principal de justificación y de existencia. Como refieren Boix y Lazzeretti (2011), la creatividad puede ser considerado un paso previo para la innovación, de tal manera que, si se fomenta la creatividad en distintos niveles, podría existir una mayor probabilidad de generar resultados innovadores.

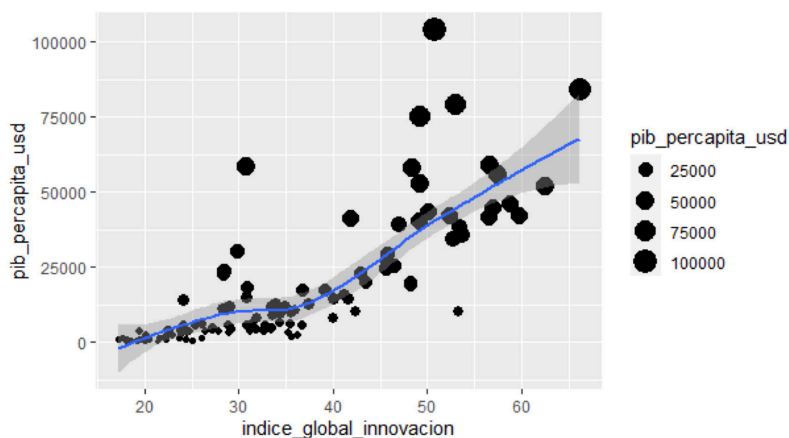
Puede considerarse entonces que la actividad creativa es un paso previo de la innovación, ya que no habrá innovación sin creatividad. Sin embargo, como se ha referido antes, la innovación solo se puede considerar como tal cuando implica una solución de mercado, por lo que no todo proceso creativo generará innovación. Esta reflexión es parcial, ya que no considera un sector de la economía denominado “industrias creativas” que contribuye con un porcentaje creciente al PIB en diversas economías. Se puede afirmar entonces que la creatividad impacta positivamente en el PIB por una vía indirecta que es el proceso de innovación, y por una vía directa que es la emergencia y crecimiento de las industrias creativas (Cunningham & Potts, 2015; Santoro et al., 2020).

3. HECHOS ESTILIZADOS DE LA INNOVACIÓN Y EL NIVEL DE PRODUCCIÓN

De los elementos teóricos descritos, una de las primeras interrogantes que se desprende es si la innovación tecnológica se relaciona con el nivel de producción per cápita. La gráfica 1 muestra la relación que existe entre el nivel de Producto Interno Bruto (PIB) por habitante y la innovación, medida a través del Índice Global de Innovación (IGI).

El patrón mostrado es claro; existe una relación positiva entre capacidad de innovación y capacidad de producción por habitante; adicionalmente, la gráfica 1 muestra lo que parece ser un umbral (establecido a partir de los 40 puntos del IGI) a partir del cual, la acumulación de capacidades de innovación parece detonar en un mayor nivel de producción per cápita. Desde la perspectiva de las fuentes teóricas expuestas anteriormente, existe un proceso de causación circular, en donde se producen circuitos virtuosos en los que ambas variables se retroalimentan a medida que se acumulan capacidades, tanto en los individuos mediante la educación, en las empresas mediante el desarrollo de los mercados y en las instituciones encargadas de generar y diseminar el conocimiento. En ausencia de los elementos que potencian la causalidad, la relación entre innovación y nivel de desarrollo, simplemente es inexistente.

GRÁFICA 1
INNOVACIÓN Y NIVEL DE PRODUCCIÓN PER CÁPITA, 2021



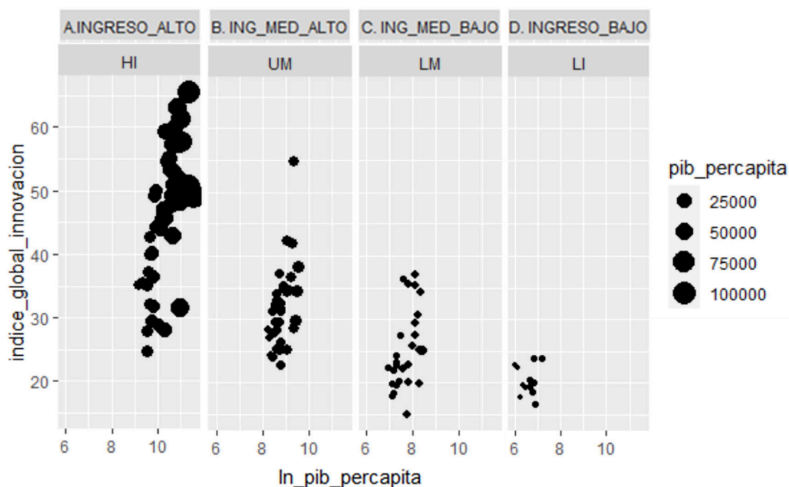
Fuente: Elaboración propia con datos del World Bank National Accounts Data, OECD National Accounts Data Files y el Índice Global de Innovación, WIPO.

La gráfica anterior no solo muestra un patrón estático, sino que indica un proceso dinámico en el que el resultado de los procesos de innovación es acumulativo, y son las economías más innovadoras aquellas que han crecido a mayor velocidad y, por lo tanto, han podido alcanzar mayores niveles de producción por habitante (tamaño de la esfera). Existe un conjunto de países en los cuales no se presentan las condiciones que desde el punto de vista teórico permiten primero, la generación de innovaciones (conocimiento, capacidades, instituciones, financiamiento, etc.) y segundo, el impulso de la innovación hacia una mayor capacidad de producción económica per cápita (derechos de propiedad, aceptación de productos en el mercado, capacidades de adopción de las organizaciones, etc.). En el extremo opuesto, se observa un conjunto de países desarrollados en donde los canales de transmisión de la innovación hacia la producción (y viceversa), son dúctiles y maximizan la probabilidad que una innovación se transforme en mayores niveles de producción por habitante.

Por su puesto, la relación entre innovación y nivel de producción per cápita no es lineal, antes bien, tiende a fortalecerse a medida que los niveles de ingreso per cápita de los países son más altos. Como un segundo elemento que permite analizar la relación planteada, la gráfica 2 muestra la relación entre volumen de producción e innovación, además del crecimiento acumulado a través del tamaño del producto en 2021, dividido por niveles 4 niveles de ingreso; países de altos ingresos (panel A), países de ingresos medios altos (panel B), países de ingresos medios bajos (panel C) y países de bajos ingresos (panel D), así como sus coeficientes de correlación. Diversos patrones se hacen evidentes con esta segmentación.

GRÁFICA 2

RELACIÓN ENTRE INNOVACIÓN Y NIVEL DE PRODUCCIÓN POR NIVEL DE INGRESO PERCÁPITA¹ DE LOS PAÍSES, 2021



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

En primer lugar, a medida que crece el nivel de ingreso, el vínculo entre innovación y tamaño de PIB per cápita se fortalece. En el panel A de países de alto ingreso, el coeficiente de correlación de Pearson entre innovación y volumen de actividad económica per cápita es de 0.70, decrece para el panel B de países de ingreso per cápita medio-alto (coeficiente de correlación de 0.46), baja nuevamente a medida que desciende el nivel de ingreso hacia países de ingreso per cápita medio-bajo (panel C) a 0.41, y se vuelve negativo para el grupo de países del panel D de ingreso bajo (coeficiente de correlación -0.38). De ello, se deduce una clara relación entre nivel de actividad económica per cápita de los países y su capacidad de innovación, lo que sugiere que, en principio, la variable de nivel de ingreso debería tomarse en cuenta para analizar los factores que inciden en la capacidad innovativa de las naciones.

En segundo lugar, para el conjunto de países de altos ingresos, el coeficiente de correlación entre innovación, y tamaño del PIB per cápita (como variable

¹ El criterio de división por panel de ingreso es el producto interno bruto per cápita, mismo que se calcula utilizando las medidas estándar de clasificación del Banco Mundial mediante el método Atlas por la OMPI. Lo que se grafica en el eje de las abscisas es el logaritmo natural del nivel de producción per cápita de las economías. Ello explica porqué dos economías con el mismo nivel de producción, pueden estar en distintos paneles.

acumulada) es el más alto, del orden de 0.70, lo que indica la existencia de un conjunto de factores de causación circular virtuosa; entre mayor es la innovación, mayor es el volumen de producción per cápita y viceversa.

Finalmente, en el extremo opuesto, ocurre lo contrario para el grupo de países de bajos ingresos, en los que se observa que no existe relación alguna entre innovación tecnológica y nivel de actividad económica por habitante (coeficiente de correlación de -0.38). Antes bien, en estos países ocurre un proceso circular pernicioso en el que no existe capacidad de innovación (ni condiciones para generarla) y, por lo tanto, no hay estímulo al nivel de actividad económica; al no haberlo, tampoco hay posibilidad de crear y acumular capacidades de innovación por parte de los individuos, las empresas y las instituciones. En medio de estos dos extremos, la gráfica muestra que el nivel de producción crece a medida que lo hace la capacidad innovadora de los países. Más adelante se profundizará en esta relación entre nivel de ingreso per cápita e innovación tecnológica.

4. METODOLOGÍA

4.1 Base de Datos Índice Global de Innovación

El Índice Global de Innovación (IGI) es un indicador publicado por La Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) que intenta “captar una imagen lo más completa posible de la innovación y comprende 81 indicadores, entre ellos, medidas sobre el entorno político, la educación, las infraestructuras y la creación de conocimiento de cada economía” (OMPI, 2021). Este índice para su construcción utiliza una definición amplia de innovación, basada en el Manual de Oslo.

El modelo GII 2021 incluye 81 indicadores, que se dividen en tres categorías: a) datos cuantitativos/objetivos/duros (63 indicadores); b) indicadores compuestos/datos de índice (15 indicadores); y c) encuesta/cualitativo/subjetivo/datos blandos (3 indicadores). Los 81 indicadores se normalizan en un rango de 0 a 100, de acuerdo con el método min-max, donde los valores “min” y “max” fueron los valores de muestra del indicador mínimo y máximo, respectivamente (OMPI, 2021). A su vez, los 81 indicadores se agrupan en 7 pilares, que son Instituciones, Capital humano, TIC, Sofisticación de mercado, Sofisticación de negocios, Creación de conocimiento y Productos creativos; esos pilares son los que en el presente estudio de utilizan como variables explicativas.

Los indicadores que ofrece el índice pueden utilizarse para analizar y evaluar los resultados y comparar la evolución de las economías en materia de innovación y todo su entorno. En este estudio, las 7 dimensiones propuestas

por el IGI se utilizan para analizar diferencias en grupos de países con distintos niveles de desarrollo² y como variables determinantes de la capacidad de innovación de las economías durante el periodo 2013-2021.

4.2 Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) es una metodología que consiste en una simulación del proceso de aprendizaje del cerebro humano. Cuando se utiliza para el análisis de fenómenos como el que se estudia aquí, cada una de las observaciones representa conocimiento que se almacena para el establecimiento de relaciones funcionales, (lineales o no lineales).

A diferencia de lo que sucede con otros modelos, en donde la forma funcional es seleccionada *a priori* y depende del tipo de variables con las que se trabaja, en las estimaciones mediante redes neuronales, la forma funcional es determinada mediante el propio proceso de aprendizaje, y no depende del cumplimiento de supuestos de “buen comportamiento”³ vinculados al tipo de modelo seleccionado.

De acuerdo con diversos autores (Longoni, et al., 2010; Tavana et al., 2016; Huang & Yang, 2017; Duygun et al., 2018), las RNA son herramientas cuyo potencial consiste en analizar datos con el objeto de descubrir y modelar las relaciones funcionales existentes entre las variables.

Las redes neuronales artificiales tienen varias ventajas sobre los modelos econométricos tradicionales, entre las que destacan:

- Capacidad para aprender patrones complejos: Las RNA pueden aprender patrones en datos complejos que pueden ser difíciles de identificar por los modelos econométricos tradicionales. Esto se debe a que las RNA son capaces de capturar patrones no lineales y de alta dimensionalidad en los datos.
- Flexibilidad en la estructura del modelo: Las RNA pueden tener una estructura flexible que les permite adaptarse a diferentes tipos de problemas y datos. Por ejemplo, las RNA pueden tener diferentes tipos de capas (como convolucionales, recurrentes, etc.) y diferentes funciones de activación para cada capa.

² El nivel de desarrollo de cada país viene dado en la propia base de la Organización Mundial para la Propiedad Intelectual (OMPI), que es quien publica el Índice Mundial de Innovación. Para ello, la OMPI considera las medidas estándar de clasificación del Banco Mundial en cuatro grupos de ingreso: alto, mediano alto, mediano bajo y bajo. Esta clasificación se basa en el ingreso nacional bruto (INB) per cápita (en USD corrientes) calculado usando el método atlas. En general, no hay ningún país que, durante los años estudiados, haya cambiado en el grupo de nivel de ingreso.

³ Por lo general, en los modelos econométricos se asumen supuestos de normalidad, homoscedasticidad, no multicolinealidad, e incluso requerimientos de cointegración, etc., relativos a la forma funcional específica que se tiene cada modelo.

- Mejor capacidad predictiva: En algunos casos, las RNA pueden tener una mejor capacidad predictiva que los modelos econométricos tradicionales. Esto se debe a que las RNA pueden aprender patrones complejos en los datos y generalizar mejor a nuevos datos.
- De manera adicional, permiten explorar relaciones o modelos que no podrían ser descubiertos usando procedimientos estadísticos tradicionales.

En nuestro caso, el modelo de red neuronal estimado permite realizar una estimación cercana de los valores observados de los niveles de producción de las economías en cada grupo de países.

Un modelo de RNA se integra por los siguientes componentes: 1. La capa de entrada y está conformada por las variables que de forma teórica se vinculan con la variable a estimar. 2. La capa oculta, parte de la estructura en donde se genera el proceso de aprendizaje de las neuronas y por último, 3. la capa de salida, y está constituida por las observaciones de la variable a estimar (Díaz, et al., 2019).

La forma específica en la que se estructuran estas tres partes, se denomina arquitectura de red; si bien, existen distintas arquitecturas y tipos de red, aquí se selecciona trabajar con un tipo específico, por la característica que tiene de reaccionar muy rápido a alteraciones o cambios, que son medibles y conocidos, esto es, una red de tipo Perceptrón Multicapa, cuya forma de aprendizaje es de retropropagación.

Como ocurre con las neuronas biológicas reales, la información de la RNA es procesada cuando el estímulo tiene cierta magnitud, de lo contrario se ignora; Aquí, ello se logra mediante un valor umbral m_j , que se activa cuando la suma ponderada supera un valor determinado y solo entonces, se considera la salida efectiva de la información procesada. Es por ello que, a diferencia de lo que ocurre en los procedimientos econométricos, la información redundante queda excluida por el propio procedimiento. Ello se expresa mediante la función:

$$(1) \quad \sum_j w_{ij} x_j - m_i$$

Los umbrales de activación son funciones que representan la intensidad de las conexiones sinápticas (Moreno, 2011), mientras que las capas cumplen con las funciones de recibir información del entorno, generar el proceso de aprendizaje y obtener resultados replicables del fenómeno de estudio, de acuerdo con las siguientes funciones generales:

$$(2) \quad \text{Capa oculta: } a_j^1 = \sum_l W_{jl}^1 X_l + \theta_j^1; \quad h_j = f^1(a_j^1)$$

Por último, se encuentra la capa de salida, compuesta por los conjuntos de neuronas que proporcionan la respuesta de la red, mediante la función:

$$(3) \quad \text{Capa de salida: } a_j^2 = \sum_l W_{jl}^2 X_l + \theta_j^2 ; h_j = h^2(a_j^2)$$

4.3 Entrenamiento de las Neuronas

El proceso de entrenamiento de las neuronas o proceso de aprendizaje permite obtener las formas funcionales de los datos obtenidos procedentes de la capa de entrada y se realiza para un subconjunto de datos $D = \{X^{(n)}, t^{(n)}\}$.

Aquí, de manera gradual, se ajusta la función de entrada W , mediante la minimización del error de la función, a través del método conocido como descenso del gradiente, representado mediante la función:

$$\begin{aligned} J(W_0) &\geq J(W) \\ J(W_{n+1}) &\geq J(W_n) \end{aligned}$$

$$(4) \quad W_{n+1} = W_n - \mu \frac{1}{2} \nabla J_w \Big|_{W_n} = W_n - \frac{\mu}{2} \frac{\partial J_w}{\partial w} \Big|_{w_n}$$

$$(5) \quad E_D(w) = \frac{1}{2} \sum_n \sum_i i (t_i^{(n)} - y_i(x^{(n)}; w))^2$$

La minimización se basa en evaluar continuamente el gradiente de ED mediante la regla de la cadena para encontrar las derivadas (Mariani & Brusoni, 2013; Chen & Shih, 2015; Tavana et al., 2016; Huang & Yang, 2017; Duygun et al., 2018).

El resultado del proceso de minimización mediante el descenso del gradiente, es una aproximación de los valores de la capa de salida, de una muestra reservada del total de datos, distinta a las observaciones utilizadas en proceso de entrenamiento de la neurona.

Si bien, en conjunto, el uso de RNA ha mostrado mejorar la capacidad de ajuste y predicción con respecto a métodos econométricos (Chiok, 2014), hasta hace relativamente poco tiempo no permitía obtener información relativa a la jerarquía con la cual el conjunto de variables explicativas (capa de entrada) impactan a la variable dependiente (capa de salida). Esta “debilidad” ha tratado de ser paliada mediante exámenes que comparan la matriz de pesos sinápticos y su transmisión hacia la capa oculta, con la intención de categorizar y jerarquizar la influencia que tienen las variables de la capa de entrada sobre la variable dependiente (Yegnanarayana, 2009; Da Silva et al., 2017), de la forma:

$$(6) \quad Q_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^L \left(\frac{W_{ij} V_{jk}}{\sum_{r=1}^N W_{rj}} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{i=1}^L \left(\frac{W_{ij} V_{jk}}{\sum_{r=1}^N W_{rj}} \right) \right)}$$

El análisis de jerarquía de las variables permite conocer en términos de orden (no de magnitud de su impacto) la importancia de las variables de la capa de entrada sobre la variable dependiente (Mariani & Brusoni, 2013; Chen & Shih, 2015; Tavana et al., 2016; Huang & Yang, 2017; Duygun et al., 2018; Díaz et al, 2019).

5. RESULTADOS

El cuadro 1 muestra los resultados generales de la aplicación de 3 modelos de RNA realizados, 1 para cada grupo de países⁴. La red neuronal presentada, es la que mejores resultados presenta en términos de minimización del error. Previamente, se corrieron varias redes con distintas características específicas, por ejemplo, distintos tipos de entrenamiento de la neurona (en línea, en lote, en mini-lote), con distintos algoritmos de optimización (descenso del gradiente, gradiente escalado conjugado), así como distintas funciones de activación de las capas ocultas (tangente hiperbólica y sigmoide) y de salida (identidad, softmax, tangente hiperbólica y sigmoide).

En el caso de las funciones de activación de la capa oculta de las tres redes neuronales (de los tres grupos de países), se utilizó la función tangente hiperbólica debido a que cumple con las siguientes funcionalidades: en primer lugar, tiene un rango de salida acotado ($-1 < \tanh < 1$), que asegura que la salida de la neurona no se desborde ni se desvanezca a medida que se propague hacia adelante en la red. Esto permite que la red sea más estable y fácil de entrenar. En segundo lugar, la no linealidad, lo que implica la posibilidad de modelar relaciones no lineales entre las entradas y las salidas de la neurona, en caso de un fenómeno estudiado no lineal. En tercer lugar, son simétricas, alrededor del origen, lo que implica que tiene la misma forma en ambas direcciones y por último, la función \tanh posee una derivada bien definida, fácil de calcular y no tiene puntos de discontinuidad. Esto es importante en el proceso de entrena-

⁴ Si bien, en la gráfica 2 se muestran 4 agrupaciones, para el grupo países de bajos ingresos no se pudo estimar un modelo de RNA ya que el número de observaciones es insuficiente para efectuar el proceso de entrenamiento de la neurona. Ello ocurre debido a que el número de países es menor (11 países para cada año) que en el resto de los grupos.

miento de la red neuronal, donde se utiliza la retropropagación del error para ajustar los pesos de las neuronas.

Por su parte, La cantidad de unidades en la capa oculta de una red neuronal artificial es un hiperparámetro importante que se selecciona durante la construcción y entrenamiento del modelo. En el caso de las 3 RNA estimadas, se realizó un procedimiento de selección en donde el número menor sea 1, y el número máximo sea 50 unidades.

Si la cantidad de unidades en la capa oculta es muy pequeña, el modelo puede tener dificultades para capturar patrones complejos en los datos y, por lo tanto, no será capaz de generalizar bien a datos nuevos. Por otro lado, si la cantidad de unidades es demasiado grande, el modelo puede sufrir de overfitting, donde se ajusta demasiado bien a los datos de entrenamiento y no puede generalizar bien a datos nuevos.

Por lo tanto, la elección del número de unidades en la capa oculta es un trade-off entre la complejidad del modelo y su capacidad para generalizar bien nuevas observaciones. En nuestros 3 modelos, se comenzó con una cantidad moderada de unidades y se fue ajustando a medida que el entrenamiento de la neurona permitía que la validación cruzada para encontrar la cantidad óptima se ajustaba mejor para los datos y el problema específico de las variables de innovación sobre el PIB per cápita.

La capa de entrada (o conjunto de variables independientes) se encuentra por los 7 pilares del Índice Global de Innovación descritos anteriormente (secciones 2 y 4.1). Para comprobar la validez empírica de utilizar como variable dependiente el nivel de producción per cápita y como independientes los pilares del IGI, se recurrió a la realización de pruebas econométricas de exogeneidad débil⁵. Aquí, definimos exogeneidad débil como la ausencia de correlación entre los errores del modelo de regresión y las variables explicativas (Angrist & Pischke, 2009). Los resultados se incluyen en el anexo 1.

La función de activación de la capa oculta fue, en los 3 casos, tangente hiperbólica.

Por su parte, la capa de salida está constituida por la variable logaritmo natural del Producto Interno Bruto per cápita, con un método de cambio de escala estandarizado, una función identidad de activación de la capa de salida y de suma de cuadrados para la función de error.

⁵ Si bien, la metodología de RNA no requiere estrictamente del cumplimiento de los supuestos de comportamiento de los datos, el desarrollo del modelo econométrico obedece a la necesidad de plantear empíricamente la exogeneidad de las variables independientes, esto es, comprobar empíricamente que las variables de innovación pueden ser planteadas en un modelo como exógenas. Si bien, existen distintas técnicas para comprobar la existencia de exogeneidad, aquí se utilizan los residuos estandarizados y se correlacionan con las variables independientes. La validación se realiza mediante la inspección de gráficas de dispersión y el análisis de coeficientes de correlación. Ambos se reproducen en el anexo 1.

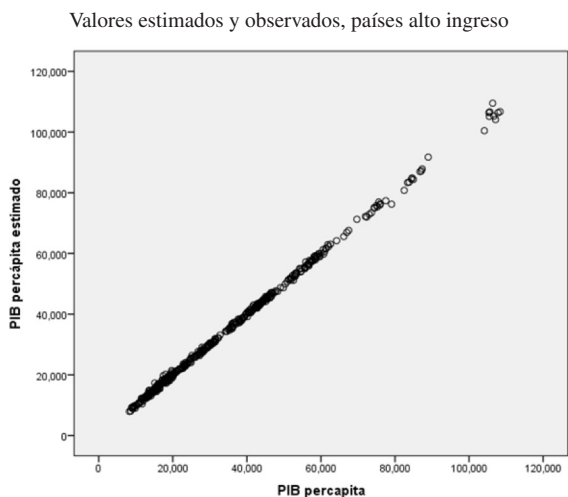
TABLA 1
DATOS DE ESTIMACIÓN DE LA RNA

Información de red				
		RNA ALTO	RNA MEDIO ALTO	RNA MEDIO BAJO
Capa de entrada	Observaciones	443	295	226
		1_Instituciones		
		2_Capital_humano_e_investigación		
		3_Infraestructura		
		4_Sofisticación_de_mercado		
		5_Sofisticación_de_negocios		
		6_Conocimiento_y_tecnología		
		7_Productos_creativos		
Número de unidades ^a	1868	1302	1079	
Capas ocultas	Número de capas ocultas	1	1	1
	Número de unidades en la capa oculta 1 ^a	10	10	6
	Función de activación	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica
	Variables dependientes	ln_PIB_percapita	ln_PIB_percapita	ln_PIB_percapita
Capa de SALIDA	Número de unidades	1	1	1
	Método de cambio de escala para las dependientes de escala	Estandarizados	Estandarizados	Estandarizados
	Función de activación	Identidad	Identidad	Identidad
	Función de error	Suma de cuadrados	Suma de cuadrados	Suma de cuadrados
a. Se excluye la unidad de sesgo				

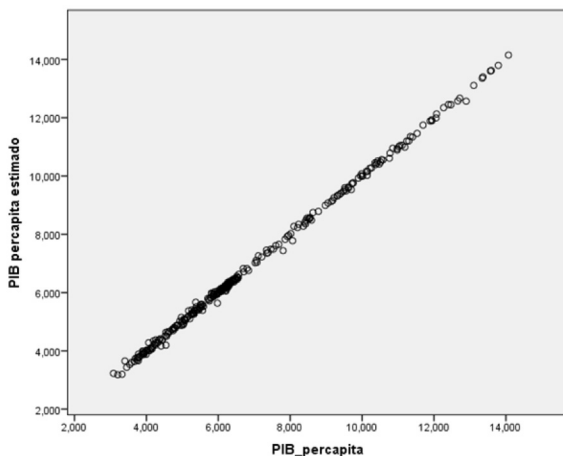
Fuente: Estimación propia con base en datos provenientes de OMPI, 2021

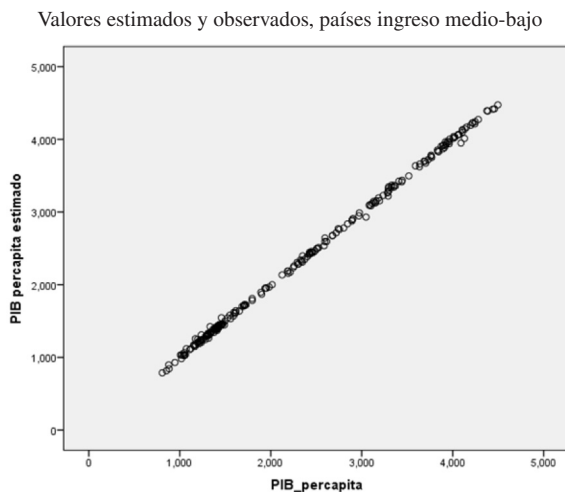
Los resultados indican que los procesos de entrenamiento de las neuronas se llevan a cabo de forma tal que se alcanza la minimización de los errores y las estimaciones de los valores del logaritmo natural de producción per cápita por las RNA son muy cercanos a los valores observados para los tres grupos de países (véase gráfica 3).

GRÁFICA 3
VALORES OBSERVADOS Y PRONOSTICADOS DEL PIB PER CÁPITA
POR LOS MODELOS DE RNA



Valores estimados y observados, países ingreso medio-alto





Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones de RNA con datos del IGI, 2013-2021.

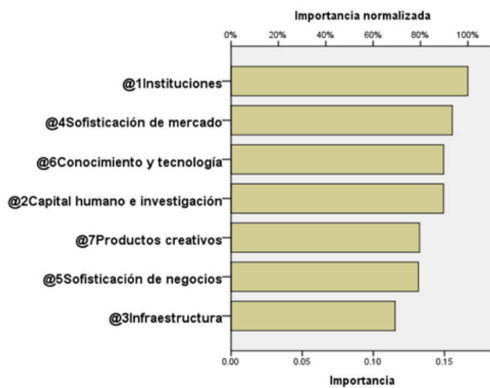
Para el grupo de países de ingresos altos, el error promedio de estimación de los valores de la producción del modelo de RNA es menor al 3.8%, mientras que para el grupo de ingresos medio-altos es del orden de 3.9% y para el grupo de ingresos medio-bajos es de 4.3%. Lo anterior implica que los 7 pilares del Índice Global de Innovación permiten aproximar de manera adecuada los procesos de producción por habitante de cada uno de los grupos de países. Sin embargo, lo que resulta valioso en términos del análisis aquí propuesto, es entender si esas variables impactan de manera diferenciada para cada grupo de países los procesos de determinación del nivel de producción per cápita, o, por el contrario, no existe orden jerárquico y todas las variables son igualmente importantes para determinar el nivel de producto por habitante de las naciones.

Para determinar lo anterior, se realizó dentro del modelo de RNA un análisis de la importancia de las variables⁶, que permite establecer un orden de jerarquía de impacto de las variables de la capa de entrada sobre la variable dependiente. Los resultados de este análisis se pueden apreciar en la gráfica 4; el hecho que exista un diferente orden jerárquico de las variables para cada grupo de países permite corroborar, de manera general, la hipótesis relativa a que el nivel de desarrollo (aproximado aquí por el nivel de ingreso per cápita) es un determinante de los factores capaces de explicar los procesos de innovación.

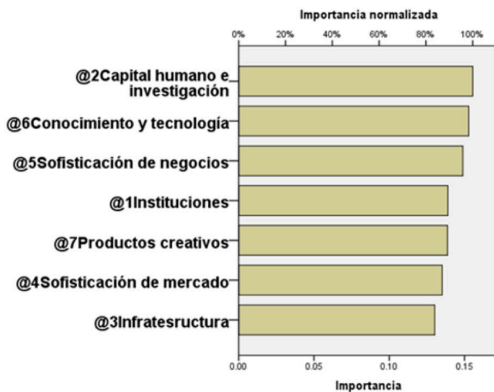
⁶ Este análisis corresponde a la estimación de la ecuación 6.

GRÁFICA 4 COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS DE LA IMPORTANCIA DE LA VARIABLE MODELOS RNA

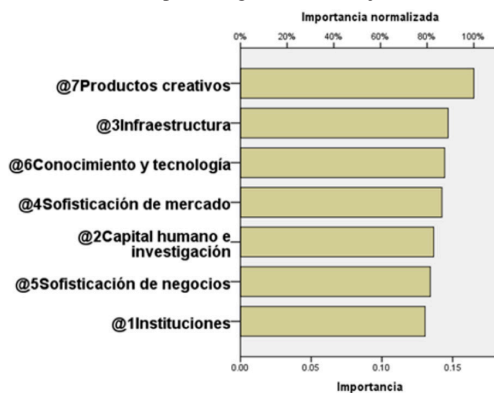
RNA países alto ingreso



RNA países ingreso medio-alto



RNA países ingreso medio-bajo



Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones de RNA con datos del IGI, 2013-2021.

Son muchas y variadas las derivaciones analíticas de lo que se muestra en la gráfica 4. Un primer elemento que señala es que la importancia jerárquica de las variables que impulsan los procesos de innovación es distinta en función del nivel de ingreso por habitante de los países considerados. Con base en los elementos expuestos en el apartado teórico se ofrece a continuación una explicación para cada grupo de países.

En el caso de los países que presentan ingresos medio-bajos, las variables que tienen mayor importancia para explicar los procesos de innovación son las relacionadas con los productos creativos. Esto es así debido a que, como se expuso en el apartado teórico, una condición necesaria pero no suficiente para que se desenvuelva la innovación en un contexto determinado, es la creatividad. Los países de ingresos medio-bajos están atrapados en una situación en la que las industrias de alto valor tecnológico se encuentran acaparadas por los países líderes. La absorción tecnológica es un proceso que requiere la creación previa de capacidades, pero este proceso lleva tiempo e implica la inversión de cuantiosos recursos económicos.

Ello deriva en un proceso en el cual, cuando un país tecnológicamente rezagado intenta asimilar las tecnologías de vanguardia, estas comienzan a volverse obsoletas y, en consecuencia, presentan menores márgenes de valor. La rápida obsolescencia tecnológica es una desventaja para los países de ingresos bajos, ya que los mantiene en niveles subóptimos de acumulación de conocimiento y capacidades, lo que a su vez acrecienta la brecha con los líderes tecnológicos.

Una posible solución para salir de esta trampa del atraso es invertir en la creatividad de los individuos y las organizaciones. En un contexto en el que los principales segmentos de valorización se encuentran cooptados por las grandes empresas tecnológicas, es necesario que los países concentren sus energías en encontrar nichos no explotados aún por las mismas, en los cuales puedan obtener conocimientos y capacidades a la vez que competir en los mercados internacionales. El descubrimiento y explotación de estos nichos es un proceso que en muchas ocasiones se encuentra relacionado con la actividad creativa. No se trata de competir en segmentos maduros con bajo valor agregado, o intentar competir en segmentos de alta tecnología, lo que parece imposible en países de ingresos medio-bajos; se trata más bien de encontrar aquellas oportunidades de mercado que sean redituables en el corto plazo y permitan obtener una mayor sofisticación en el mediano y largo plazo. En este contexto es en el que se insertan los productos creativos como una alternativa real de competencia.

El segundo elemento en términos de importancia para explicar el nivel de producción per cápita de este grupo de países es la infraestructura. En muchos sentidos la infraestructura es un requisito básico del nivel de producción por habitante, ya que una infraestructura bien desarrollada y eficiente permite

la producción y el intercambio de bienes y servicios. Carreteras, puertos y aeropuertos adecuados facilitan el transporte de productos y la conexión con mercados nacionales e internacionales, lo que impulsa el comercio y fomenta el crecimiento económico; redes de energía confiables y telecomunicaciones eficientes, mejora la productividad de las empresas. La disponibilidad de electricidad, agua potable, comunicaciones rápidas y acceso a Internet confiable permite a las empresas operar de manera más eficiente, lo que a su vez contribuye a un mayor nivel de producción y generación de riqueza.

Sin embargo, el hecho de que la infraestructura juegue un papel más importante para este grupo de países que para los países de ingreso alto (en donde ocupa el último lugar en términos del análisis de la importancia de la variable aquí utilizado), se puede explicar porque la aportación marginal de una mejora en la infraestructura es mucho mayor en el caso de los países de ingreso medio-bajo en relación a aquellos de ingresos altos. Los países de ingreso medio-bajo se encuentran mucho más lejos de la frontera tecnológica que los países de ingresos altos, y ello puede implicar que una mejora en la infraestructura genera un impacto significativo en la posibilidad de incrementar el ingreso de sus habitantes. Por ejemplo, en el caso de internet (una de las infraestructuras aquí consideradas), un incremento en la velocidad puede sin duda generar impactos positivos en los países desarrollados, pero, dado que es una tecnología que ya utilizan, con un alto grado de penetración y de uso casi generalizado, el impacto de ese incremento tenderá solo a mejorar algunos de los procesos ya existentes. En el caso de los países de ingreso medio-bajo, mucho más alejados de la frontera tecnológica, un incremento en la disponibilidad de internet puede significar un aumento en la penetración (baja en este tipo de países) y que un mayor número de personas tengan acceso a este servicio, posibilitando a los nuevos usuarios acceder a información, conocimiento y mercados a los que antes no tenían acceso. Lo mismo sucede con otros tipos de infraestructura, tales como energía eléctrica o la infraestructura carretera.

En tercer lugar, un patrón muy similar al caso de los productos creativos se observa con los resultados de las actividades tecnológicas y de conocimiento como el tercer eje más importante para este grupo. Se ha mencionado que la adquisición y creación de conocimientos es una condición necesaria en el proceso de innovación. En la medida en la que los países van adquiriendo un cumulo estable de conocimiento, habrá más probabilidad de generar innovaciones. Los resultados de la creación de conocimiento se mantienen en un proceso de reforzamiento acumulativo que conduce a una mayor sofisticación tecnológica. La diferencia en el caso de los países de ingresos medios-bajos es que los resultados de estos procesos no pueden compararse con lo que obtienen los líderes tecnológicos. Como se mencionó en el apartado teórico, lo resultados conseguidos por los primeros pueden no ser equivalentes a los que

se obtienen en los segundos (patentes, un gasto importante en I+D, etc.), pero son igualmente importantes para afianzar paulatinamente procesos internos de innovación y lograr una sofisticación gradual de los mercados, lo cual constituye el tercer componente en orden de importancia en este grupo de países.

Por su parte, en segunda instancia, se encuentra el grupo de países que cuentan con ingresos per cápita medios-altos. En este grupo, la variable más importante para explicar el nivel de producción por habitante es el capital humano y la investigación. Como se ha mencionado anteriormente, el conocimiento creado localmente, complementa al que proviene de los socios comerciales; no solo porque para replicar o mejorar los avances tecnológicos es necesario tener un cúmulo de conocimiento previo, sino además por que la consolidación de alianzas internacionales implica comúnmente el aprovechamiento del conocimiento local para la adecuación de procesos y productos. Es necesario considerar además que la consolidación de un sistema educativo que reditúe en generación de conocimiento útil implica años de esfuerzo. No es una política que pueda implementarse en el momento que se requiera; por el contrario, es el fruto de la inversión de largo plazo en educación. Por lo tanto, los países de bajos ingresos deben realizar un esfuerzo para consolidar un sistema educativo sólido, para que, cuando la madurez de los mercados y los negocios lo requiera, se cuente con capital humano de calidad y con las capacidades suficientes para liderar un proceso de consolidación.

El análisis de la importancia de la variable muestra que el conocimiento y la tecnología es el segundo factor más importante para explicar el nivel de producción por habitante para el grupo de países de ingreso medio-alto. Como se ha mencionado en la sección 2, el conocimiento y la tecnología fomentan la innovación y la capacidad de generar nuevas ideas y soluciones. En el caso de este grupo de países, esto puede impulsar la diversificación económica, permitiéndoles pasar de una dependencia excesiva de sectores tradicionales a la creación de industrias y servicios de alto valor agregado. La diversificación económica puede contribuir a la generación de empleo, la reducción de la pobreza y la construcción de una economía más resistente y sostenible.

De manera adicional, el conocimiento y la tecnología son cruciales para este conjunto de países para aprovechar la transferencia de tecnología y potencialmente establecer los cimientos de procesos de imitación tecnológica. Sin una masa crítica de generación de conocimiento interna, es muy difícil generar procesos exitosos de transferencia tecnológica. Esto implica adquirir conocimientos y tecnologías existentes y adaptarlos a sus propias necesidades y contextos. La transferencia de tecnología puede ocurrir a través de colaboraciones internacionales, acuerdos comerciales, inversión extranjera directa y programas de cooperación técnica. Los países no desarrollados pueden beneficiarse al adoptar y adaptar tecnologías existentes para impulsar su desarrollo

económico, pero ello no puede realizarse sin una base de conocimiento y tecnología previa.

Por otra parte, para este grupo de países, la sofisticación de los negocios es el tercer factor más importante para explicar el nivel de PIB per cápita. Ello implica el fortalecimiento, profundización y complejización de las redes de negocios que mantienen los agentes en un contexto dado. Una vez que los países logran generar cierta robustez en los mercados, la siguiente fase es consolidar las redes de negocios con que se cuenta. En esta etapa del proceso, aunque aún necesaria, ya no es suficiente la creatividad, sino que ahora de lo que se trata es de volcar los esfuerzos al mercado para conseguir clientes, socios, ingreso a las redes globales de producción, financiamiento, alianzas estratégicas, etc. De lo que se trata ahora es de atraer conocimiento, nuevos productos, y procesos mediante procesos formales de colaboración con los líderes tecnológicos. Puede decirse que esta es una etapa activa de aprendizaje, en la que los países han logrado construir capacidades mínimas para asimilar el conocimiento tecnológico. En la etapa previa de creatividad se crean las bases para el aprendizaje, en esta etapa se comienzan a tener resultados que se reflejan en la diversificación de los negocios.

Una cuestión interesante es que el componente de resultados del conocimiento y tecnológicos sigue siendo una variable importante en este grupo de países. Es claro que dichos resultados son cualitativamente diferentes en esta etapa con respecto a la anterior, ya que no solo se cuenta con más patentes, más inversión en I+D, etc., sino que además los resultados comienzan a ser más complejos en el sentido de la inserción en nuevos mercados, procesos y productos derivado de las alianzas de negocios, conlleva una sofisticación tecnológica gradual. Por ejemplo, ya no solo se cuenta con un número incipiente de patentes en un nicho tecnológico pequeño, sino que ahora se comienzan a generar patentes en sociedad dentro de sectores tecnológicos competitivos y con mayor valor agregado.

Dicho proceso de sofisticación tecnológica y de mercado forzosamente tiene que estar reforzado por una mayor generación de conocimiento local y por la formación de capital humano con las capacidades necesarias para conducirlo. De ahí que el tercer componente en importancia en los países de ingresos altos-medios sea la formación de capital humano y la investigación. Los procesos creativos distintivos de los países de ingresos bajos se comienzan a sustituir gradualmente por procesos formales de aprendizaje e investigación, donde los resultados obtenidos corresponden con una metodología de investigación replicable y acumulativa.

Finalmente, en el tercer grupo de países se encuentran aquellos que tienen altos ingresos. En estos países la variable de mayor importancia en la generación de innovaciones y determinación del nivel de actividad económica por

habitante, son las instituciones. Esto es sí debido a que las instituciones crean certidumbre en la esfera de los negocios al mismo tiempo que establecen las reglas para que el proceso de creación y valoración del conocimiento se lleve a cabo de manera fluida.

Una vez que se ha logrado la consolidación de los mercados y la sofisticación de los negocios, lo que se requiere después es generar la certidumbre relativa a que las reglas que permitieron llegar a una etapa de liderazgo tecnológico se mantengan o vayan mejorando en la medida en que se requiera. Dicha certidumbre se logra asegurando que las reglas formales e informales que se han desarrollado durante el proceso se mantengan alineadas con la propia dinámica y evolución del sistema de innovación. En el mismo sentido, en países de altos ingresos con liderazgo tecnológico, existe un Sistema de Innovación que funciona al mantener una sinergia colaborativa entre diversos agentes como lo son empresas, organizaciones educativas y oficinas gubernamentales, que haciendo cada cual lo que le corresponde, aseguran que las condiciones mínimas para generar nuevas tecnologías se mantengan. Las instituciones son las reglas del juego que mantienen la cohesión entre los agentes al mismo tiempo que proporcionan un asidero sólido para la mejora continua de las prácticas cotidianas.

No obstante, a pesar de contar con un sistema que funciona, la única constante en los procesos de innovación es el cambio y la evolución. Un sistema que permanece estable tiene una alta probabilidad de caer en obsolescencia o desaparecer. De ahí que el dinamismo de los mercados y su constante evolución siga siendo una variable crucial para los países de altos ingresos. La sofisticación de mercados en este nivel ya no implica solo la generación de alianzas corporativas y acuerdos de colaboración, sino además la profundización en las condiciones de valorización de conocimiento a través de la creación nuevas fuentes de riqueza, que exploren las posibilidades de negocio derivadas de los avances científicos, o que incurran en la competencia en nuevos sectores tecnológicos intensivos en conocimiento. En este nivel de desarrollo la sofisticación de los mercados implica intentar trascender las barreras conocidas para la creación de nuevos mercados. Es lo que significó la biotecnología o la ingeniería nano molecular en su momento, y lo que implica la inteligencia artificial en la actualidad. Los acuerdos y alianzas ocurren entre quienes se encuentran en la frontera del conocimiento.

Por último, y estrechamente vinculado con el anterior, se encuentra el componente de resultados cognitivos y tecnológicos. Nuevamente en este nivel de desarrollo los resultados no son solo cuantitativamente superiores sino principalmente en términos cualitativos. Los resultados de investigación ocurren no solo en la frontera tecnológica, sino, sobre todo, en la frontera del conocimiento humano, como se ha planteado anteriormente. Son este grupo de países los

que principalmente generan el conocimiento que se transforma en nuevos productos y procesos, y de donde provienen las nuevas tecnologías, que terminan usándose de manera generalizada en el resto de los países. La generación de conocimiento y tecnología es un elemento crucial de su nivel de producción por habitante.

5. CONCLUSIONES

Una hipótesis que ha cobrado cada vez mayor fuerza es que la innovación tecnológica es una variable que explica en gran medida el nivel de actividad económica de los países. Sin pretender demostrar esta relación a nivel de causalidad fuerte, se ha mostrado la existencia de una correlación positiva muy elevada entre el liderazgo tecnológico y el nivel de producción por habitante. A partir de este hecho se exploran los factores que orientan la innovación tecnológica como elementos que pueden determinar el nivel de producción per cápita de los países. Dentro de esta lógica se ha propuesto la hipótesis que los factores que determinan la innovación son distintos en función del nivel de ingreso de los países. Ello resulta relevante si se busca conocer si existe un orden de jerarquía entre las variables de innovación en función del nivel de desarrollo, con el objetivo de establecer prioridades en las políticas que inciden en cada uno de esos factores.

Utilizando la técnica de RNA para analizar los datos del Índice Global de Innovación construido por la OMPI, se encuentra evidencia de lo anterior y, en función de ello, se ha logrado establecer una jerarquía de los factores que inciden en la innovación en función del nivel de ingreso de los países. Se encontró que el nivel de ingreso se encuentra relacionado con la etapa de consolidación de un sistema de innovación.

Así para los países de ingresos bajos-medios es muy importante la implementación de procesos creativos para buscar nichos de mercado limitados en principio, en los que se comiencen a forjar las actividades de aprendizaje y formación de capacidades; es segundo término, la consolidación de una infraestructura suficiente para soportar dichos procesos es un elemento crucial para este conjunto de países.

En un nivel superior de ingreso donde se encuentran los países de ingresos per cápita medio-alto, las prioridades cambian y el capital humano y la investigación se vuelven cruciales, en función de que son factores que facilitan la adopción tecnológica y, en algunos casos como el de China o India, potencian procesos de creación de tecnología a partir de la imitación. El capital humano y la investigación se encuentran ligados con la capacidad de crear conocimiento interno, que permita adaptar a las necesidades domésticas la tecnología que se está adoptando, al tiempo de buscar una mayor consolidación, profundización

y complejidad de las redes de negocios, atrayendo nuevos socios, nuevos productos y procesos.

En una tercera etapa, para los países de altos ingresos, lo que más importa es conferir certidumbre institucional al proceso que los ha situado en el liderazgo tecnológico, al mismo tiempo que explorar las fronteras del conocimiento buscando valorizarlo mediante la creación de nuevos sectores tecnológicos y mercados.

Una constante en todo este proceso es la importancia de los resultados cognitivos y tecnológicos en los tres niveles de producción. En cada etapa los países deben generar resultados que impulsen progresiva y acumulativamente el proceso de innovación (nuevas patentes, mayor y mejor gasto en I+D, etc.). Sin embargo, se ha propuesto que los resultados cognitivos y tecnológicos son distintos en función del nivel de desarrollo, no solo cuantitativamente sino sobre todo cualitativamente. Los países líderes muestran evidentemente mayor nivel de patentamiento o mayores montos de inversión en I+D, pero lo importante es considerar que un nivel superior de desarrollo económico implica que estos resultados se encuentran más cerca de la frontera tecnológica y de conocimiento.

Con esto no se pretende demeritar el esfuerzo de los países de menores ingresos, por el contrario, la obtención de una patente o el incremento del presupuesto en I+D, aunque no se encuentren en la frontera tecnológica, puede tener efectos positivos, perdurables y cíclicos en el objetivo de largo plazo de consolidar un sistema de innovación. Por lo tanto, en cada etapa de desarrollo esta variable resulta de vital importancia.

Finalmente, lo que se desprende de los hallazgos de esta investigación en materia de política pública, es que esta debe ser diferenciada en función del grado de desarrollo (medido por el nivel de producción por habitante). Si bien la innovación tecnológica es una variable que puede tener una influencia perdurable en el nivel de producción, detonar procesos de innovación implica políticas selectivas en función del nivel de ingreso de los países. Por lo tanto, no hay una receta general de política pública, sino que esta debe estar orientada por las características particulares de cada grupo de países y, en un nivel más específico, por las particularidades y ventajas que cada país posea, como ha quedado claro en el caso de los pocos países que a lo largo del siglo XX han logrado trascender su nivel de desarrollo.

REFERENCIAS

- Afcha, S. & Lucena, A., (2022). R&D subsidies and firm innovation: does human capital matter?. *Industry and Innovation*, 29(10), 1171-1201.
- Albahari, A., Barge-Gil, A. Pérez, S. & Landoni, P., (2022). The effect of science and technology parks on tenant firms: a literature review. *The Journal of Technology Transfer*, 1-43.
- Angrist, D., & Pischke, S. (2009). Mostly harmless econometrics: An empiricist's companion. *Princeton university press*.
- Antonelli, C. (2008). Localized Technological Change. Towards the economics of complexity. Londres: Routledge.
- Boix, R. y Luciana, L. (2011). Las industrias creativas en España: una panorámica. *Investigaciones Regionales*, 22, 181-206.
- Boztosun, D., Aksoyulu, S. & Ulucak, Z. (2016). The role of human capital in economic growth. *Economics World*, 4(3), 101-110.
- Buesa, M., Heijs, J., Pellitero, M., & Baumert, T., (2006). Regional systems of innovation and the knowledge production function: the Spanish case. *Technovation*, 26(4), 463-472.
- Canning, D. Fay, M. Perotti, R. (1994). Infrastructure and growth. En: Bsaldassarri, M., Paganetto, y M., Phelps (Eds.), *International Differences in Growth Rates*. St. Martin's Press, Nueva York, 285- 310.
- Castaldi, C., Cimoli, C., Correa, N. y Dosi, G. (2009). Technological Learning, Policy Regimes, add Growth: The Long Term-Patterns and Some Specificities of a 'Globalized' Economy. En: Cimoli, Mario, Giovanni Dosi y Joseph E. Stiglitz (Editores) *Industrial Policy and Development. The political economy of Capabilities Accumulation*. Ney York; Oxford University Press, 39-75.
- Chen, Y., & Shih, H. (2015). Forecasting innovation using artificial neural networks and support vector regression. *Technological Forecasting and Social Change*, 92, 25-35.
- Chiok, C., (2014). Modelos de regresión lineal con redes neuronales. In *Anales Científicos*, 75(2), 253-260. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Cunningham, S., & Potts, J., (2015). Creative industries and the wider economy. *The Oxford handbook of creative industries*, 387-404.
- Da Silva, I., Spatti, H. Flauzino, A., Liboni, B., & Dos Reis Alves, (2017), Artificial neural networks. *Cham: Springer International Publishing*, 39.
- Díaz, H., Sosa, M. & Cabello, A. (2019). Determinantes del endeudamiento de los hogares en México: un análisis con redes neuronales. *Problemas del desarrollo*, 50(199), 115-140.
- Dima, A., Begu, L., Vasilescu, M. y Maassen, M. (2018). The relationship between the knowl-edge economy and global competitiveness in the European Union. *Sustainability*, 10(6), 1706.

- Dosi, G., Pavitt K. y Soete L. (1990). The economics of technical change and international trade. Londrés: Harvester Wheatsheaf.
- Dosi, G. & Cimoli, M. (1994). De los paradigmas tecnológicos a los sistemas nacionales de producción e innovación. *Comercio exterior*, 44(8), 669-82.
- Dosi, G., Faillo, M. & Marengo, L. (2003). Organizational capabilities, patterns of knowledge accumulation and governance structures in business firms. *Organizational Innovation Within Firms*, Cheltenham, UK, and Northampton, MA: Edward Elgar.
- Duygun, M., Sena, V., & Shaban, M. (2018). An artificial neural network approach to measuring innovation in the banking sector. *Journal of Banking & Finance*, 96, 330-342.
- Etzkowitz, H. y Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: from National Systems and 'Mode 2' to a Triple Helix of university-industry-government relations. *Research policy*, 29(2), 109-123.
- Fagerberg, J., Lundvall, B. & Srholec, M. (2018). Global value chains, national innovation systems and economic development. *The European Journal of Development Research*, 30(3), 533-556.
- Freeman, C. (1987) *Technology Policy and Economic Performance. Lessons from Japan*. Londres: Pinter
- Galindo, M. (2008). Las TIC y su papel en el crecimiento económico y la nueva economía. *Economía Industrial*, 370, 15-24.
- Golichenko, O. (2016). The national innovation system: From concept to research methodology. *Problems of Economic Transition*, 58(5), 463-481.
- Huang, C. & Yang, C. (2017). An artificial neural network approach to modeling innovation diffusion with a case study of high-tech industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 116, 97-107.
- Johnston, J., & DiNardo, J. E. (1984). *Econometric Methods* McGraw Hill. New York.
- Kirikkaleli, D. y Alper, O. (2019). Innovation capacity, Business Sophistication and Macroeconomic Stability: Empirical Evidence from OECD Countries. *Journal of Business Exconomics and Management*, 20(2), 351-367.
- Longoni, G., Porcel, E., López, V., y Dapozo, N. (2010). Modelos de Redes Neuronales Perceptrón Multicapa y de Base Radial para la predicción del rendimiento académico de alumnos universitarios. En: XVI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación.
- Lundvall, B. (1992) *National Systems of Innovations*. Londres: Pinter.
- Mariani, S., & Brusoni, S. (2013). Predicting innovation adoption in the presence of network externalities: An artificial neural network approach. *Research Policy*, 42(9), 1629-1643.

- Morales, M. (2018). Crecimiento económico e innovación tecnológica: un esbozo general sobre la situación en México en comparación con otros países miembros de la OECD. En: Eduardo Vega López (Coord.) Cambio de rumbo: desafíos económicos y sociales de México hoy. México UNAM – Facultad de Economía, 87-113.
- Nelson, R. y Rosenberg. (1993). Technical Innovation and National Systems. En Richard Nelson (ed.) National Innovation Systems. A comparative Analysis. New York: Oxford University Press, 3-21.
- Niosi, J. (2002). National Systems of Innovation are ‘x-efficient’ (and x-effective). Why some are slow learners. *Research Policy*, 31, 291-302.
- Niosi, J., (1993). National Systems of Innovation : In Search of a Workable Concept. *Technology and Society*, 15, 207-227.
- North, D. (1994). Economic performance through time. *The American economic review*, 84(3), 359-368.
- Organización Mundial para la Propiedad Intelectual, OMPI, (2021), Índice Global de Innovación de la Organización Mundial para la Propiedad Intelectual, 14ª edición.
- Palei, T. (2015). Assessing the impact of infrastructure on economic growth and global competitiveness. *Procedia Economics and Finance*, 23, 168-175.
- Paun, V., Musetescu, C., Topan, M., & Danuletiu, C. (2019). The impact of financial sector development and sophistication on sustainable economic growth. *Sustainability*, 11(6), 1713.
- Pelinescu, E. (2015). The impact of human capital on economic growth. *Procedia Economics and Finance*, 22, 184-190.
- Rosenberg, N. (1982) Inside the Black Box. UK: Cambridge University Press.
- Esfahani, H. y Ramírez, M. (2003). Institutos, infrestructure and Economic Growth. *Journal of Economic Growth*, 70, 443-477.
- Santoro, G., Bresciani, S., & Papa, A. (2020). Collaborative modes with cultural and creative industries and innovation performance: the moderating role of heterogeneous sources of knowledge and absorptive capacity. *Technovation*, 92, 102040.
- Schumpeter, J. (1939/2002). Ciclos económicos. Análisis teórico, histórico y estadístico del proceso capitalista. Zaragoza: Prensas Universitarias.
- Solow, R. (1957). Technical change and the aggregate production function. *Review of Economic Statistics*, 79(3), 367-70.
- Stanley, D., Doucouliagos, H., & Steel, P. (2018). Does ICT generate economic growth? A meta-regression analysis. *Journal of economic surveys*, 32(3), 705-726.
- Swan, W. (1956). Economic growth and capital accumulation. *Economic Record*, Vol. LXVI, pp. 334-61.

- Tavana, M., Rezaei, S., & Azizi, M. (2016). An artificial neural network approach to measuring innovation performance in the automotive industry. *International Journal of Production Research*, 54(10), 3059-3075.
- Torrent, J. (2016). La economía del conocimiento y el conocimiento de la economía. *Oikonomics Revista de Economía, Empresa y Sociedad*, 5, 26-32.
- UNCTAD. (2021). Informe sobre tecnología e información 2021, UNCTAD, ONU
- Valero, A., & Van Reenen, J. (2016). How universities boost economic growth. VoxEU.org—CEPR's policy portal. Retrieved, 10.
- Villavicencio, D., Morales, M. y Amaro, M. (2012). Indicadores y asimetrías sobre la Sociedad Basada en el Conocimiento en América Latina. *Perfiles Latinoamericanos*, 40, 63-95.
- Watkins, A., Papaioannou, T., Mugwagwa, J., & Kale, D. (2015). National innovation systems and the intermediary role of industry associations in building institutional capacities for innovation in developing countries: A critical review of the literature. *Research Policy*, 44(8), 1407-1418.
- Yegnanarayana, B. (2009). Artificial neural networks. PHI Learning Pvt. Ltd.

ANEXO 1

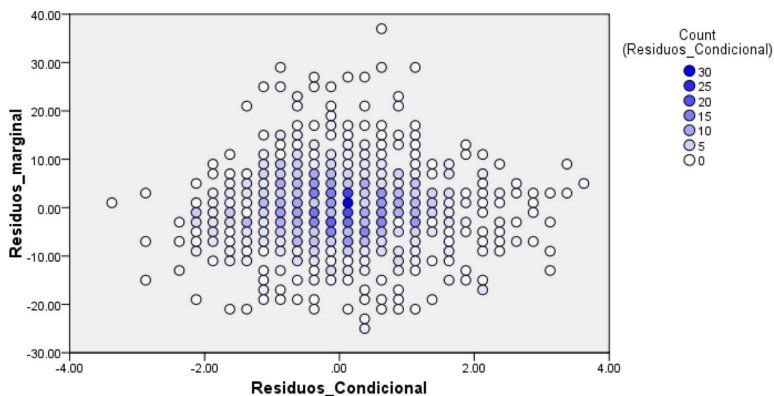
Definiendo que la exogeneidad débil se refiere a la ausencia de correlación entre los errores del modelo de regresión y las variables explicativas, para evaluar la exogeneidad débil, se estimaron dos modelos (Johnston & DiNardo, 1984) por una parte, un modelo condicional, que toma como variable dependiente el logaritmo natural del PIB per cápita y como variables exógenas los pilares del Índice Global de Innovación.

$$\ln Y_{PerCap_{jt}} = f(Inst, CapHum, Infra, SofMerc, SofNeg, ConyTec, Pr oCrea)$$

donde: $\ln Y_{jt}$ es el nivel de producción per cápita del país j en el periodo t. *Inst, CapHum, Infra, SofMerc, SofNeg, ConyTec, Pr oCrea* son los 7 pilares que componen el índice de innovación.

El segundo es el modelo marginal, que considera como variable dependiente el Índice Global de Innovación; los residuos de ambos modelos se comparan bajo la hipótesis de que no existe correlación entre sus residuos. Los resultados se evalúan a la luz del análisis gráfico mostrado en la figura A1, por una parte, y mediante la evaluación de los coeficientes de correlación de Pearson, de Kendall's tau_b y de Spearman, todos bajo test de significancia de dos colas. Como se muestra en los cuadros A1 y A2, en ninguno de los tres coeficientes se muestra evidencia de correlación significativa entre los residuos del modelo condicional y el modelo marginal, por lo que se infiere la existencia de exogeneidad débil.

FIGURA A1
GRÁFICA DE DISPERSIÓN DE LOS RESIDUOS DE LOS MODELOS CONDICIONAL Y MARGINAL



Fuente: Elaboración propia con base en resultados de estimación econométrica con datos del IGI.

TABLA A1
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE LOS RESIDUOS
DE LOS MODELOS CONDICIONAL Y MARGINAL

Pearson Correlation			
		Residuos Condicional	Residuos marginal
Residuos_Condicional	Pearson Correlation	1	-.008
	Sig. (2-tailed)		.786
	N	1072	1072
Residuos_marginal	Pearson Correlation	-.008	1
	Sig. (2-tailed)	.786	
	N	1072	1072

Fuente: Elaboración propia con base en modelos estimados.

TABLA A2
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE KENDALL'S TAU_B Y SPEARMAN ENTRE
LOS RESIDUOS DE LOS MODELOS CONDICIONAL Y MARGINAL

Kendall's tau_b and Spearman's rho Correlations				
			Residuos Condicional	Residuos Marginal
Kendall's tau_b	Residuos_Condicional	Correlation Coefficient	1.000	-.014
		Sig. (2-tailed)		.488
		N	1072	1072
	Residuos_marginal	Correlation Coefficient	-.014	1.000
		Sig. (2-tailed)	.488	
		N	1072	1072
Spearman's rho	Residuos_Condicional	Correlation Coefficient	1.000	-.020
		Sig. (2-tailed)		.513
		N	1072	1072
	Residuos_marginal	Correlation Coefficient	-.020	1.000
		Sig. (2-tailed)	.513	
		N	1072	1072

Fuente: Elaboración propia con base en modelos estimados.