Determinants and Spatial Spillovers of National Innovation Output: A Dynamic Spatial Production Function Using Global Innovation Index Data (2011–2025)

Sergio A. Contreras[1]; Mauricio Castillo-Vergara[1,3]; Cristian Geldes[1,4]; Christopher Nikulin[2]; Rodrigo Ortíz-Henríquez[1]

[1]*Investigador Asociado Fondecyt Regular 1260919*

[2]*Facultad de Ingeniería, Universidad Alberto Hurtado, Santiago, Chile*

[3]*Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Universidad de La Serena, La Serena 1700000, Chile*

[4]*CITAGRO, Centro de Investigación para la Transformación Agroalimentaria, Santiago, Chile (ANID CITAGRO CIN250015)*

Abstract– ***Research on comparative innovation performance has traditionally treated countries as independent units, overlooking the spatial interdependence among national innovation systems. This study estimates a spatial production function of innovation, in which a country's innovation outputs are explained by the inputs of its innovation system, using a balanced panel of 103 economies observed from 2011 to 2025 with data from the Global Innovation Index. To account for methodological changes across editions, all variables are standardized within each year, and the dependent variable corresponds to the Innovation Outputs sub-index. A spatial Durbin model with fixed effects, a dynamic panel model (System GMM), and a dynamic spatial panel model are estimated, incorporating the decomposition of direct and indirect impacts and standard errors obtained through Krinsky–Robb simulation. The results indicate positive, significant, and moderate spatial dependence (Moran's I between 0.45 and 0.60; $\rho \approx 0.11–0.13$), geographically driven and accompanied by temporal persistence ($\tau \approx 0.50$). Spatial spillovers arise primarily from institutional quality and infrastructure, whereas market and business sophistication generate predominantly local effects. In addition, the local spatial analysis identifies a cluster of low innovation output in Mesoamerica and the Caribbean.***

Keywords— innovation output; spatial econometrics; national innovation systems; Global Innovation Index; dynamic spatial panel.

Determinantes y desbordamientos espaciales de la producción innovadora nacional: una función de producción espacial dinámica con datos del Global Innovation Index (2011–2025)

Sergio A. Contreras[1]; Mauricio Castillo-Vergara[1,3]; Cristian Geldes[1,4]; Christopher Nikulin[2]; Rodrigo Ortíz-Henríquez[1]

[1]*Investigador Asociado Fondecyt Regular 1260919*

[2]*Facultad de Ingeniería, Universidad Alberto Hurtado, Santiago, Chile*

[3]*Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Universidad de La Serena, La Serena 1700000, Chile*

[4]*CITAGRO, Centro de Investigación para la Transformación Agroalimentaria, Santiago, Chile (ANID CITAGRO CIN250015)*

Resumen– ***La investigación sobre el desempeño innovador comparado ha tratado habitualmente a los países como unidades independientes, ignorando la interdependencia espacial entre sistemas nacionales de innovación. Este trabajo estima una función de producción espacial de la innovación, en la que los productos innovadores de un país se explican por los insumos de su sistema de innovación, sobre un panel balanceado de 103 economías observadas entre 2011 y 2025 con datos del Global Innovation Index. Para neutralizar cambios metodológicos entre ediciones, todas las variables se estandarizan dentro de cada año y la variable dependiente corresponde al subíndice de productos. Se estiman un modelo de Durbin espacial con efectos fijos, un panel dinámico (System GMM) y un panel dinámico espacial, incorporando descomposición de impactos directos e indirectos y errores estándar por simulación de Krinsky–Robb. Los resultados muestran una dependencia espacial positiva, significativa y moderada (I de Moran entre 0,45 y 0,60;*** $\rho \approx 0{,}11–0{,}13$***), de naturaleza geográfica y acompañada por persistencia temporal (*** $\tau \approx 0{,}50$***). Los desbordamientos provienen de la calidad institucional y la infraestructura, mientras que la sofisticación de mercado y de negocios genera efectos predominantemente locales. Además, el análisis local identifica un conglomerado de baja producción innovadora en Mesoamérica y el Caribe.***

Palabras clave-- producción innovadora; econometría espacial; sistemas nacionales de innovación; Global Innovation Index; panel dinámico espacial.

I. Introducción

Las diferencias entre países en la capacidad de generar conocimiento y transformarlo en innovación constituyen una fuente persistente de divergencia económica [1]. La innovación impulsa el crecimiento y genera procesos de causalidad acumulativa, mientras que la evidencia muestra escasa convergencia global en capacidades innovadoras [2], [3]. Comprender por qué algunas economías producen sistemáticamente más innovación que otras sigue siendo una cuestión central [4].

La teoría de los sistemas nacionales de innovación (SNI) sostiene que el desempeño innovador depende de las interacciones entre empresas, universidades, instituciones públicas y el marco institucional [5]–[8]. Bajo esta perspectiva, los insumos del sistema se transforman en resultados mediante una función de producción del conocimiento [9], [10].

El *Global Innovation Index* (GII) operacionaliza esta lógica distinguiendo cinco pilares de insumos y dos dimensiones de resultados [4], [11], convirtiéndose en el principal instrumento comparativo internacional [12]. La literatura basada en el GII ha estudiado configuraciones de innovación [13]–[16], relaciones estructurales [17]–[20], eficiencia [1], [3], gobernanza [21], [22] y la construcción del índice [23]. Sin embargo, una revisión reciente destaca la necesidad de incorporar una dimensión longitudinal [4].

Pese a estos avances, la mayoría de los estudios asume que los países son observaciones independientes, agrupándolos por ingreso o desempeño, pero no considerando su localización espacial [3], [13], [16], [21], [24]. Esta suposición contrasta con la evidencia sobre difusión espacial del conocimiento mediante patentes, I+D, comercio, inversión, instituciones y capacidad de absorción [25]–[35]. No obstante, la proximidad geográfica no garantiza por sí misma la difusión del conocimiento [36], [37], y algunos trabajos cuestionan la utilidad de matrices espaciales entre países distantes [23].

La innovación también presenta persistencia temporal debido a la acumulación de capacidades tecnológicas, institucionales y de absorción [4], [16], [31], [38], [39]. Ignorar esta dinámica puede atribuir a los insumos actuales efectos heredados del pasado.

Aunque existen estudios internacionales sobre difusión espacial de la innovación [40], la literatura basada en el GII aún no analiza conjuntamente la dependencia espacial y temporal ni distingue los efectos directos nacionales de los desbordamientos transfronterizos.

Este estudio responde tres preguntas: si la producción innovadora presenta dependencia espacial; qué pilares del GII generan desbordamientos espaciales; y cómo interactúan la persistencia temporal y la dependencia espacial. Para ello se analiza un panel balanceado de 103 economías entre 2011 y 2025 mediante un modelo de Durbin espacial, un panel dinámico y un panel espacial dinámico [41]–[43], considerando además el sesgo de Nickell [44] y comparando matrices de proximidad geográfica y similitud económica.

El artículo contribuye al reformular los SNI como sistemas espacialmente interdependientes y temporalmente persistentes, analizar la heterogeneidad de los efectos directos e indirectos de los insumos, integrar ambas formas de dependencia en un marco longitudinal y aportar evidencia útil para políticas de innovación con coordinación regional [4], [23].

II. Estado del Arte

A. Sistemas nacionales de innovación y la función de producción de la innovación

La teoría de los sistemas nacionales de innovación (SNI) explica por qué economías con recursos similares difieren en su desempeño innovador: la diferencia reside en las relaciones entre empresas, universidades, proveedores, usuarios, agencias públicas e instituciones, más que en la dotación de recursos [5], [6], [8]. El enfoque destaca dos rasgos: es relacional, porque el desempeño depende de la configuración conjunta de los componentes del sistema [7], y evolutivo, porque los sistemas se desarrollan gradualmente y suelen permanecer incompletos, especialmente donde la capacidad científica y los vínculos ciencia-industria son limitados [39], [45].

En paralelo, la literatura modela la innovación como un proceso de producción. Griliches [9] formuló la función de producción de conocimiento, posteriormente extendida al nivel nacional por Furman et al. [10]. Este enfoque complementa la perspectiva sistémica al permitir medir la eficiencia con que los sistemas transforman capacidades en resultados. Los estudios basados en el GII siguen esta lógica al evaluar la eficiencia de los sistemas nacionales de innovación [1], [3].

Los cinco pilares de insumos del GII representan los principales dominios de capacidad identificados por la teoría de los SNI [12]: instituciones, capital humano e investigación, infraestructura, sofisticación del mercado y sofisticación empresarial [16], [19]. La evidencia confirma que estos pilares explican los resultados innovadores, aunque con efectos heterogéneos según el método y el contexto. El capital humano y la sofisticación empresarial suelen ser los determinantes más importantes [17], [19], [20], [46], mientras que la influencia de los insumos varía entre niveles de ingreso, admite configuraciones alternativas y presenta resultados inconsistentes para la sofisticación del mercado [4], [13], [14], [16]. En consecuencia, la función de producción debe interpretarse como una relación promedio y no como una tecnología única aplicable a todos los sistemas.

B. Integración espacial de los sistemas nacionales de innovación

La globalización ha transformado los sistemas de innovación en sistemas abiertos, donde la conexión con el conocimiento externo constituye un componente esencial de la capacidad nacional [33]. La cuestión no es si existe interacción internacional, sino si esta posee una estructura geográfica que influya en los resultados nacionales.

La literatura identifica cuatro mecanismos. Primero, la difusión del conocimiento está geográficamente localizada: las citas de patentes, los efectos regionales de la I+D y los beneficios de la I+D extranjera disminuyen con la distancia [25], [28], [29]. Segundo, el comercio y la inversión facilitan la transferencia tecnológica; la productividad depende de la I+D extranjera y, en economías de bajos ingresos, del conocimiento importado y las corporaciones globales [27], [34]. Tercero, la movilidad de inventores, estudiantes y redes internacionales favorece la difusión del conocimiento, aunque estos efectos operan principalmente mediante redes laborales y sociales [33], [47]–[49]. Cuarto, la coordinación institucional entre países vecinos también genera efectos indirectos sobre los sistemas nacionales [32], [45].

Si estos mecanismos poseen una estructura geográfica, la producción innovadora de un país debería depender parcialmente de la de sus vecinos, como muestran los modelos de crecimiento con externalidades espaciales y los estudios regionales de innovación [35], [50].

Sin embargo, esta relación puede confundirse con la similitud económica. Los países cercanos suelen compartir niveles de ingreso y estructuras productivas. La evidencia muestra que la convergencia innovadora se organiza por ingresos y eficiencia [3], que la difusión depende de la integración económica más que de la proximidad [40], que la proximidad geográfica puede sustituirse por otras formas de proximidad [36], que las fronteras limitan los flujos de conocimiento [37] y que las matrices espaciales por distancia han sido cuestionadas para comparaciones internacionales [23]. Por ello, la dependencia geográfica debe demostrarse empíricamente distinguiéndola de la similitud económica.

H1. La producción nacional de innovación presenta una dependencia espacial positiva de naturaleza geográfica; es decir, la innovación de un país se asocia positivamente con la de sus vecinos geográficos, más allá de la similitud económica.

C. Efectos indirectos espaciales heterogéneos de los insumos de innovación

La dependencia espacial del resultado no indica qué capacidades se transmiten entre países. La cuestión relevante es si una mejora en los insumos del sistema de innovación incrementa la producción innovadora únicamente a nivel nacional o también en economías vecinas. En un modelo espacial de Durbin, esta transmisibilidad se interpreta como una propiedad de cada insumo, permitiendo que sus efectos indirectos difieran de los efectos directos.

Tres factores condicionan esta transmisión. Primero, la apropiabilidad: los insumos con características de bien público o externalidades regionales deberían difundirse más fácilmente que aquellos protegidos por mecanismos de apropiación. Segundo, el grado en que el conocimiento está incorporado en portadores móviles, como personas, bienes, documentos o redes. Tercero, la capacidad de absorción del receptor, que depende del conocimiento previo disponible [30].

Estas condiciones generan expectativas distintas para los pilares del GII. La infraestructura constituye una capacidad de red que facilita la difusión tecnológica y fortalece la absorción de conocimiento extranjero [16], [33]. Las instituciones también generan externalidades mediante armonización regional y coordinación supranacional [32], [45], [51]. El capital humano y la investigación ocupan una posición intermedia debido a la

circulación internacional de investigadores y conocimiento científico [33], [47].

En contraste, la sofisticación del mercado depende de sistemas financieros nacionales y su efecto innovador opera principalmente dentro de cada país [34], [52]. La sofisticación empresarial también parece menos transmisible, ya que descansa en rutinas organizativas, trabajadores del conocimiento y vínculos locales entre empresas y universidades [19], [20], [30].

No obstante, estas expectativas no son absolutas. Las multinacionales y las cadenas globales de valor pueden internacionalizar la sofisticación empresarial [34], [51], mientras que las instituciones son difíciles de transferir entre contextos nacionales [6], [39]. Además, la proximidad geográfica no garantiza aprendizaje [36] y las fronteras limitan la difusión del conocimiento [37].

En consecuencia, la teoría no predice un patrón único, sino que la transmisibilidad espacial difiere entre pilares debido a diferencias en apropiabilidad, movilidad y capacidad de absorción. Esto implica que los efectos indirectos deben estimarse por separado para cada insumo.

H2. La transmisibilidad espacial de los insumos del sistema de innovación es heterogénea; es decir, los efectos indirectos de los cinco pilares del GII sobre la producción innovadora de economías vecinas difieren sistemáticamente, siendo mayores para insumos con características de bien público, redes o conocimiento codificado, y menores para aquellos asociados a capacidades organizativas y financieras de ámbito nacional.

D. Persistencia temporal y dependencia de la trayectoria en el desempeño de la innovación nacional

La innovación no se genera únicamente a partir de insumos contemporáneos, sino que depende de un acervo acumulado de conocimiento, capacidades, instituciones e infraestructura, lo que confiere persistencia al desempeño innovador nacional.

La literatura identifica cuatro mecanismos. Primero, el conocimiento tecnológico evoluciona acumulativamente siguiendo trayectorias condicionadas por capacidades previas [38]. Segundo, la capacidad innovadora y la capacidad de absorción coevolucionan, de modo que la capacidad actual depende de inversiones pasadas [30], [31]. Tercero, las instituciones y los mecanismos de aprendizaje cambian lentamente y son difíciles de transferir [7], [39], [45]. Cuarto, el capital humano y la infraestructura son activos de largo plazo cuya contribución se fortalece con el tiempo [16].

La evidencia respalda esta persistencia. No existe convergencia global en las capacidades nacionales de innovación, sino brechas persistentes entre economías líderes y rezagadas [2]. La productividad y eficiencia innovadora convergen solo dentro de subgrupos [3], mientras que configuraciones exitosas de insumos permanecen estables durante más de una década [16]. Además, los insumos requieren tiempo para transformarse en resultados [4].

Esta persistencia refleja dependencia de la trayectoria más que simple correlación temporal. Los mecanismos de autorrefuerzo —conocimiento acumulativo, capacidad de absorción, instituciones de lenta evolución e infraestructura duradera— sostienen la continuidad del desempeño innovador [39], [53], convirtiendo las brechas de innovación en un problema de desarrollo [2].

La persistencia temporal y la dependencia espacial representan fuentes distintas de inercia: la primera refleja la capacidad heredada, mientras la segunda captura la interacción con sistemas vecinos. Omitir cualquiera de ellas puede sesgar la estimación de la otra, por lo que ambas deben modelarse simultáneamente [42]–[44]. Aunque algunos estudios consideran conjuntamente persistencia y efectos espaciales, lo hacen sobre indicadores agregados y grupos predefinidos de países [40], dejando abierta su coexistencia en una función de producción de innovación basada en los insumos del sistema.

H3. La persistencia temporal y la dependencia espacial constituyen fuentes simultáneas y analíticamente distintas de inercia en la producción nacional de innovación; esta depende tanto de su desempeño pasado como de la producción contemporánea de economías geográficamente próximas.

III. METODOLOGÍA

A. Datos, variable dependiente y comparabilidad entre ediciones

El estudio utiliza un panel balanceado de 103 economías observadas anualmente entre 2011 y 2025 (15 ediciones del Global Innovation Index, WIPO), con 1.545 observaciones país-año. La variable dependiente es el subíndice de productos de innovación (promedio de los resultados de conocimiento/tecnología y de los resultados creativos), y no el índice global del GII. Esta decisión es central: el índice global se construye como el promedio de los subíndices de insumo y de producto, de modo que contiene mecánicamente a los cinco pilares de insumo; emplearlo como variable dependiente produciría una identidad contable en lugar de una relación de comportamiento. Al usar los productos como dependiente y los insumos como explicativas, el modelo estima una función de producción de innovación con sentido económico.

Dado que WIPO modifica indicadores, ponderaciones y metodología entre ediciones —y advierte explícitamente contra la comparación directa de puntajes entre años—, todas las variables (dependiente e insumos) se estandarizan dentro de cada edición (puntajes z por año). Esta transformación preserva la posición relativa de cada economía, que es la magnitud comparable en el tiempo, y neutraliza el reescalamiento metodológico entre ediciones. Como evidencia de su eficacia, las dummies temporales del modelo dinámico, que absorbían grandes saltos en la especificación con puntajes crudos, resultan estadísticamente nulas tras la estandarización.

La muestra balanceada exige cobertura completa en los quince años, criterio que privilegia la consistencia de la matriz espacial. Como se documenta en la Sección IV, las economías excluidas se concentran en África subsahariana y en el grupo de renta media-baja; este sesgo de selección hacia economías más consolidadas se discute como limitación.

B. Estructura de pesos espaciales

La interdependencia se modela mediante una matriz de pesos espaciales W de los k vecinos más cercanos ($k = 5$) es-

tandarizada por filas. Se emplean dos definiciones alternativas de proximidad: una geográfica, basada en distancias entre centroides nacionales, y otra económica, basada en la cercanía en el PIB per cápita (en logaritmos). El contraste entre ambas permite distinguir si la dependencia observada responde a la geografía o a la mera similitud del nivel de desarrollo. La robustez se verifica además con $k = 4$, 6 y 8 y con un kernel gaussiano.

C. Análisis de datos

(i) *Análisis exploratorio.* Se calcula el I de Moran global del subíndice de productos para cada año (999 permutaciones) y los indicadores locales LISA para identificar conglomerados.

(ii) *Modelo de Durbin espacial con efectos fijos (SDM-FE):*

$$y_{it} = \rho W y_{it} + X_{it}\beta + W X_{it}\theta + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

donde y_{it} es el subíndice de productos (z por año), X_{it} el vector de insumos (z por año) y WX_{it} sus rezagos espaciales. Se estima por máxima verosimilitud con la transformación de Lee–Yu y se reportan efectos directos, indirectos y totales (LeSage–Pace [41]) con errores estándar de Krinsky–Robb.

(iii) *Panel dinámico (System GMM).* GMM en sistema de Blundell–Bond, dos etapas, instrumentos colapsados y dummies temporales, con tests de Hansen y de Arellano–Bond AR(2).

(iv) *Panel dinámico espacial.* Integra el rezago temporal $\tau y_{i,t-1}$ y el rezago espacial $\rho W y_{it}$, de donde se derivan impactos de corto plazo (CP) y de largo plazo (LP) mediante las matrices

$$\text{CP: } (I - \rho W)^{-1}; \quad \text{LP: } \big((1-\tau)I - \rho W\big)^{-1} \quad (2)$$

El posible sesgo dinámico se evalúa contrastando τ con la estimación por GMM, que corrige el sesgo de Nickell.

IV. Resultados

A. Autocorrelación espacial de la producción innovadora

La muestra final excluye seis economías con cobertura temporal completa pero con algún valor faltante en un pilar o subíndice en al menos un año: Burkina Faso, Costa de Marfil, Jordania, Níger, Nigeria y Zambia —concentradas, como se anticipó en la Metodología, en África subsahariana y en el grupo de renta media-baja.

El I de Moran del subíndice de productos es positivo y significativo ($p = 0{,}001$) en todos los años (Tabla I), con valores entre 0,45 y 0,60: la producción innovadora está geográficamente agrupada. La dependencia se intensifica entre 2011 y mediados de la década y luego se estabiliza. El patrón es robusto a la definición de W geográfica ($k = 4$, 6, 8 y kernel).

TABLA I
I de Moran global del subíndice de productos de innovación

Año	I de Moran	*p*-valor	*z*
2011	0,449	0,001	8,4
2015	0,581	0,001	10,6
2020	0,598	0,001	10,7
2024	0,565	0,001	10,6
2025	0,544	0,001	9,9

Nota: subíndice en puntajes *z* por año; *W* geográfica, 5 vecinos más cercanos; 999 permutaciones.

El análisis LISA (2024, Fig. 1) muestra focos de alta producción en Europa occidental, los nórdicos, Estados Unidos, Japón y Corea. En América Latina persiste un conglomerado significativo de baja producción (bajo–bajo) en Mesoamérica y el Caribe —Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Jamaica—, mientras que México y Brasil aparecen como casos alto–bajo (economías de relativamente alta producción inmersas en vecindarios de baja producción). La trampa espacial de baja innovación de la región es, por tanto, fundamentalmente mesoamericana, con dos polos nacionales que la contradicen.

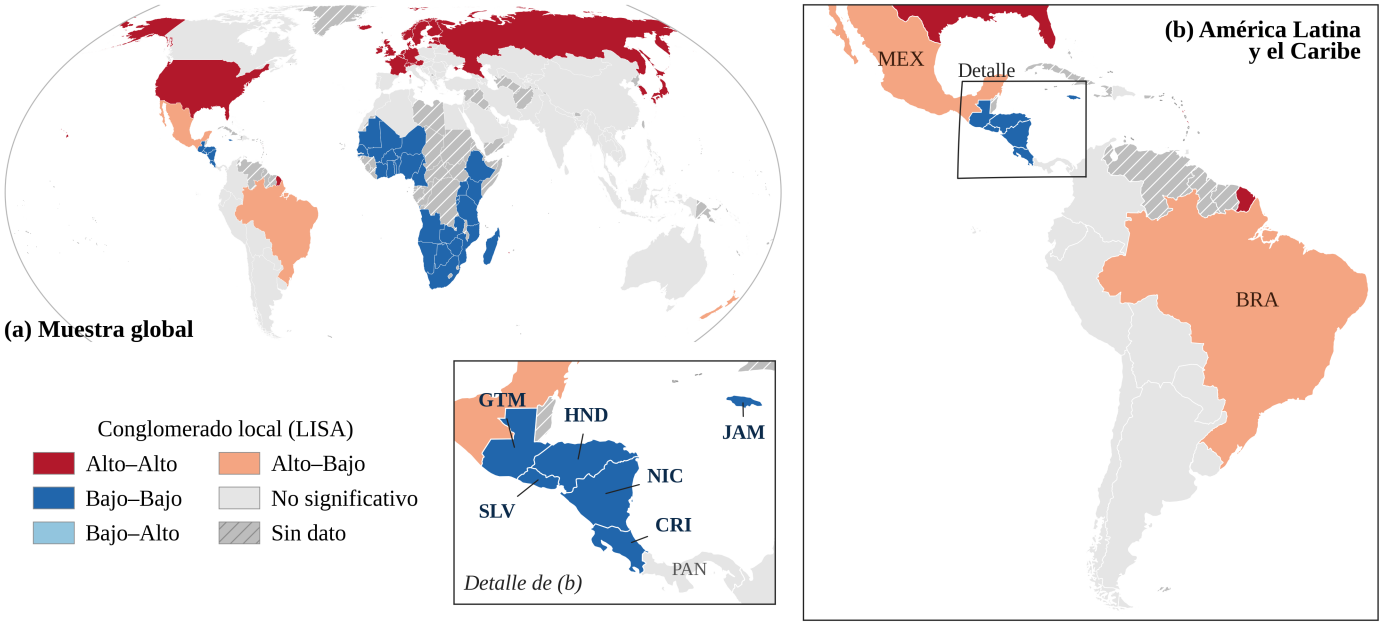


Fig. 1 Conglomerados espaciales de la producción innovadora, 2024: (a) conglomerados LISA de la muestra global; (b) América Latina y el Caribe, con detalle de Mesoamérica y el Caribe. Subíndice de productos de innovación (puntajes z por año); W geográfica de 5 vecinos más cercanos; 999 permutaciones. La Guayana Francesa se representa con la clasificación de Francia.

B. La función de producción espacial: modelo de Durbin

El coeficiente de autorregresión espacial es positivo y significativo, aunque moderado ($\rho = 0{,}130$; $z = 3{,}2$), lo que confirma una dependencia espacial genuina pero de magnitud contenida, muy inferior a la que se obtendría —de forma espuria— al usar el índice global como dependiente. Cuando la matriz de pesos se define por similitud económica en lugar de geográfica, la dependencia desaparece ($\rho = 0{,}039$; $z = 0{,}9$; no significativo): la interdependencia observada es geográfica, no un artefacto de que economías de nivel de desarrollo similar se parezcan entre sí.

La descomposición de impactos (Tabla II) revela un patrón nítido. Los efectos directos significativos provienen de la sofisticación de mercado (0,069) y de negocios (0,157): fortalecer los mercados y el tejido empresarial eleva la producción innovadora del propio país. Los efectos de desbordamiento, en cambio, provienen de la calidad institucional (0,221) y de la infraestructura (0,181), ambos altamente significativos: estos insumos, con rasgos de bien público regional, benefician también la producción innovadora de las economías vecinas. La distinción es teóricamente coherente —las instituciones y la infraestructura tienen externalidades transfronterizas, mientras que la sofisticación empresarial es de apropiación más local— y constituye el principal aporte sustantivo del trabajo. Este patrón confirma H2: la transmisibilidad espacial de los insumos es heterogénea, concentrada en aquellos con carácter de bien público regional (instituciones, infraestructura) y ausente en los de apropiación local (sofisticación de mercado y de negocios).

TABLA II
IMPACTOS DEL MODELO DE DURBIN ESPACIAL CON EFECTOS FIJOS

Insumo	Directo	Indirecto	Total
Instituciones	−0,035	0,221***	0,186***
Capital humano	0,043†	0,016	0,059
Infraestructura	0,045†	0,181***	0,225***
Sofisticación de mercado	0,069***	0,017	0,086*
Sofisticación de negocios	0,157***	0,019	0,177***

Nota: W geográfica; errores estándar por Krinsky–Robb. $\rho = 0{,}130$ ($z = 3{,}2$); $N = 103$; $T = 15$. † $p < 0{,}10$; * $p < 0{,}05$; *** $p < 0{,}01$.

C. Persistencia temporal: el panel dinámico

La estimación por System GMM (Tabla III) confirma una fuerte persistencia: el coeficiente del rezago es 0,497 ($p < 0{,}01$), de modo que la posición innovadora relativa de un país es marcadamente inercial. El capital humano, la infraestructura y, sobre todo, la sofisticación de negocios mantienen efectos positivos y significativos. A diferencia de la especificación con puntajes crudos, las dummies temporales son ahora cercanas a cero y mayoritariamente no significativas, lo que confirma que la estandarización dentro de cada año neutraliza el reescalamiento metodológico entre ediciones. Los diagnósticos validan el modelo: el test AR(2) no rechaza la ausencia de autocorrelación de segundo orden ($p = 0{,}48$) y el test de Hansen no rechaza la validez de los instrumentos ($p = 0{,}53$), con 23 instrumentos para 103 grupos.

TABLA III
PANEL DINÁMICO (SYSTEM GMM)

Variable	Coeficiente	z
Producción rezagada ($t-1$)	0,497***	5,7
Instituciones	−0,009	−0,4
Capital humano	0,115***	3,9
Infraestructura	0,112***	3,5
Sofisticación de mercado	0,058**	2,7
Sofisticación de negocios	0,205***	4,5

Nota: dos etapas, instrumentos colapsados; variables z por año. Hansen $p = 0{,}53$; AR(2) $p = 0{,}48$; 23 instrumentos, 103 grupos. Dummies temporales incluidas (no significativas). ** $p < 0{,}05$; *** $p < 0{,}01$.

D. Integrando espacio y tiempo: el panel dinámico espacial

El modelo que incorpora ambas dependencias (Tabla IV) muestra que ninguna absorbe a la otra. El componente temporal ($\tau = 0{,}511$; $z = 25{,}1$) prácticamente reproduce la persistencia estimada por GMM (0,497) —una convergencia entre dos métodos independientes que, además, atiende la preocupación por el sesgo dinámico de Nickell, dado que el GMM lo corrige—. El componente espacial permanece positivo y significativo ($\rho = 0{,}113$; $z = 3{,}1$).

La descomposición distingue impactos de corto y largo plazo. La sofisticación de mercado y de negocios actúan sobre todo por la vía directa, con efectos que se acumulan en el largo plazo (el impacto directo de la sofisticación de negocios pasa de 0,108 a 0,222). La calidad institucional y la infraestructura operan por la vía del desbordamiento: sus efectos totales son significativos y crecen sustancialmente en el largo plazo (infraestructura, de 0,115 a 0,275), reflejando la difusión acumulada de estos bienes públicos a través de la red de vecinos.

TABLA IV
PANEL DINÁMICO ESPACIAL: IMPACTOS DE CORTO Y LARGO PLAZO

Insumo	CP directo	CP total	LP directo	LP total
Instituciones	−0,016	0,086*	−0,030	0,204*
Capital humano	0,053**	0,080	0,111**	0,191
Infraestructura	−0,004	0,115**	−0,004	0,275**
Sofisticación de mercado	0,055***	0,089**	0,114***	0,212**
Sofisticación de negocios	0,108***	0,074*	0,222***	0,175*

Nota: QML, efectos fijos; W geográfica; errores estándar de Krinsky–Robb. $\rho = 0{,}113$ ($z = 3{,}1$); $\tau = 0{,}511$ ($z = 25{,}1$); $N = 103$; $T = 14$. CP = corto plazo; LP = largo plazo. * $p < 0{,}05$; ** $p < 0{,}05$; *** $p < 0{,}01$.

E. Síntesis de resultados

La evidencia converge en cuatro conclusiones. Primero, la producción innovadora nacional exhibe una dependencia espacial positiva y significativa, aunque moderada, de naturaleza geográfica y no de similitud económica. Segundo, esa dependencia coexiste con una fuerte persistencia temporal ($\tau \approx 0{,}50$), consistente entre el panel dinámico espacial y el System GMM. Tercero, los insumos se difunden de forma heterogénea: la calidad institucional y la infraestructura generan desbordamientos hacia los vecinos, mientras que la sofisticación de mercado y de negocios eleva la producción del propio país. Cuarto, el análisis local identifica un conglomerado persistente de baja producción en Mesoamérica y el Caribe, con México y Brasil como excepciones alto–bajo. En conjunto, los resultados implican que la política orientada a instituciones e infraestructura admite —y se beneficia de— una coordinación de escala regional, mientras que las intervenciones sobre la sofisticación empresarial rinden principalmente en el ámbito nacional.

V. DISCUSIÓN

Las tres preguntas planteadas admiten respuestas diferenciadas. La producción innovadora nacional presenta una dependencia espacial significativa que se organiza geográficamente y que no se reproduce cuando la conectividad se define por similitud en el nivel de desarrollo. Los insumos no se transmiten de manera uniforme a través de esa estructura: algunos elevan la producción innovadora de las economías vecinas, otros operan principalmente dentro de las fronteras nacionales, y al menos uno muestra un componente transfronterizo que requiere verificación adicional. Persistencia temporal y dependencia espacial coexisten sin que ninguna absorba a la otra. El sentido conjunto es que la producción innovadora de un país no es ni puramente nacional ni puramente contemporánea: refleja capacidades acumuladas a lo largo de su trayectoria y una posición relacional dentro de un entorno geográfico. Un alcance debe precisarse: al estandarizar todas las variables dentro de cada edición, los parámetros describen movimientos en la posición relativa de cada economía, de modo que la evidencia describe co-movimiento regional en el desempeño relativo y no transferencia de niveles absolutos.

A. El arraigo espacial de los sistemas nacionales de innovación

La distancia entre la magnitud descriptiva y la condicional de la dependencia espacial es informativa. El I de Moran se sitúa entre 0,45 y 0,60; el coeficiente autorregresivo estimado, entre 0,11 y 0,13. No son comparables en escala, pero sí en interpretación: la primera es incondicional, la segunda está neta de los cinco insumos, de la heterogeneidad invariante de cada país y, en la especificación dinámica, de su propia historia. El contraste sugiere que buena parte del agrupamiento observable en los mapas de innovación es atribuible a la distribución espacial de las capacidades del sistema y a características nacionales estables, más que a un mecanismo de interacción entre sistemas; subsiste, no obstante, una interdependencia residual contenida pero robusta. Esta formulación es más exigente, y más defendible, que la afirmación general de que la innovación es espacialmente dependiente.

La ausencia de dependencia bajo conectividad definida por similitud en PIB per cápita descarta una explicación alternativa concreta —que el agrupamiento sea un artefacto de que economías de desarrollo comparable se parezcan entre sí— pero no la clase completa de proximidades no geográficas. La similitud en ingreso no representa proximidad comercial, tecnológica, institucional ni cognitiva, ni integración en cadenas de valor o redes de colaboración científica [36], [40]. La evidencia es consistente con una interdependencia estructurada geográficamente que no se reduce a la similitud en el nivel de desarrollo, y la geografía funciona aquí como indicador imperfecto de un conjunto de proximidades correlacionadas.

La implicación teórica no es que los sistemas nacionales de innovación dejen de ser unidades analíticas pertinentes: la gobernanza, la regulación y el financiamiento público siguen

organizándose nacionalmente, y la magnitud modesta de ρ es coherente con ello. La implicación es que sus efectos funcionales no coinciden con sus fronteras administrativas. El límite del sistema —el conjunto de actores cuyas capacidades condicionan el desempeño innovador de un país— es más amplio que el límite jurisdiccional dentro del cual se decide la política, y esa asimetría es lo que la especificación espacial permite estimar.

B. Transmisibilidad espacial diferenciada de los insumos

El resultado central es que la capacidad de un insumo para producir efectos más allá de la frontera nacional varía sistemáticamente entre insumos. Esto desplaza la transmisibilidad desde una propiedad del país hacia una propiedad de la capacidad, y sugiere una distinción entre capacidades más transmisibles espacialmente y capacidades más apropiables nacionalmente.

La infraestructura es el caso más nítido. Su efecto directo sobre la producción propia es débil o indistinguible de cero, mientras que su efecto total es positivo, significativo y creciente en el largo plazo. Esta configuración es coherente con una interpretación en la que la infraestructura no opera como insumo autosuficiente sino como capacidad de difusión: su función es servir de canal por el que circulan conocimiento, bienes y personas, y ese canal está físicamente interconectado a través de las fronteras [16], [33].

Las instituciones presentan el patrón más fuerte en el vecindario y, a la vez, el más difícil de interpretar: el efecto sobre la producción innovadora del propio país no es distinguible de cero en ninguna de las tres especificaciones. Cabe que la calidad institucional opere de manera mediada, a través de otras capacidades ya incluidas en la especificación, mientras el término espacialmente rezagado captura una dimensión regional de gobernanza que los insumos propios no recogen; cabe también una explicación estadística, dado que las instituciones son la variable espacialmente más suave de la muestra y varían poco dentro de cada país en quince años. Ninguna puede descartarse con la información disponible, de modo que el hallazgo debe presentarse como una regularidad que requiere examen adicional y no como demostración de externalidades institucionales.

La sofisticación de mercado y la de negocios muestran el patrón inverso: efectos directos positivos, significativos y crecientes en el largo plazo, consistentes con la segmentación nacional de los sistemas financieros [52] y con el carácter organizativamente incorporado de las capacidades de la empresa [30]. La formulación precisa es "predominantemente directo", no "puramente local". Para la sofisticación de mercado el efecto total supera al directo, lo que indica un componente transfronterizo positivo aunque menor. Para la sofisticación de negocios ocurre lo contrario: el total es inferior al directo en corto y largo plazo, lo que implica un componente indirecto neto negativo. Se trata de una cantidad implícita, obtenida por diferencia y no reportada por el modelo; su significación no puede evaluarse con la información disponible y debe verificarse antes de interpretarla. Si se confirma, admite una lectura sustantiva: las capacidades empresariales que atraen recursos móviles —firmas multinacionales, trabajadores del conocimiento, posiciones en cadenas de valor— pueden desplazarlos desde economías próximas en lugar de generarlos, mecanismo compatible con la asociación entre creación de conocimiento y actividad de corporaciones globales documentada para economías de menores ingresos [34].

El capital humano no se ajusta a la expectativa teórica. La investigación científica está codificada y los investigadores son internacionalmente móviles, lo que sugería una transmisibilidad al menos intermedia [47]. El resultado es un efecto directo positivo y un efecto total que no alcanza significación: ningún desbordamiento detectable. Cabe que la movilidad asimétrica genere flujos de entrada y salida que se compensan en el agregado nacional, o que la difusión asociada al capital humano opere a través de la movilidad laboral y las redes sociales más que de conocimiento libremente disponible [49], canales que una matriz de distancia geográfica representa mal. Es la evidencia que menos se ajusta a las expectativas planteadas y no debe forzarse dentro del relato.

C. Persistencia temporal y capacidades heredadas

El coeficiente autorregresivo temporal se sitúa en torno a 0,50 y es prácticamente idéntico en dos estimadores independientes, uno de ellos diseñado para corregir el sesgo de los paneles dinámicos con efectos fijos: la posición innovadora relativa de un país es marcadamente inercial. Esta persistencia es consistente con los mecanismos acumulativos descritos en la literatura —conocimiento tecnológico que avanza por trayectorias [38], coevolución de capacidad innovadora y de absorción [31], instituciones de cambio lento [39], infraestructura y competencias duraderas [16]—, pero no los demuestra: la dependencia de trayectoria exige identificar mecanismos de autorrefuerzo, no inferirlos de la correlación serial [53].

Lo relevante es que ambos parámetros sobreviven en la especificación conjunta. La persistencia remite a la herencia; la dependencia espacial, a la condición contemporánea de los sistemas con los que un país está conectado. Empíricamente son fácilmente confundibles, porque el desempeño innovador está agrupado y es persistente al mismo tiempo, y una especificación que omita cualquiera de los dos términos cargará la variación correspondiente sobre el otro. Que ambos permanezcan significativos indica fuentes de inercia distintas: el desempeño innovador refleja tanto de dónde viene un país como dónde está situado.

D. Implicaciones

El análisis local identifica en 2024 un conglomerado significativo de baja producción innovadora en Mesoamérica y el Caribe, con México y Brasil como casos de alta producción inmersos en vecindarios rezagados. Desde la ciencia regional, lo relevante no es la posición de cada país sino que la posición esté espacialmente estructurada: en presencia de dependencia espacial, un vecindario homogéneamente rezagado ofrece menos margen de desbordamiento del que ofrecería el mismo nivel de capacidades situado junto a economías más fuertes. La muestra es global y el argumento no depende de esta región; América Latina funciona como ilustración de por qué la posición relacional importa para la política de innovación. La

evidencia corresponde a un único año, de modo que la persistencia del conglomerado es una hipótesis sujeta a comprobación, no un resultado establecido.

Si la infraestructura y, con las reservas señaladas, la calidad institucional producen efectos que se extienden más allá de la frontera nacional, las decisiones de inversión adoptadas exclusivamente sobre el retorno nacional tenderán a situarse por debajo del nivel que justificaría el retorno regional. Esto proporciona una razón para la coordinación regional —infraestructura transfronteriza, armonización regulatoria, programas regionales de investigación—, no una demostración de su eficacia: el diseño es observacional y la variable dependiente mide posición relativa. Simétricamente, si la sofisticación de mercado y de negocios opera predominantemente por vía directa, los instrumentos dirigidos a mercados financieros, capacidades de la empresa y capacidad de absorción admiten un diseño específico de cada país. La distinción útil para la política no separa insumos importantes de secundarios, sino insumos cuyo retorno se captura nacionalmente de aquellos cuyo retorno se distribuye en el vecindario.

VI. Conclusiones

Este trabajo examinó si la producción innovadora nacional depende espacialmente de la de las economías geográficamente próximas, qué insumos del sistema de innovación transmiten sus efectos a través de las fronteras y en qué medida la dependencia espacial coexiste con la persistencia temporal. La estrategia empírica utilizó un panel balanceado de 103 economías observadas entre 2011 y 2025 con datos del Global Innovation Index, con el subíndice de productos como variable dependiente y los cinco pilares de insumos como explicativas, todas estandarizadas dentro de cada edición para neutralizar los cambios metodológicos. Se estimaron un modelo de Durbin espacial con efectos fijos, un panel dinámico por System GMM y un panel dinámico espacial que integra ambas formas de dependencia, con descomposición de impactos directos, indirectos y totales, y contraste entre conectividad geográfica y conectividad definida por similitud económica.

Cuatro resultados se sostienen sobre la evidencia. Primero, la producción innovadora nacional exhibe dependencia espacial positiva y significativa de naturaleza geográfica, de magnitud contenida una vez controlados los insumos, la heterogeneidad nacional y la persistencia temporal. El contraste entre un I de Moran elevado y un coeficiente autorregresivo condicional moderado sugiere que buena parte del agrupamiento observable se explica por la distribución espacial de las capacidades del sistema de innovación y por características nacionales estables, y que subsiste una interdependencia residual menor pero robusta. La ausencia de dependencia bajo conectividad económica descarta una explicación alternativa concreta, no la clase completa de proximidades no geográficas.

Segundo, la transmisibilidad espacial difiere entre insumos. La infraestructura muestra efectos que se materializan predominantemente en el vecindario y que se acumulan en el largo plazo, un patrón coherente con su función de canal de difusión. Las instituciones muestran el mayor efecto de vecindario junto con un efecto propio no distinguible de cero, resultado que requiere examen adicional antes de una interpretación sustantiva. La sofisticación de mercado y de negocios opera predominantemente por vía directa. El capital humano no muestra desbordamiento detectable, contra la expectativa teórica.

Tercero, la posición innovadora relativa es marcadamente persistente, con un coeficiente autorregresivo temporal en torno a 0,50 que dos estimadores independientes reproducen. Cuarto, el análisis local identifica un conglomerado de baja producción innovadora en Mesoamérica y el Caribe, con México y Brasil como excepciones insertas en vecindarios rezagados.

La conclusión teórica es que los sistemas nacionales de innovación son nacionales en su gobernanza, pero no necesariamente nacionales en sus efectos funcionales. La frontera dentro de la cual se decide la política de innovación y la frontera dentro de la cual se realizan sus efectos no coinciden, y esa asimetría es estimable. La conclusión de política se deriva de ahí: la distinción relevante no separa insumos importantes de insumos secundarios, sino insumos cuyo retorno se captura nacionalmente de aquellos cuyo retorno se distribuye en el vecindario. Los primeros admiten diseño nacional; los segundos aportan una razón para la coordinación regional, no una demostración de su eficacia.

El estudio tiene tres limitaciones que orientan la investigación futura. Primero, la exigencia de un panel balanceado excluye economías con cobertura intermitente, concentradas en África subsahariana y en el grupo de renta media-baja, lo que introduce un sesgo de selección hacia economías más consolidadas; replicar el análisis con un panel desbalanceado permitiría evaluar su alcance. Segundo, la matriz de pesos geográfica emplea centroides aproximados; su sustitución por coordenadas de capitales o por matrices basadas en comercio bilateral fortalecería la identificación de los canales de desbordamiento. Tercero, el panel dinámico espacial no incorpora aún la corrección analítica de sesgo de Yu–Lee–Elhorst; aunque la convergencia entre τ y la estimación por GMM sugiere que el sesgo es modesto con $T = 14$, su implementación es un refinamiento natural.

Referencias

[1] M. A. Antonelli, A. Castaldo, A. Marrocco, G. J. L. Micheli, and G. Vitrano, “Does the national innovation system efficiency affect workplace accidents? An empirical analysis in Europe,” *International Journal of Manpower*, vol. 46, no. 10, pp. 169–191, 2025.

[2] T. Makkonen, “National innovation system capabilities among leader and follower countries: Widening gaps or global convergence?,” *Innovation and Development*, vol. 5, no. 1, pp. 113–129, 2015.

[3] S. Bera and D. B. Rahut, “Driving global innovation convergence: Evidence of 104 countries’ productivity and efficiencies of national innovation system,” *Journal of the Knowledge Economy*, vol. 15, no. 4, pp. 18467–18494, 2024.

[4] M. P. Duarte and F. M. P. D. O. Carvalho, “The measurement of innovation: A systematic review and bibliometric analysis of Global Innovation Index research,” *Publications*, vol. 13, no. 3, Art. no. 31, 2025.

[5] C. Freeman, *Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan*. Frances Pinter, 1987.

[6] B. A. Lundvall, *National Systems of Innovation*, 342, 1992.

[7] B. Å. Lundvall, Ed., *National Systems of Innovation: Toward a Theory of Innovation and Interactive Learning*, vol. 1. Anthem Press, 2010.
[8] R. R. Nelson, Ed., *National Innovation Systems: A Comparative Analysis*. Oxford University Press, 1993.
[9] Z. Griliches, "Issues in assessing the contribution of research and development to productivity growth," *The Bell Journal of Economics*, pp. 92–116, 1979.
[10] J. L. Furman, M. E. Porter, and S. Stern, "The determinants of national innovative capacity," *Research Policy*, vol. 31, no. 6, pp. 899–933, 2002.
[11] S. Dutta, B. Lanvin, L. Rivera León, and S. Wunsch-Vincent, Eds., *Global Innovation Index 2025: Innovation at a Crossroads*. World Intellectual Property Organization (WIPO), 2025.
[12] G. R. Brás, "Pillars of the Global Innovation Index by income level of economies: Longitudinal data (2011–2022) for researchers' use," *Data in Brief*, vol. 46, Art. no. 108818, 2023.
[13] N. F. Crespo and C. F. Crespo, "Global innovation index: Moving beyond the absolute value of ranking with a fuzzy-set analysis," *Journal of Business Research*, vol. 69, no. 11, pp. 5265–5271, 2016.
[14] T. H. K. Yu, K. H. Huarng, and D. H. Huang, "Causal complexity analysis of the Global Innovation Index," *Journal of Business Research*, vol. 137, pp. 39–45, 2021.
[15] K. H. Huarng and T. H. K. Yu, "Analysis of Global Innovation Index by structural qualitative association," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 182, Art. no. 121850, 2022.
[16] Y. Huang, S. Li, X. Xiang, and L. Huang, "Analyzing the configuration of the national innovation system for innovation capability: Evidence from Global Innovation Index reports," *Humanities and Social Sciences Communications*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, 2024.
[17] S. Y. Sohn, D. H. Kim, and S. Y. Jeon, "Re-evaluation of global innovation index based on a structural equation model," *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 28, no. 4, pp. 492–505, 2016.
[18] M. Oturakci, "Comprehensive analysis of the global innovation index: Statistical and strategic approach," *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 35, no. 6, pp. 676–688, 2023.
[19] E. Coutinho and M. Au-Yong-Oliveira, "Innovation's performance: A transnational analysis based on the Global Innovation Index," *Administrative Sciences*, vol. 14, no. 2, Art. no. 32, 2024.
[20] A. Qazi, "Innovation forecasting: Mapping pathways with global indicators," *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, vol. 14, no. 1, Art. no. 108, 2025.
[21] M. A. Koseoglu, H. E. Arici, and M. Altin, "Innovation ecosystem and corruption: Evidence from the global innovation index," *Management Decision*, pp. 1–22, 2026.
[22] S. Singh, S. Dhir, V. Mukunda Das, and A. Sharma, "Analyzing institutional factors influencing the national innovation system," *Journal of Science and Technology Policy Management*, vol. 16, no. 8, pp. 1445–1466, 2025.
[23] M. P. Libório *et al.*, "Developing a context-sensitive Global Innovation Index for OECD countries," *GeoJournal*, vol. 91, no. 3, Art. no. 77, 2026.
[24] E. Eufrazio and H. Costa, "Comprehensive dataset of global innovation index panel data (2013–2022): Clustering with K-means and principal component analysis," *Data in Brief*, Art. no. 112194, 2025.
[25] A. B. Jaffe, M. Trajtenberg, and R. Henderson, "Geographic localization of knowledge spillovers as evidenced by patent citations," NBER Working Paper 3993, 1992.
[26] D. B. Audretsch and M. P. Feldman, "R&D spillovers and the geography of innovation and production," *American Economic Review*, vol. 86, no. 3, pp. 630–640, 1996.
[27] D. T. Coe and E. Helpman, "International R&D spillovers," *European Economic Review*, vol. 39, no. 5, pp. 859–887, 1995.
[28] L. Bottazzi and G. Peri, "Innovation and spillovers in regions: Evidence from European patent data," *European Economic Review*, vol. 47, no. 4, pp. 687–710, 2003.
[29] W. Keller, "Geographic localization of international technology diffusion," *American Economic Review*, vol. 92, no. 1, pp. 120–142, 2002.
[30] W. M. Cohen and D. A. Levinthal, "Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation," *Administrative Science Quarterly*, vol. 35, no. 1, pp. 128–152, 1990.
[31] F. Castellacci and J. M. Natera, "The dynamics of national innovation systems: A panel cointegration analysis of the coevolution between innovative capability and absorptive capacity," *Research Policy*, vol. 42, no. 3, pp. 579–594, 2013.
[32] H. H. Kelejian, P. Murrell, and O. Shepotylo, "Spatial spillovers in the development of institutions," *Journal of Development Economics*, vol. 101, pp. 297–315, 2013.
[33] H. Lu, D. Du, and X. Qin, "Assessing the dual innovation capability of national innovation system: Empirical evidence from 65 countries," *Systems*, vol. 10, no. 2, Art. no. 23, 2022.
[34] R. Bar-El and L. Maymoni, "How can lower-income countries integrate in the innovation-led global economy?," *International Journal of Innovation Studies*, vol. 10, no. 1, pp. 45–64, 2025.
[35] W. Chen and H. Song, "National innovation system: Measurement of overall effectiveness and analysis of influencing factors," *Technology in Society*, vol. 77, Art. no. 102514, 2024.
[36] R. Boschma, "Proximity and innovation: A critical assessment," *Regional Studies*, vol. 39, no. 1, pp. 61–74, 2005.
[37] J. Singh and M. Marx, "Geographic constraints on knowledge spillovers: Political borders vs. spatial proximity," *Management Science*, vol. 59, no. 9, pp. 2056–2078, 2013.
[38] G. Dosi, "Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change," *Research Policy*, vol. 11, no. 3, pp. 147–162, 1982.
[39] V. Casadella, S. Tahi, A. Ceccarelli, and B. Ndiaye, "The scaling up of DUI mode, with proposals for national DUI policies in developing countries, based on institutional analysis of the national innovation system," *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 36, no. 2, Art. no. 50, 2026.
[40] A. S. Idrees and S. Sarwar, "Spatial convergence clubs and innovation persistence: A country-group comparison of international spatial spillover of innovation capabilities," *Quality & Quantity*, vol. 57, no. 5, pp. 4121–4152, 2023.
[41] J. P. LeSage and R. K. Pace, "Spatial econometric models," in *Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Methods and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, pp. 355–376.
[42] J. P. Elhorst, *Spatial Econometrics: From Cross-Sectional Data to Spatial Panels*, vol. 479. Heidelberg: Springer, 2014, p. 480.
[43] J. Yu, R. De Jong, and L. F. Lee, "Quasi-maximum likelihood estimators for spatial dynamic panel data with fixed effects when both n and T are large," *Journal of Econometrics*, vol. 146, no. 1, pp. 118–134, 2008.
[44] S. Nickell, "Biases in dynamic models with fixed effects," *Econometrica*, pp. 1417–1426, 1981.
[45] P. Yongabo and B. Göransson, "Constructing the national innovation system in Rwanda: Efforts and challenges," *Innovation and Development*, vol. 12, no. 1, pp. 155–176, 2022.
[46] S. Hamidi and A. Berrado, "Segmentation of innovation determinants: Case of the global innovation index," in *Proc. 12th Int. Conf. Intelligent Systems: Theories and Applications*, Oct. 2018, pp. 1–8.
[47] E. Miguélez and R. Moreno, "Research networks and inventors' mobility as drivers of innovation: Evidence from Europe," *Regional Studies*, vol. 47, no. 10, pp. 1668–1685, 2013.
[48] H. Xu, Y. Zhou, H. Chen, J. Li, and Y. Kou, "The impact of international technical cooperation in new energy industry on carbon emissions: Evidence from the top 30 countries in the global innovation index," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 8, pp. 21708–21722, 2023.
[49] S. Breschi and F. Lissoni, "Knowledge spillovers and local innovation systems: A critical survey," *Industrial and Corporate Change*, vol. 10, no. 4, pp. 975–1005, 2001.
[50] C. Ertur and W. Koch, "Growth, technological interdependence and spatial externalities: Theory and evidence," *Journal of Applied Econometrics*, vol. 22, no. 6, pp. 1033–1062, 2007.
[51] D. Coronado, E. Ferrándiz, M. R. Marín, and M. C. Puentes, "Inventor team diversity and patent quality: Gender–geography interaction and the role of national innovation system complexity," *Technovation*, vol. 156, Art. no. 103639, 2026.
[52] P. H. Hsu, X. Tian, and Y. Xu, "Financial development and innovation: Cross-country evidence," *Journal of Financial Economics*, vol. 112, no. 1, pp. 116–135, 2014.

[53] R. Martin and P. Sunley, “Path dependence and regional economic evolution,” *Journal of Economic Geography*, vol. 6, no. 4, pp. 395–437, 2006.