

NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-2875

Impactos indirectos de la inversión en infraestructura de transporte

Una metodología para construir contrafactuales

Mauro Alem
Julio J. Elías
Ignacio Penagos Montoya

Banco Interamericano de Desarrollo
Departamento de Infraestructura y Energía (INE)
División de Transporte (TSP)

Febrero 2024



Impactos indirectos de la inversión en infraestructura de transporte

Una metodología para construir
contrafactuales

Mauro Alem, Inter-American Development Bank

Julio J. Elías, Universidad del CEMA

Ignacio Penagos Montoya, Southern Methodist University

Banco Interamericano de Desarrollo
Departamento de Infraestructura y Energía (INE)
División de Transporte (TSP)

Febrero 2024



Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo

Alem, Mauro.

Impactos indirectos de la inversión en infraestructura de transporte: una
metodología para construir contrafactuales / Mauro Alem, Julio Jorge Elías,
Ignacio Penagos Montoya.

p. cm. — (Note técnica del BID; 2875)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Infrastructure (Economics)-Mexico. 2. Infrastructure (Economics)-Central
America. 3. Economic impact analysis-Mexico. 4. Economic impact analysis-
Central America. 5. Transportation-Mexico. 6. Transportation-Central
America. I. Elías, Julio Jorge. II. Penagos Montoya, Ignacio. III. Banco
Interamericano de Desarrollo. División de Transporte. IV. Título. V. Serie.

IDB-TN-2875

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una
licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>).
Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo
reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que
surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la
OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse
amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones
Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al
reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y
requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan
el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.





Impactos indirectos de la inversión en infraestructura de transporte Una metodología para construir contrafactuales

MAURO ALEM, Inter-American Development Bank (IADB)

JULIO J. ELÍAS, Universidad del CEMA (UCEMA)

IGNACIO PENAGOS, Southern Methodist University (SMU)

Resumen

El aporte al desarrollo de la inversión en infraestructura de transporte puede ser significativo, pero difícil de cuantificar. Los beneficios directos a los usuarios justifican inversiones en mejoras, pero no capturan la potencial contribución indirecta de estas mejoras en generar oportunidades de desarrollo económico y social derivadas del mayor intercambio comercial. La medición de estos impactos indirectos presenta importantes desafíos en la construcción de contrafactuales, pues se requiere comparar resultados a nivel agregado de sus efectos sobre el comercio, el ingreso, la población, la productividad, el atractivo del lugar y el bienestar de las personas. En años recientes la investigación académica ha venido desarrollando modelos económicos y métodos derivados de la física computacional que hacen posible medir estos efectos indirectos. El propósito de esta nota técnica es presentar estos modelos y mostrar su utilidad para evaluar el impacto indirecto de proyectos de mejoras de infraestructura de transporte. Para ilustrar la metodología presentamos una aplicación para el caso de la ampliación del Corredor del Pacífico.

Clasificación JEL: N76, O18, R42, R58

Palabras clave: Impacto Económico; Evaluación de Impacto; Costo de Transporte; Infraestructura de Transporte; Inversión en Infraestructura.

I. INTRODUCCIÓN

El aporte al desarrollo de la inversión en infraestructura de transporte puede ser significativo, pero difícil de cuantificar. Los beneficios directos a los usuarios justifican inversiones en mejoras, pero no capturan la potencial contribución indirecta de estas mejoras en generar oportunidades de desarrollo económico y social derivadas del mayor intercambio comercial. La medición de estos impactos indirectos presenta importantes desafíos en la construcción de contrafactuales, pues se requiere comparar resultados a nivel agregado de sus efectos sobre el comercio, el ingreso, la población, la productividad, el atractivo del lugar y el bienestar de las personas.

En años recientes la investigación académica ha venido desarrollando modelos económicos y métodos derivados de la física computacional que hacen posible medir estos efectos indirectos. El propósito de esta nota técnica es presentar estos modelos y mostrar su utilidad para evaluar el impacto indirecto de proyectos de mejoras de infraestructura de transporte. Para ilustrar la metodología presentamos una aplicación para el caso de la ampliación del Corredor del Pacífico.

A continuación, en las secciones II y III, discutimos antecedentes y el valor agregado que puede generar el uso de estos modelos. En la sección IV introducimos la metodología y explicamos cómo es capaz de generar contrafactuales para distintas alternativas de inversiones de transporte. En la sección V, explicamos como llevamos a cabo una aplicación para evaluar la ampliación del Corredor Pacífico. En la sección VI resumimos los principales resultados. Finalmente, en la sección VII concluimos y planteamos los desafíos para desarrollar e implementar este método de evaluación de manera sistemática en proyectos de la región, y discutimos sus limitaciones. En el Anexo a este documento realizamos un recuento del modelo de manera detallada.

II. ANTECEDENTES

En un trabajo publicado en el año 2014 los economistas Treb Allen y Costas Arkolakis presentan los fundamentos de un modelo económico-geográfico que relaciona variables geográficas y económicas para explicar la localización de la actividad productiva, y las diferencias en salarios y precios entre localidades. Los autores utilizan este marco teórico para construir un contrafactual y con ello estimar el valor monetario de las ganancias de bienestar derivadas de la construcción de la red de corredores viales (*Interstate Highway System*) de EEUU. Los resultados son notorios y muestran ganancias anuales en términos del PIB en un rango de 1,1 – 1,4%.

El ejercicio contrafactual les permite “observar el camino no tomado”, es decir, qué hubiese ocurrido en términos del PBI en EEUU de no haberse construido la red interestatal de corredores viales. En esta nota mostramos cómo se puede utilizar

estos modelos para generar contrafactuales asociados a alternativas de inversión en infraestructura de transporte.

Una pieza clave del ejercicio contrafactual es la construcción de una matriz de costos de intercambio comercial entre localidades derivada de costos asociados al transporte de mercancías, empleando métodos que permiten identificar la ruta óptima según las características de la infraestructura modal terrestre disponible (carreteras, ferrocarriles, vías navegables, etc.). En la generación de contrafactuales que presentamos en esta nota utilizamos una matriz de costos basada en parámetros para los EEUU. Es parte de la agenda de trabajo generar una matriz equivalente para la región.

Al adaptar este modelo para Centroamérica en esta nota técnica, el retorno a la inversión para mejorar su principal corredor vial se estima en más de US\$1.000 millones anuales (0,4% del PIB de la región), que representa un retorno anual del 30% o una tasa de retorno anualizada de 5%¹. Este valor resulta casi el doble del obtenido con métodos tradicionales de excedente al consumidor. Más allá del retorno a la inversión, la clave del modelo económico es introducir características geográficas y de población a microescala territorial, permitiendo hacer un análisis pormenorizado de los efectos indirectos derivados de la inversión en proyectos de transporte en cuanto reducen costos de intercambio y por ende amplían mercados.

Estos resultados ofrecen información adicional sobre el impacto en otras variables y enriquecen los resultados obtenidos mediante modelos tradicionalmente utilizados, como el HDM-4 desarrollado por el Banco Mundial. El HDM-4 respalda evaluaciones técnicas y económicas de proyectos, estándares y estrategias de inversión vial, y contribuye a determinar la estrategia de mejora y mantenimiento más económicamente eficiente desde el punto de vista del usuario de la carretera.

III. ¿CÓMO MEDIR LOS EFECTOS INDIRECTOS DE LA INVERSIÓN EN TRANSPORTE?

A partir del trabajo de Allen-Arkolakis se generó una rama de investigación asociada a la economía espacial que desarrolló modelos que permiten cuantificar los principales efectos indirectos de la inversión en transporte, más allá de los beneficios tradicionales al usuario asociados al ahorro de operación vehicular y de tiempos de viaje. La inclusión de estos modelos en la evaluación de proyectos de inversión en transporte puede enriquecer considerablemente el proceso de toma de decisiones.

¹ En el ejercicio contrafactual más conservador de reducción de 7% en los costos de transporte y excluyendo a México, el valor monetario de las ganancias de bienestar se estima en US\$1.150 millones anuales. Este valor es 30% superior al costo anual estimado en US\$880 millones (mantenimiento y repago de la inversión) y representa un retorno anualizado de 5% con relación al costo de construcción de las mejoras de US\$5.300 millones. Si incluimos a México las ganancias anuales de bienestar superan los US\$6.000 millones.

Los economistas Klaus Desmet, David Nagy y Esteban Rossi-Hansberg elaboraron en 2018 un Modelo Dinámico Espacial de Alta Resolución (MDEAR) que tiene la capacidad de generar contrafactuales de alternativas de inversión de transporte para proyectar las siguientes variables a microescala territorial: utilidad (entendido como bienestar de las personas), productividad del trabajo, PIB per cápita, amenidades (incluyendo servicios públicos, educación, salud y otros atractivos del lugar), salarios reales y población.

Este modelo infiere la distribución territorial de la actividad económica y genera proyecciones a mediano y largo plazo de variables económicas a partir de características geográficas y de un nivel inicial de densidad de la población, incorporando la decisión personal de migrar entre localidades como factor crítico de la dinámica del desarrollo. Primero se calibran los parámetros del modelo para replicar la distribución de la población en el territorio y los niveles de ingreso promedio (salario y rentas a la propiedad) observados de cada localidad. Allí se retoma el trabajo de Allen y Arkolakis para calcular la matriz de costos de transportar mercancías entre regiones geográficas y en base a la literatura se asignan los parámetros que gobiernan diferentes interacciones como las elasticidades de comercio, las preferencias de los individuos, entre otras. Con esta réplica de la realidad se mide el impacto en la actividad económica de situaciones “contrafactuales”, como la reducción de costos de transporte derivadas de una mayor inversión en infraestructura.

El MDEAR (ver Anexo) se puede adaptar fácilmente para evaluar proyectos de inversión de transporte transnacional como también proyectos en un solo país, como el caso de mejoras en la red de vías secundarias, o incluso inversiones que tienen un alcance urbano (ciudad). Una ventaja importante de este método es que permite comparar beneficios económicos entre alternativas que combinen inversiones en diferentes medios de transporte (carretera, ferroviario, fluvial). El reto consiste en crear adecuadamente el ejercicio contrafactual, analizando la conveniencia de los parámetros propuestos. Es claro que estos modelos no sustituyen, sino que complementan los modelos tradicionales de evaluación como el HDM-4.

Es por ello que es fundamental entender cómo las características del lugar donde decidimos vivir determinan en gran medida nuestras condiciones de vida y cómo la inversión en infraestructura para el transporte interactúa con dichas características, generando efectos indirectos. Para radicarnos en un lugar tenemos en cuenta muchas condiciones propias del mismo: bondades del clima, oportunidades que brinda para emprender u obtener empleo, su oferta de servicios de salud y educación, su acceso a vivienda, incluyendo actividades recreativas, entre otros muchos factores. Esta decisión personal de dónde vivir, y si se debe o no migrar, depende además de aprovechar mayores niveles de

productividad de nuevas oportunidades económicas que pueden derivarse de mejoras en la infraestructura de transporte.

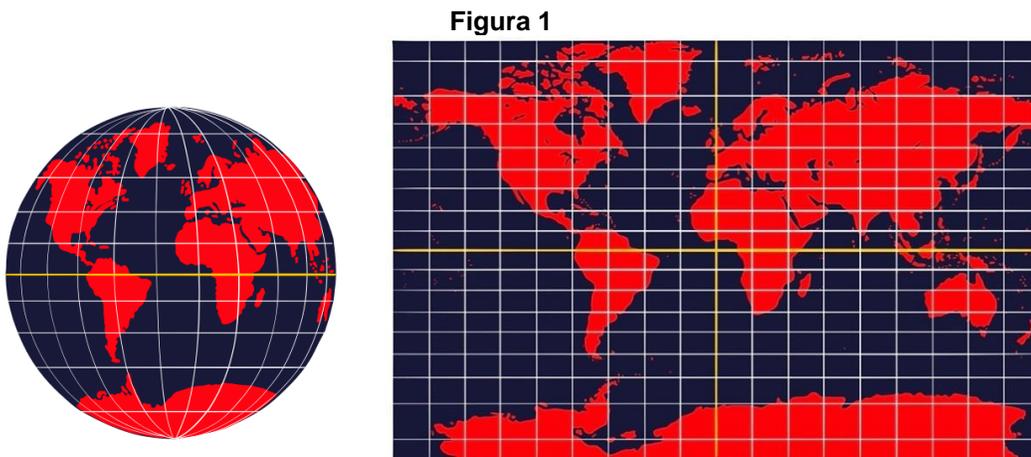
Las barreras naturales de la geografía (montañas, ríos, etc.) y las restricciones regulatorias al comercio entre localidades también afectan nuestro bienestar. En ello, la infraestructura de transporte representa un factor clave para reducir costos y conectar mercados, generando nuevas oportunidades de intercambio.

Desarrollamos este ejercicio para analizar el impacto de ampliar a cuatro carriles toda la extensión del Corredor del Pacífico, que es el tramo de más de 3.000 kilómetros de la ruta panamericana que conecta Puebla en México con la ciudad de Panamá, y presentamos los resultados en la sección VI.

IV. IMPACTO DE LA AMPLIACIÓN DEL CORREDOR DEL PACIFICO

a. Breve Resumen de la Metodología

El modelo desarrollado en Desmet et al. (2018) es un modelo dinámico espacial de alta resolución (MDEAR) de equilibrio general diseñado para representar al mundo en una escala de $360^{\circ} \times 360^{\circ}$ para un total de 129.600 celdas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (aproximadamente 100km x 100km), de las cuales se seleccionan las celdas que tienen una masa positiva de tierra (17.048 celdas). La Figura 1 ilustra una aproximación a esta idea. La Antártida se excluye por obvias razones. Entonces, un determinado país como México se compone de un conjunto de celdas identificadas por su ubicación geográfica en términos de latitud y longitud.



Las celdas se caracterizarán a través de una función de utilidad que muestra las preferencias de los agentes, una función de producción que define la tecnología y el problema del productor, un sistema de precios, unos costos para migrar y una balanza comercial que en conjunto generan el concepto de equilibrio del modelo².

² Para ver todos los detalles completos y las ecuaciones consulte el artículo de Desmet et al. (2018), en particular la sección II y el apéndice A.

Si bien todas las celdas obedecen a la misma forma estructural, los valores iniciales que las rigen y algunos parámetros van a estar calculados para cada una de ellas, como los costos de transporte, introduciendo de esta forma heterogeneidad y aproximación a lo local. Otros parámetros van a ser transversales a todas las celdas³.

b. Consumidores

Los consumidores están representados por una función de utilidad tipo CES⁴ que depende positivamente de las amenidades de la celda, la sumatoria de los bienes de consumo que provienen de esta y de otras celdas y negativamente del flujo permanente de costos de mudarse entre una localidad y otra. Adicionalmente, se introduce un componente aleatorio usando la distribución para valores extremos (Fréchet). Éste se interpreta como un cambio de preferencias que observan los individuos cada período y que podría inducirlos a migrar. Las amenidades están determinadas por un valor inicial calculado para cada celda y dependen negativamente de la cantidad de personas que viven en ella, reflejando así la congestión asociada la aglomeración de la población que diluyen la utilidad. Los individuos obtienen su ingreso a partir de los salarios por su trabajo y de la renta por el alquiler de la tierra, el cual se asume perfectamente equitativo dentro de una celda en particular.

La elección del lugar para vivir de los individuos está determinada por el flujo de costos bilaterales de migrar. Por simplicidad, se asume que no existen costos al quedarse en el mismo lugar, y que la migración está determinada por los costos (beneficios) de la celda de origen y los beneficios (costos) de la celda de destino. Este supuesto implica que, en caso de mudarse, el costo es específico al origen y destino particular. Adicionalmente, esta simplificación hace que la elección entre permanecer o migrar de cierto lugar dependa solamente de las variables actuales y no de la historia o de las futuras características de la economía. Este supuesto es fundamental para la obtención de una solución, puesto que reduce el problema dinámico a un problema secuencial, con lo cual se optimiza el esfuerzo computacional para calcular las soluciones.

c. Productores

La función de producción es tipo Cobb-Douglas, estándar en la literatura, combinando trabajadores, un cambio aleatorio de productividad y una variable que representa la innovación en la tecnología de la firma. El cambio aleatorio sigue un proceso Fréchet donde el parámetro de la función está dado por la productividad, que a su vez se compone de las innovaciones tecnológicas presentes y pasadas, de dentro y fuera de una celda en particular. La función de producción define el problema del productor considerando que hay un conjunto de firmas compitiendo

³ Todos los parámetros están resumidos en la tabla 1, sección IV de Desmet et al. (2018).

⁴ Elasticidad de Sustitución Constante por sus siglas en inglés.

a la Bertrand⁵, obteniendo las condiciones de primer orden de las cuales se derivan los precios que dependen positivamente de los costos marginales y negativamente de la productividad.

d. Cierre del Modelo y Equilibrio

A partir de los supuestos sobre el consumidor y la movilidad se obtienen expresiones para la densidad de población en una celda como proporción del total. A partir del problema del productor se obtiene una expresión para los precios con la cual se deriva la probabilidad de exportar bienes producidos en cierta celda a otras celdas. Se asume además que la balanza comercial está equilibrada. El equilibrio se define entonces a partir de valores iniciales de tecnología, dotación de amenidades, población y distribución de tierra, así como de las funciones de comercio bilateral y los costos de migración dados. Entonces un equilibrio competitivo para este conjunto de expresiones implica (entre otras condiciones) que las firmas optimicen y los mercados de bienes se vacíen, los mercados de tierra estén en equilibrio, las personas decidan donde vivir y que los mercados laborales se vacíen. Adicionalmente todas las condiciones descritas en Desmet et al. (2018) deben verificarse para toda celda del mundo.

e. Calibración de la Matriz de Costos Instantáneos de Intercambio

Entre las diversas variables que deben ser calibradas para caracterizar apropiadamente cada una de las celdas, en esta nota técnica nos concentramos en explicar el proceso para la obtención de la matriz de costos instantáneos de intercambio en términos del costo de transporte de mercancías. Este proceso reviste la mayor importancia en nuestro caso, pues de allí surgen los contrafactuales que serán explicados más adelante.

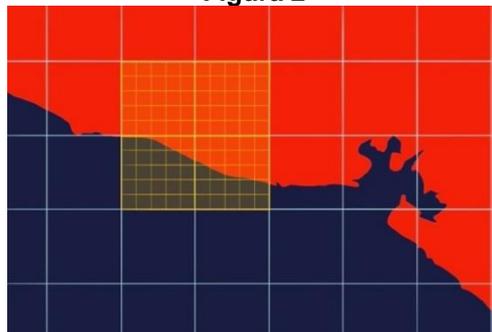
En nuestro artículo de referencia, Desmet et al. (2018), se consideran tres elementos. Primero, para cada una de estas celdas se incluyó información geográfica específica sobre el paso de carreteras principales y secundarias, vías férreas y vías navegables por mar o río, así como una aproximación geométrica del terreno⁶. Esta información se encuentra a una mayor resolución en 100 sub-celdas (de 10km x 10km aproximadamente), dentro de cada celda, como se ilustra en la Figura 2. Para armonizar con las unidades de las otras variables del modelo se agregan los datos de sub-celda y se interpretan como la proporción de estas que tienen acceso a una de las mencionadas vías de transporte. Segundo, se calculan los costos instantáneos de intercambio en términos de los costos de transporte. En este caso se utilizan los parámetros de importancia en el costo de

⁵ La competencia a la Bertrand es un modelo de competencia imperfecta que describe las interacciones entre vendedores (empresas) que fijan los precios y los compradores, que deciden cuanto comprar a dicho precio.

⁶ Datos de www.naturalearthdata.org. Aproximación geométrica se basa en triángulos que simulan la superficie de la tierra.

cada tipo de transporte estimados por Allen y Arkolakis (2014)⁷, a través de una matriz de costos de transporte. Esta matriz se basa en un cálculo de los costos bilaterales de comercio, tanto fijos como variables entre pares de nodos (condados, por ejemplo). Se combinan entonces dichos parámetros con la información de acceso a vías por celda, obteniendo así los costos instantáneos de pasar por cierta celda. Tercero, se utiliza un algoritmo⁸ que optimiza la ruta de comercio entre dos celdas (localizaciones) identificando el mínimo costo. Este algoritmo está en función de la información geográficas del lugar y los costos instantáneos que se generan al atravesar la celda en cuestión.

Figura 2



V. DEL MODELO A LA REALIDAD: EL CORREDOR DEL PACÍFICO

En esta sección analizamos el impacto de ampliar a cuatro carriles el Corredor Pacífico⁹, que es el tramo de más de 3.000 kilómetros de la ruta panamericana que conecta Puebla en México con la ciudad de Panamá. El objetivo es describir la forma como se acopla la realidad del proyecto con los supuestos y funcionamiento del modelo.

El Corredor del Pacífico fue priorizado en el marco del plan Puebla-Panamá, y en 2002 se acordó su mejoramiento y/o rehabilitación, con obras que iniciaron a partir de 2009¹⁰ con el fin de llevar esta carretera a estándares internacionales. La longitud aproximada a intervenir es un tramo de 3.241 Kilómetros (2.013 millas) que atraviesa siete países y seis fronteras. El corredor reviste una importancia estratégica al transportar aproximadamente el 95% de los bienes comerciados en la región, con el objetivo de incrementar la integración logística y comercial de la zona. Las principales deficiencias del corredor son la baja velocidad de circulación y la deficiente infraestructura e inadecuados pasos fronterizos¹¹. El resultado

⁷ Allen, T., & Arkolakis, C. (2014). Trade and the Topography of the Spatial Economy. *The Quarterly Journal of Economics*, 129(3), 1085-1140.

⁸ Fast Marching Algorithm toolbox, copyright © 2009, Gabriel Peyre.

⁹ La mayor parte de la carga se transporta por el Corredor del Pacífico y en la actualidad el 30% de su recorrido por los países de Centroamérica tiene 4 carriles.

¹⁰ Corredor Mesoamericano de Integración integrando Mesoamérica por el Pacífico. Irasema Infante. @Revista Número 34, año 16. Enero-junio 2012. BID-INTAL.

¹¹ Tanto en términos de infraestructura como en trámites administrativos de aduana.

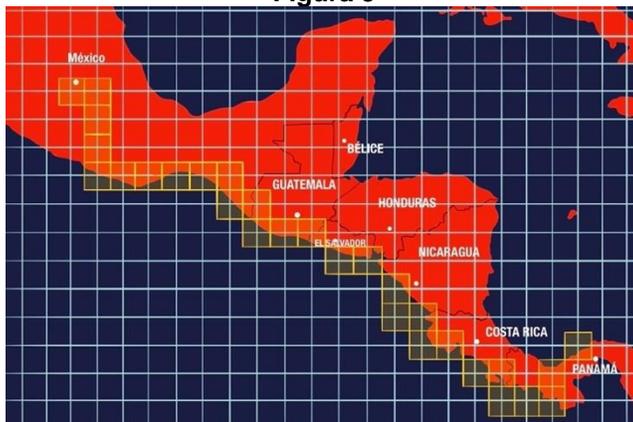
esperado de la intervención es la reducción del tiempo de tránsito¹². En estudios recientes se ha estimado la necesidad de inversiones en aproximadamente \$5.300 millones de dólares. Actualmente, el corredor cuenta con cuatro carriles y estándares internacionales, en México y Panamá. El tramo restante ha tenido retrasos y demoras en su implementación.

a. Diseño y Adaptación de los Contrafactuales

Para adaptar el MDEAR a las características propias del proyecto se tuvieron en cuenta diferentes aspectos. Primero, el trazado del proyecto. En la Figura 3 se ilustra cómo se implementó el cambio producido por el proyecto al modelo dinámico espacial de alta resolución, afectando 29 de las 302 celdas 1° x 1° de la región centroamericana (área aproximada del 10% de la región afectada directamente por el Corredor del Pacífico). En el presente ejercicio consideramos la totalidad del trazado, sin embargo, también podemos generar contrafactuales con recortes en el trazado para excluir las zonas de México y Panamá que ya cuentan con la obra finalizada. Se espera en el futuro, a través de la obtención y elaboración de matrices alternativas de transporte, ajustar estos parámetros. Entonces, la elaboración de los contrafactuales se enmarca en la modificación de la disponibilidad de medios de transporte por celda geográfica que deriva en determinados niveles de costos instantáneos de intercambio bilateral.

Para conectar el modelo con el mundo real es necesario calibrar los costos de transporte entre las distintas celdas en el escenario base (sin proyecto) y cuantificar la mejora en la infraestructura de transporte (vial en este caso). Existen varias formas (contrafactuales) de incorporar este hecho dentro del modelo. Se eligen dos. Una primera manera es asumir que se aumenta la proporción de vías principales en una cantidad fija por celda. Esto equivale a atravesarla en toda su extensión real, similar a construir una carretera nueva (o ampliar una existente).

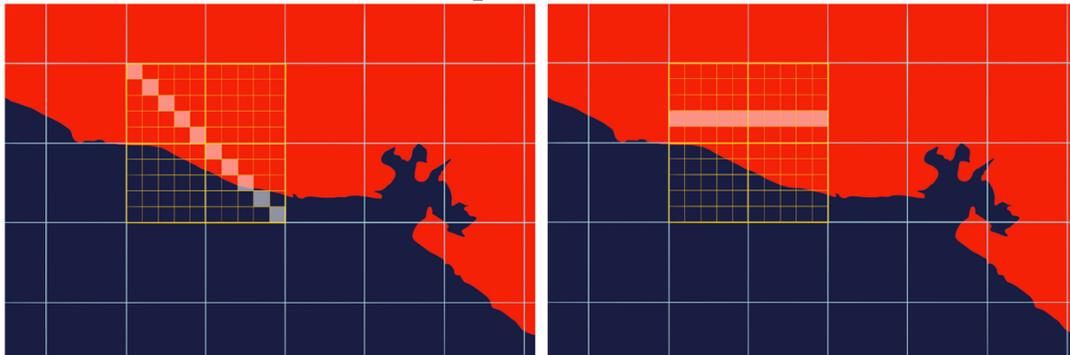
Figura 3



¹² La velocidad aumentaría de 17 a 60 km/h. El tiempo de recorrido entre México y Panamá pasaría de 190 a 54 horas.

En la práctica, como se observa en la Figura 4, dada la resolución del modelo y la forma como se trata la información, no es relevante conocer el trazado exacto de la infraestructura. Basta con asegurarse que la misma esté contenida dentro de la celda intervenida. En este modelo para el Corredor del Pacífico, esto implica una reducción de costos de transporte (instantáneos) de aproximadamente un 7%. Una segunda manera es ajustar la matriz de costos instantáneos para que refleje la reducción proyectada en costos de transporte derivada de la ampliación de capacidad (dos carriles adicionales) que en el caso del Corredor del Pacífico se estima en un 35%. Entonces nuestro segundo contrafactual trata de imitar esta reducción en los costos de transporte.

Figura 4



b. Límites, Restricciones y Mejoras Futuras

Los contrafactuales, al estar enmarcados dentro de un modelo teórico tienen ciertas limitaciones que es necesario recordar. En primer lugar, en términos de los costos de transporte, se asume la no existencia explícita de fronteras. En el modelo, los efectos de frontera se manifiestan a través de los costos de migrar. Estos costos a su vez son estimados a través de otras variables como amenidades, niveles de población y productividad, entre otras. Una posible mejora futura será la incorporación de los efectos de frontera a la matriz de costos bilaterales de intercambio. En segundo lugar, dado lo anterior, los costos de migrar no están ligados directamente a los costos de transporte. Los costos de migrar se relacionan principalmente a trámites administrativos y barreras sociopolíticas. Los costos de transporte no influyen de forma directa en la decisión de migrar. En el modelo, la migración se da como resultado de qué tan atractivo es un lugar por sus amenidades, niveles de ingreso y productividad, y cómo esto se ve modificado por el proyecto vía su impacto en el comercio. Finalmente, el efecto de los cambios en los costos de transporte se reflejará directamente en los precios a los que una empresa local puede vender en otros mercados. Es decir, afecta los costos de la firma y por ende la probabilidad de exportar. En la dinámica del modelo, los cambios en los costos de transporte influyen en los valores de equilibrio de utilidad, población, salarios y rentas a la propiedad de un lugar determinado lugar. En tercer lugar, dada la resolución utilizada ($1^\circ \times 1^\circ$) los resultados obedecen a esas mismas dimensiones. Por esto el Corredor Pacífico es apropiado para este ejercicio, debido a que sus amplias dimensiones generan suficiente variación para

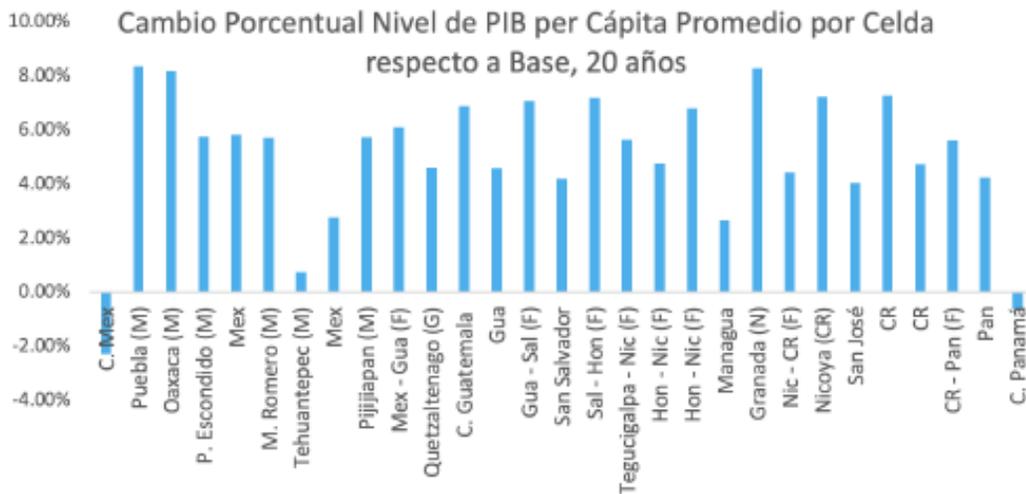
ser capturada en más de una celda. Sin embargo, no es posible examinar efectos a nivel municipal sino a nivel de celdas.

VI. RESUMEN DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS

a. Impacto en el PIB per cápita.

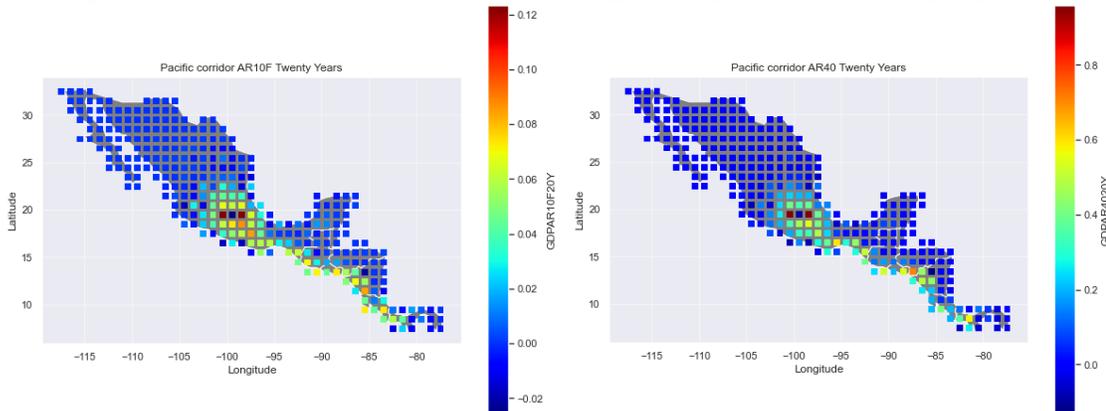
De acuerdo con las estimaciones, la ampliación del Corredor del Pacífico genera un incremento promedio de 5% en el nivel del PIB per cápita en todas las localidades (Figura 5), con excepción de los extremos (ciudades de México y Panamá). El mayor impacto en el PIB per cápita se focaliza geográficamente en la zona del proyecto y celdas colindantes (Figura 6). En el agregado (efectos combinados de PIB per cápita y población) el incremento en el PIB alcanza los US\$1.150 millones anuales. Los resultados son similares en el signo del impacto, mas no en su magnitud entre ambos contrafactuales.

Figura 5: Resultados en el PIB per Cápita en Celdas Afectadas por el Proyecto



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6: Resultados PIB per cápita en la región, según localización geográfica



b. Mejora en la equidad territorial.

La Figura 7 muestra una mejora en la equidad territorial en la zona de influencia directa del proyecto (29 celdas). Los beneficios se localizan en zonas que no contienen una ciudad principal. Al incluir las 302 celdas (Figura 8) esta mejora se diluye. Esto indica que la redistribución del ingreso solo se da localmente y no altera la distribución del ingreso territorial de la región, como lo muestra la Figura 9.

Figura 7: Distribución territorial de la actividad económica en la zona de influencia directa del proyecto (antes y después)

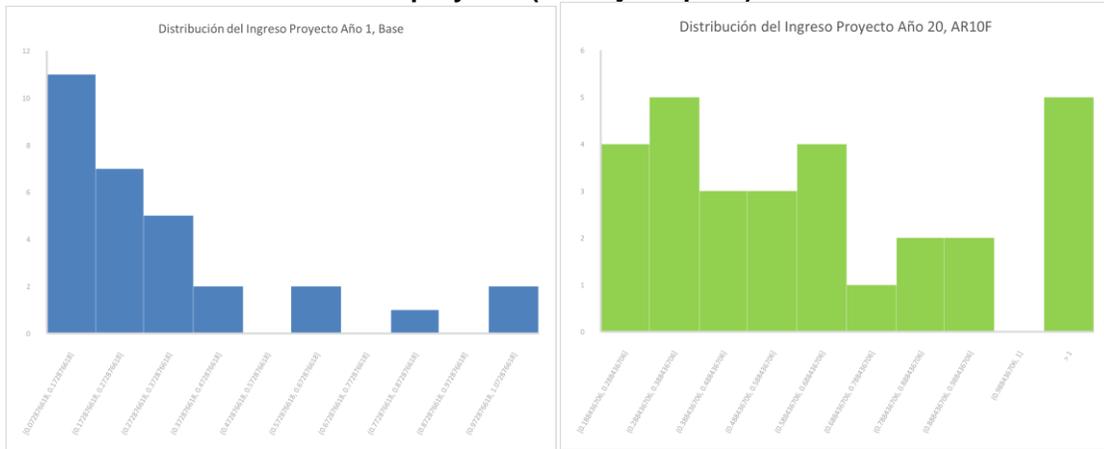
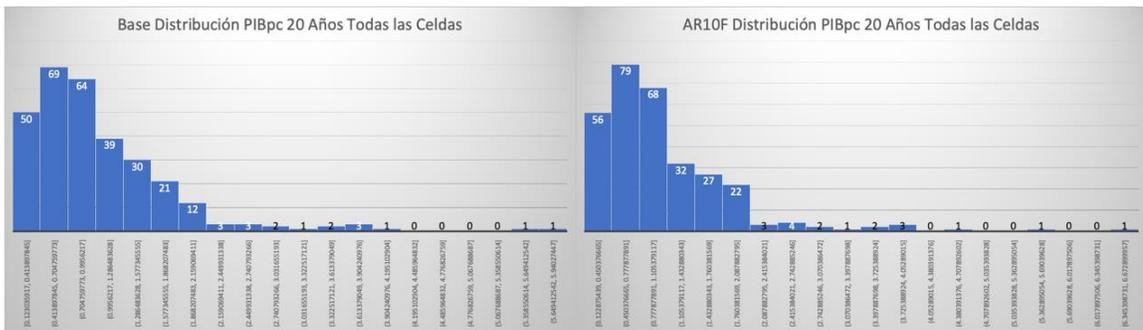


Figura 8: Distribución territorial de la actividad económica en toda la región (antes y después)



Adicionalmente, al comparar el impacto en el ingreso entre las 20 celdas con mayores y menores ingresos (Figura 10) se observa en promedio un mayor impacto para aquellas de menores ingresos. Entonces, si bien el Corredor del Pacífico no logra modificar sustancialmente la distribución territorial del ingreso, si induce a una leve reducción de la brecha de ingresos entre los extremos más ricos y pobres. En promedio las 20 celdas de menores ingresos tienen un impacto en su PIB per cápita de 1,5%, comparado con un 1,2% de las 20 con mayores ingresos.

Figura 9: Distribución territorial del ingreso todas las celdas (antes y después) para el contrafactual AR10F¹³.

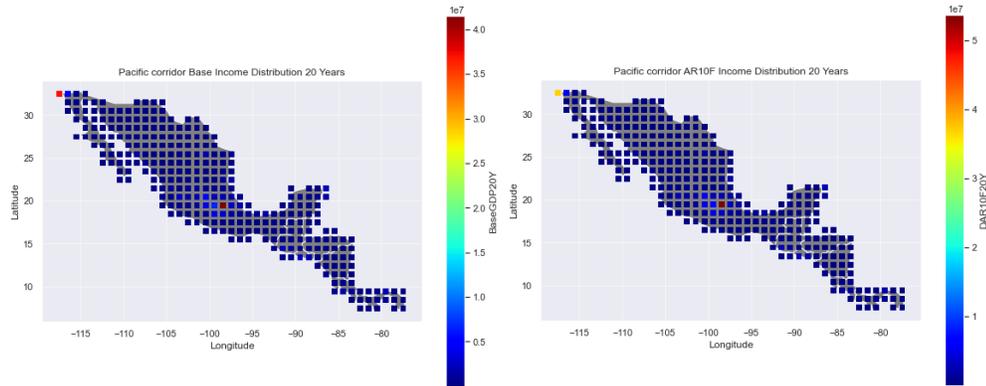
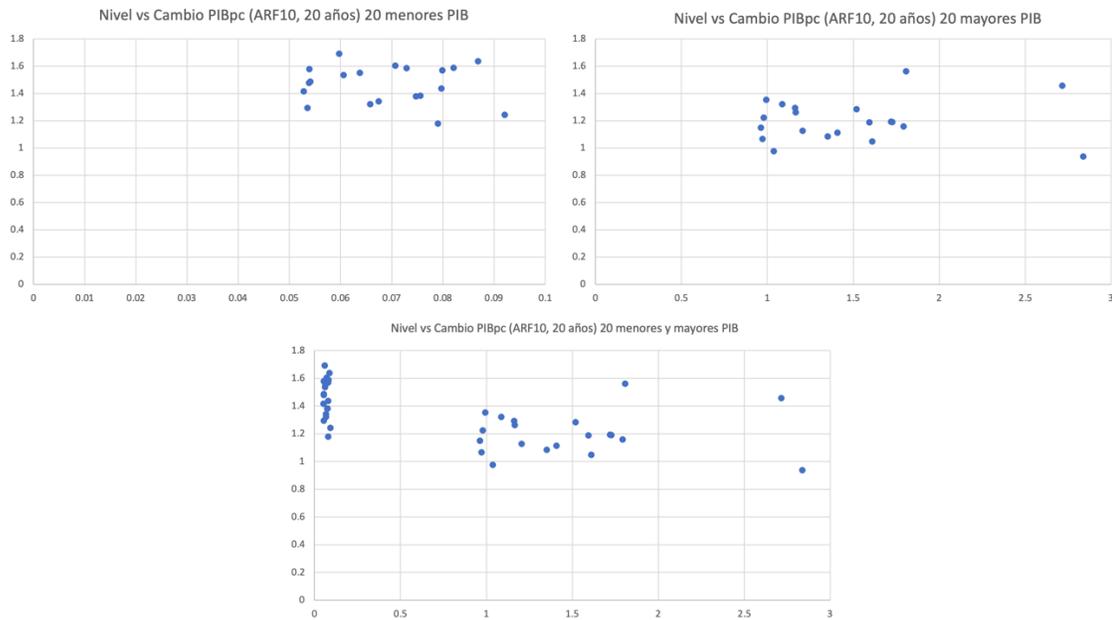


Figura 10: Comparativo Impactos en el PIB per cápita.



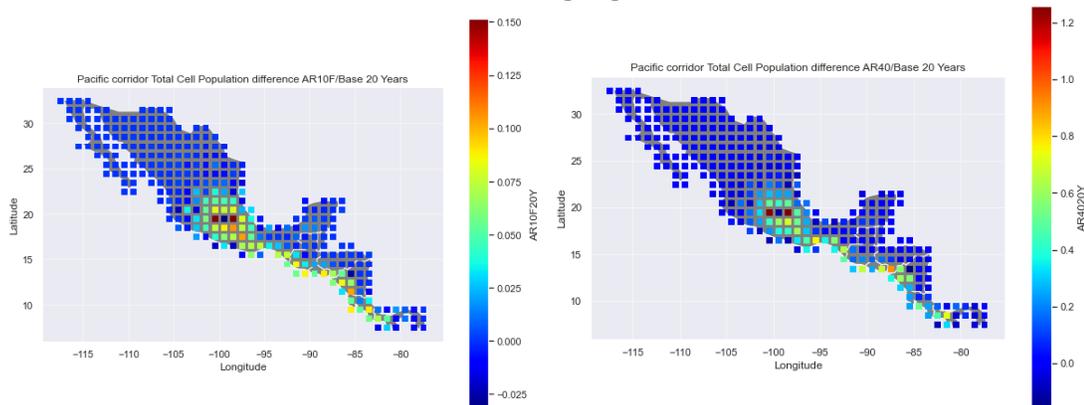
c. Impacto en los niveles poblacionales.

Las simulaciones muestran un efecto similar al del PIB per cápita para la zona de influencia del proyecto. El cambio promedio por celda en el nivel de población, mostrado en la Figura 11, es positivo en las celdas intervenidas y en las cercanas al proyecto. Teniendo en cuenta que las simulaciones asumen nulo crecimiento poblacional, en promedio, para las celdas del proyecto los flujos migratorios netos son positivos cercanos al 6,9% promedio anual. En promedio, por año y para todas las celdas de la región, en un horizonte de 20 años, los flujos migratorios netos son negativos en un rango entre el -4% y el -15% dado por los contrafactuales¹⁴.

¹³ Los resultados bajo el contrafactual AR40 son similares.

¹⁴ Se usa AR10F como la cota superior (menos negativa) y el AR40 como la inferior (más negativa).

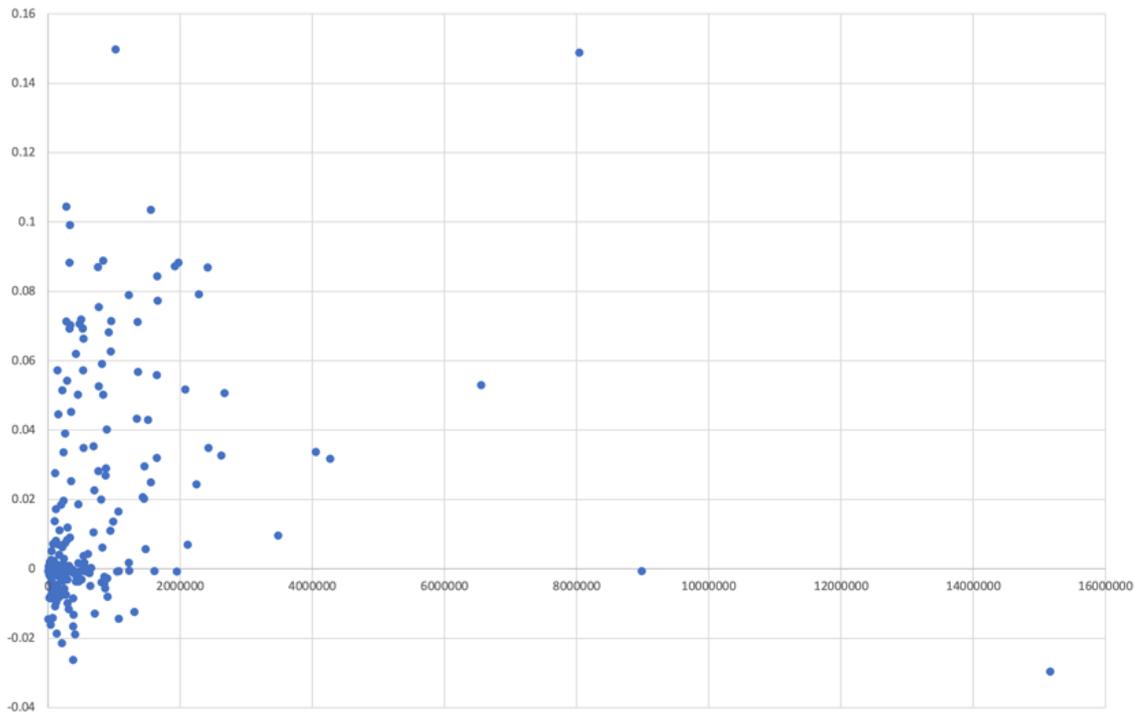
Figura 11: Distribución territorial de los flujos migratorios netos en la región, según localización geográfica



El impacto en los flujos migratorios netos es en promedio más alto y positivo para las celdas con menor tamaño de la población, salvo algunas excepciones, como lo muestra la figura 12. Sin embargo, para el grueso de las celdas el impacto es entre nulo y negativo.

Figura 12: Comparativo Impactos en los flujos migratorios netos

Nivel de Población Año Base, VS Impacto Promedio Flujos Migratorios AR10F



d. Mayor productividad, salarios, bienestar y comercio.

Para la zona del proyecto se estimó un incremento promedio de la productividad de 1,49% por año con respecto del nivel del escenario base (Figura 13), lo cual se asocia a mejores salarios en la zona de influencia del proyecto (Figura 14). El

bienestar que refleja el atractivo de la región se incrementa en un 3,1% promedio anual con respecto del nivel del escenario base (Figura 15). Adicionalmente, la participación en el comercio incrementa en un 26% en la celda promedio (Figura 16). En todos los casos el efecto se localiza localmente, por lo que la región en promedio se mantiene cerca a los resultados de la base.

Figura 13: Distribución de impactos en productividad, según localización geográfica

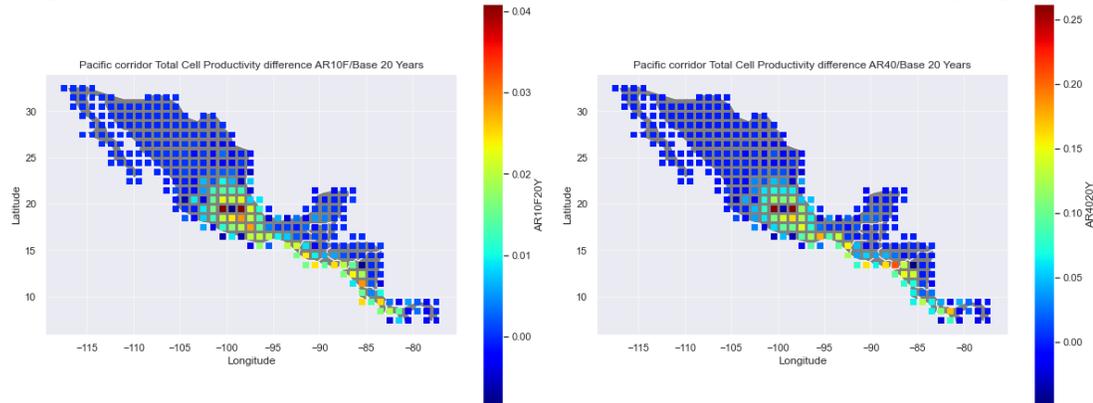


Figura 14: Distribución de impactos en salarios, según localización geográfica

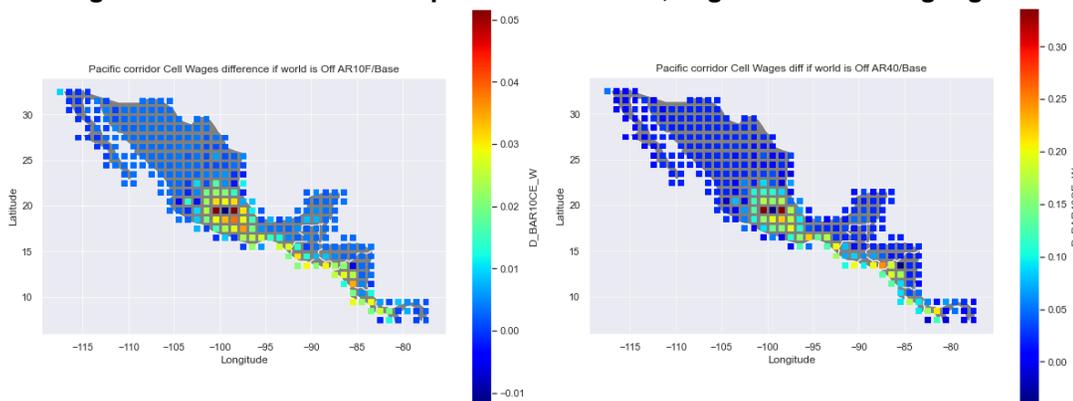


Figura 15: Distribución de impactos en utilidad, según localización geográfica

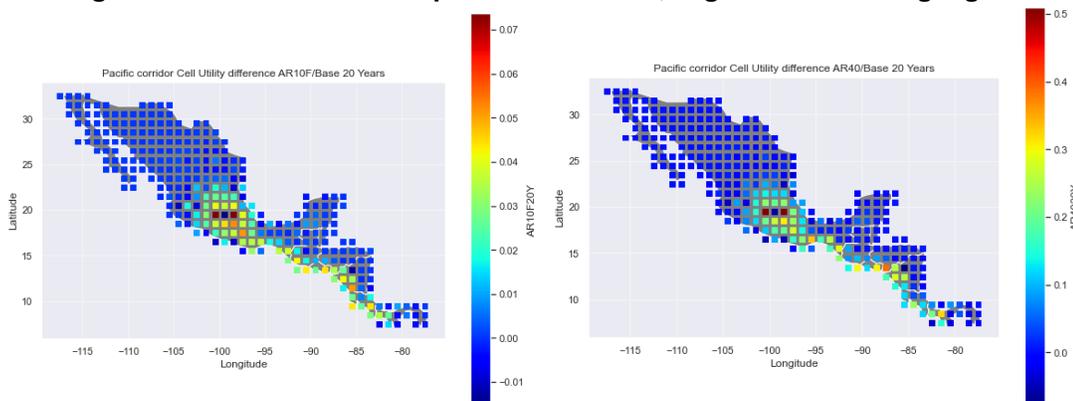
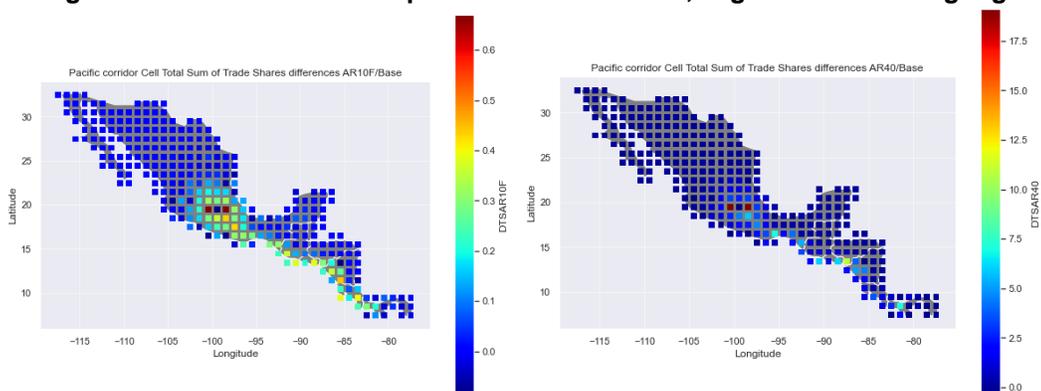


Figura 16: Distribución de impactos en el comercio, según localización geográfica



VII. CONCLUSIONES

La importancia de la inversión en transporte para el desarrollo económico es innegable. Investigaciones recientes como Dalgaard et. Al. (2022), han demostrado que la persistencia de una infraestructura sólida a lo largo de la historia, como la que se observa en los antiguos caminos romanos en Europa, está estrechamente relacionada con el éxito y el progreso de los centros urbanos actuales.

En la actualidad, los avances en la investigación académica han permitido identificar los mecanismos que transmiten el impulso inicial de las inversiones en infraestructura. La aplicación de modelos económicos y métodos computacionales avanzados ha mejorado significativamente nuestra capacidad para evaluar el impacto de la inversión en transporte en la economía. Incorporar estos modelos en la evaluación de proyectos de inversión en transporte enriquece el proceso de toma de decisiones, pero también plantea desafíos, como la adaptación a contextos regionales y la disponibilidad de datos precisos.

Los resultados obtenidos en los Estados Unidos indican que los impactos de la inversión en transporte son sustanciales y justifican proyectos ambiciosos para conectar regiones y expandir mercados. Aplicar estos métodos en nuestra región representa un desafío, pero los primeros resultados que obtenemos en la aplicación de estos métodos al caso de la ampliación del Corredor del Pacífico sugieren que la integración logística tiene un impacto significativo, especialmente cuando se incorporan los beneficios inducidos.

La ampliación del corredor genera significativos impactos económicos en las localidades afectadas, con un aumento promedio del 5% en el PIB per cápita, especialmente concentrado en la zona del proyecto. Este crecimiento, que representa un total de US\$1.150 millones anuales, se acompaña de una mejora en la equidad territorial al reducir la desigualdad en la distribución de la actividad económica. Asimismo, se observa un incremento anual del 1,5% en la productividad, asociado a mejores salarios, lo que atrae un flujo migratorio hacia

la zona del proyecto, con un aumento del 6,9% en la población. En promedio, la participación en el comercio en la zona de influencia se incrementa en un 26%.

Esta metodología ofrece el potencial de medir impactos que antes eran difíciles de considerar con métodos convencionales. Sin embargo, es necesario continuar trabajando en su implementación y adaptación a la realidad regional, incluyendo la revisión de los costos de transporte. Como parte del compromiso del Banco de promover la integración económica en la región, estos resultados prometedores podrían ser de gran relevancia para la toma de decisiones en políticas de desarrollo e infraestructura de transporte.

El camino a seguir implica la aplicación de esta metodología a otros proyectos y, con el tiempo, el desarrollo de una herramienta de evaluación que incorpore estos beneficios indirectos para tomar decisiones más informadas en el ámbito del desarrollo y el transporte. En futuras publicaciones, presentaremos aplicaciones de esta nueva metodología a distintos proyectos de inversión de transporte en la región.

VIII. REFERENCIAS

Allen, T., & Arkolakis, C. (2014). Trade and the Topography of the Spatial Economy. *The Quarterly Journal of Economics*, 129(3), 1085-1140.

Dalgaard, C. J., Kaarsen, N., Olsson, O., & Selaya, P. (2022). Roman roads to prosperity: Persistence and non-persistence of public infrastructure. *Journal of Comparative Economics*, 50(4), 896-916.

Desmet, K., Nagy, D. K., and Rossi-Hansberg, E. (2018). The geography of development. *Journal of Political Economy*, 126(3):903–983.

Anexo Teórico: Resumen y Antecedentes Del Modelo de la Geografía del Desarrollo

Mauro Alem, Julio Elías, Ignacio Penagos

12 de diciembre de 2023

Resumen

En este informe se presentan de forma resumida las principales características del modelo de La Geografía del Desarrollo de Desmet et al. (2018). Este anexo permite entender las particularidades técnicas de la nota técnica en cuanto a la creación de los contrafactuales, las dinámicas de equilibrio del modelo y los resultados.

1. Antecedentes

1.1. La Geografía Económica y la Evaluación de Impacto.

Desde el artículo seminal de Krugman (1991), donde se introducen las variables geográficas además de los mercados, ha sido creciente en la literatura el uso de estos modelos para entender el fenómeno del desarrollo económico. Muchos países de América Latina, África y Asia han sido estudiados para evaluar si lo remoto del terreno y la dificultad para acceder a los mercados o la infraestructura, entre otros tienen alguna incidencia en las condiciones de pobreza y bajo crecimiento económico. La literatura que vincula variables geográficas, e infraestructura con desarrollo y crecimiento económico hoy en día es abundante y provee una alternativa a la evaluación de impacto ex-post y al Análisis Costo-Beneficio (CBA). Hay trabajos de naturaleza empírica que encuentran una esta relación como Nuñez and Torres (2000) para Colombia, o Hong et al. (2011) para china, inclusive, se discute la dirección de la causalidad de infraestructura hacia crecimiento económico, Maparu and Mazumder (2017) encuentra evidencia mixta para la India, inclusive Hong et al. (2011) encuentra que el desarrollo económico podría causar el desarrollo posterior de infraestructura. Así mismo Banerjee et al. (2020) discute si los reales beneficios de los desarrollos viales se dan para las regiones a las cuales plantean beneficiar (zonas rurales por ejemplo) o se quedan en las grandes ciudades que conectan debido a los efectos de la aglomeración.

En el marco de esta nueva rama de la literatura, se han introducido modelos de simulación. Estos modelos son estructurales pues se basan en la teoría económica, usando funciones de utilidad, producción, costos, intercambio comercial, procesos de optimización y conceptos de equilibrio para representar a las economías, combinando las bondades de la CBA con la evaluación de impacto en la medida. Esta combinación se da específicamente en dos puntos, primero, se usan modelos estructurales que representan la economía (como la CBA), pero donde se incluyen variables geográficas como localización y acceso a servicios públicos o infraestructura, así como los efectos de la aglomeración. Segundo, dado que simulan la realidad, son capaces de crear contrafactuales, labor que suele ser abordada por la evaluación de impacto, con la diferencia de que en esta última se utilizan métodos cuantitativos

para este fin. Por otro lado los modelos de simulación también se nutren de las evaluaciones de impacto y de los CBA para calcular sus parámetros y lograr así medir el efecto sobre el bienestar y otras variables de interés. La ventaja de este tipo de modelos es que una vez establecidos y probados se pueden utilizar para múltiples fines, adicionalmente dependiendo de la magnitud en términos geográficos y de la disponibilidad de datos se pueden adaptar a una región específica o a el mundo entero.

Existen múltiples ejemplos de esta metodología, Allen and Arkolakis (2014) miden el beneficio de la construcción del sistema de autopistas (highways) de Estados Unidos, encontrando un efecto positivo en el bienestar medido por ingresos. Asturias (2020) miden el impacto del «cuadrilátero dorado» de la India, un sistema moderno de autopistas que conecta cuatro principales ciudades, sobre el bienestar. Para ello usan un modelo de costos de transporte endógenos y la diferencia en los niveles de precios por región para estimar el efecto en el nivel de ingresos reales. La propuesta que se formulará detalladamente la nota técnica, se hace a partir del modelo de Desmet et al. (2018), que pertenece a esta categoría y que a diferencia de los ejemplos anteriores, tiene un alcance a nivel mundial y provee una simulación sobre variables como población, PIB per cápita, productividad y bienestar. Adicionalmente esta metodología permite examinar un horizonte de muy largo plazo, limitante que poseen tanto el CBA como la evaluación de impacto. Originalmente, los autores realizaron una simulación de la relajación en los costos de migrar, pero al ser tan amplio su planteamiento, permite también examinar el efecto de una reducción en los costos de transporte o en los valores iniciales de servicios y comodidades que disfrutaban las personas en las diferentes localidades.

2. Metodología para la Evaluación de Impacto Basada en la Geografía del Desarrollo

A continuación se describen resumidamente los principales aspectos ¹ ventajas y alcances de la metodología desarrollada por Desmet et al. (2018). Este método consiste primero, en un complejo modelo de ecuaciones simultáneas que describe una economía, comenzando por la ubicación espacial, las preferencias de los agentes, el concepto de movilidad. Luego se modela la tecnología y el problema de la firma, los precios, la probabilidad de exportar y las cuotas de exportación, la balanza comercial y el concepto de equilibrio. En segundo lugar se mostrará la forma en que se resuelve, los parámetros e información requerida para su calibración. Hay que tener en cuenta que al modelar agentes económicos, por simplicidad, se está hablando de individuos representativos de una economía, y por tanto sus preferencias se modelan de manera homogénea². Por esta razón no se puede diferenciar explícitamente a personas en discapacidad o cualquier tipo de heterogeneidad entre la población (Género, raza, nacionalidad, nivel educativo, etc...). De igual forma, el modelo en aras de la simplicidad no distingue explícitamente la dotación de amenidades de cierto lugar. Sin embargo, la forma como se modelará esta variable en particular permitirá las externalidades por congestión. Es decir que, lugares donde hay una mayor cantidad de personas a su vez también tienen una menor dotación de amenidades per capita, lo cual, indirectamente implica que tendrán menor servicios de salud y acceso a educación, en promedio, entre otros.

¹Algunos detalles técnicos como las distribuciones de algunas variables y/o procesos algebraicos de solución se omiten y pueden ser consultados en el artículo de origen que puede ser encontrado aquí: <http://s2.smu.edu/kdesmet/papers/GeographyDevelopment.pdf>

²Aunque, los valores iniciales de las variables y los choques aleatorios sobre las mismas mostrados más adelante introducen heterogeneidad en su valor.

2.1. El Modelo Económico

2.1.1. Ubicación espacial de las economías

Se considera una economía que ocupa un subconjunto S de una superficie en dos dimensiones. Se define una localización, ubicación o lugar como un punto $r \in S$, cada lugar tiene una densidad $H(r) > 0$, donde $H(\cdot)$ se normaliza exógenamente de tal forma que $\int_S H(r) dr = 1$, por lo tanto un país C , es una colección de puntos r que pertenecen a C . De esta manera el conjunto S se constituye de la partición $S : (S_1, S_2 \dots S_C)$ de los países que existen en el mundo. En este mundo existen \bar{L} agentes dotados inelásticamente de una unidad de trabajo cada uno. La distribución inicial de población esta dada por la función $L(r)$.

2.1.2. Preferencias y elecciones de los agentes

Los agentes derivan utilidad del consumo de un conjunto de bienes diferenciados a través de una función de elasticidad de sustitución constante CES, y de la dotación de comodidades y servicios de cada lugar (r). Las preferencias son gobernadas por la siguiente ecuación:

$$U_t^i(\bar{r}_-, r) = a_t(r) \left[\int_0^1 c_t^\omega(r)^\rho d\omega \right]^{\frac{1}{\rho}} \varepsilon_t^i(r) \prod_{s=1}^t m(r_{s-1}, r_s)^{-1} \quad (1)$$

Donde, $a_t(r)$ es la dotación de comodidades y servicios del lugar r en el tiempo t , es decir entre mayor sea esta dotación, mayor utilidad reportará el individuo. $c_t^\omega(r)$ representa el consumo del bien ω lugar r en el tiempo t , agregado a través de una función CES con parámetro $0 < \rho < 1$ de tal forma que la elasticidad de sustitución es $[1/1-\rho]$. $\varepsilon_t^i(r)$ es un choque en las preferencias que sigue una distribución Fréchet y, $\prod_{s=1}^t m(r_{s-1}, r_s)^{-1}$ representa el flujo permanente de costo en utilidad de mudarse de r_{s-1} en el período $s-1$ hacia r_s en el período s .

Assumiendo que β es la tasa de descuento, el bienestar del i 'ésimo individuo, en el primer período está dado por $\sum_t \beta^t u_t^i(r_{t-}^i, r_t^i)$, donde r_{t-}^i representa la historia de los lugares donde ha estado i antes de t , dado r_0^i . La dotación de comodidades y servicios está determinada por $a_t(r) = \bar{a}(r) \bar{L}_t(r)^{-\lambda}$ donde, $\bar{a}(r) > 0$ es una función continua exógenamente dada, $\bar{L}_t(r)$ es la población por unidad de tierra y $\lambda \geq 0$ es un parámetro fijo que representa la elasticidad de la dotación de comodidades y servicios a población. Esta forma permite reflejar las externalidades de la congestión de las que se hablaba anteriormente, lugares mas congestionados por una mayor población también tendrán un peor acceso a comodidades y servicios.

Los agentes obtienen ingresos de su trabajo, $w_t(r)$, y de la posesión de tierras³, se asume que todos los habitantes de cierto lugar (r) obtienen el mismo ingreso⁴, de tal forma que el ingreso total por habitante esta dado por $w_t(r) + R_t(r)/L_t(r)$, donde $R_t(r)$ representa la renta pagada por unidad de tierra. De esta forma, al asumir que los agentes no tienen deudas ni ahorros, es decir al suponer que el consumo es igual ingreso, se puede expresar la utilidad en función de este último:

$$U_t^i(\bar{r}_-, r) = \frac{a_t(r) \left[\frac{w_t(r) + R_t(r)/L_t(r)}{P_t(r)} \right] \varepsilon_t^i(r)}{\prod_{s=1}^t m(r_{s-1}, r_s)}$$

³Lo cual puede constituir un supuesto fuerte en algunos casos.

⁴Por lo tanto el modelo no tiene capacidad de distinguir efectos redistributivos de la renta al interior de un determinado lugar (r), pero sí entre diferentes lugares.

Asumiendo que $P_t(r)$ es el índice ideal de precios⁵, y que $\frac{w_t(r)+R_t(r)/\bar{L}_t(r)}{P_t(r)} = y_t(r)$, donde $y_t(r)$ es el ingreso real por habitante, se puede definir la utilidad como:

$$U_t^i(\bar{r}_-, r) = \frac{a_t(r) [y_t(r)] \varepsilon_t^i(r)}{\prod_{s=1}^t m(r_{s-1}, r_s)} \quad (2)$$

De esta forma se definen dos de los principales resultados del modelo, los niveles de bienestar a partir de la utilidad y los niveles de ingreso. Esta forma de modelar trata de captar los principales aspectos a estudiar, tratando de ser lo mas simple posible para simplificar el proceso de solución, por ello se dejan de lado aspectos clave y altamente heterogéneos en el mundo como la real posesión de tierras por parte de las personas, la composición salarial, el nivel educativo, entre otros muchos aspectos.

2.1.3. Movilidad

En cada período los agentes observan $\varepsilon_t^i(r)$ para decidir si permanecen en o si migran a otro lugar, decisión que está sujeta a $m(r, s)$, que es el costo bilateral de mudarse a otro lugar. Se asume que $m(r, s) = m_1(s)m_2(r)$ con $m(r, r) = 1$ para todo $r \in S$, este supuesto implica que no hay costo de quedarse en el mismo lugar y que en caso de mudarse, el costo es específico al origen y destino particular. Adicionalmente, este supuesto implica que la elección entre permanecer o migrar de cierto lugar depende solamente de las variables actuales y no de la historia o de las futuras características de la economía.

Bajo estos supuestos, el logaritmo de la utilidad de un individuo que ha vivido en r_0 en el período 0 y vive en r_1 en el período t es:

$$u_t(r) = a_t(r)y_t(r) \quad (3)$$

Esta ecuación relaciona la utilidad con el nivel de consumo y de dotación de comodidades y servicios y es una buena medida para establecer qué tan deseable es cierto lugar, pero no incluye costos de movilidad⁶. Alternativamente, se puede establecer una medida de bienestar que incluya $\varepsilon_t^i(r)$, los choques en las preferencias. Asumiendo que los individuos que se mueven por diferentes lugares tienen que pagar el costo $m(\cdot, \cdot)$, pero que al mudarse reciben reembolsados todos los costos de moverse ex-post, después de ciertos cálculos, la probabilidad de un individuo que reside en s prefiera el lugar r sobre todos los demás lugares v , es:

$$Pr(\tilde{u}_t(s, r) \geq \tilde{u}_t(s, v) \forall v \in S) = \frac{l_t(s, r)}{H(s)\bar{L}_{t-1}(s)}$$

Esta probabilidad corresponde a la fracción de población en s que se muda a r , donde $l_t(s, r)$ denota el número de personas moviéndose a, ó permaneciendo en r en el período t y, $\bar{L}_{t-1}(s)$ es la población total de s en $t-1$. El número de personas viviendo en r en el período t debe ser igual a quienes se mudaron a r mas quienes se quedaron allí, es decir:

$$H(r)\bar{L}_t(r) = \int_S l_t(s, r) ds$$

⁵El índice de precios ideal es muy utilizado en la literatura de comercio internacional, se obtiene a partir de un promedio ponderado de los precios de los diferentes bienes que consumen las personas. Es ideal porque los ponderadores son los parámetros de la función de utilidad. Para mas información ver Desmet et al. (2018) ó Eaton and Kortum (2002)

⁶Sin embargo los autores argumentan que al incluir los costos de migrar aquí podría sobreestimar las ganancias de la migración cuando realizan su ejercicio de disminuir las restricciones a la misma.

Por lo tanto después de ciertos cálculos:

$$H(r)\bar{L}_t(r) = \frac{u_t(r)^{\frac{1}{\alpha}} m_2(r)^{\frac{-1}{\alpha}}}{\int_S u_t(v)^{\frac{1}{\alpha}} m_2(v)^{\frac{-1}{\alpha}} dv} \bar{L} \quad (4)$$

Esta ecuación establece la proporción de población en el lugar r en el período t .

2.1.4. Tecnología y el problema de la Firma

La tecnología para producir los bienes de consumo ω está dada por:

$$q_t^\omega(r) = \phi_t^\omega(r)^{\gamma_1} Z_t^\omega(r) L_t^\omega(r)^\mu$$

Donde, $\phi_t^\omega(r)^{\gamma_1}$ representa la innovación o la calidad de la tecnología de la firma. $Z_t^\omega(r)$ es una variable aleatoria *iid* con distribución Fréchet que refleja cambios exógenos específicos al lugar r y al bien ω . Esta variable está determinada por un proceso dinámico que incluye las pasadas innovaciones hechas en r y en otros lugares $\phi_{t-}^\omega(\cdot)$. Adicionalmente $L_t^\omega(r)$ es la fuerza laboral, los parámetros $\gamma_1, \mu \in (0, 1]$ y la producción q_t^ω está medida por unidades de ω por unidad de tierra.

Hay un continuo de firmas compitiendo a la Bertrand, estas firmas enfrentan costos similares, por lo tanto sus precios van a ser similares. Las firmas van a ofertar por alquiler de tierra hasta que su beneficio sea cero, e incurren en $w_t(r)v\phi_t^\omega(r)^\xi$ costos de innovación tecnológica. Dada la ausencia de beneficios, la decisión dinámica de invertir se convierte en una secuencia de innovaciones estáticas, que maximiza los beneficios estáticos, por lo que no habrá necesidad de resolver un problema de optimización dinámica.

Entonces, después de observar la realización local de productividad $Z_t^\omega(r)$, la firma en r maximiza su beneficio por unidad de tierra eligiendo cuanto trabajo emplear y que tanto innovar:

$$\begin{aligned} \text{Max}_{L_t^\omega(r), \phi_t^\omega(r)} \quad & p_t^\omega(r, r) \phi_t^\omega(r)^{\gamma_1} Z_t^\omega(r) L_t^\omega(r)^\mu \\ & - w_t(r) L_t^\omega(r) - w_t(r) v \phi_t^\omega(r)^\xi - R_t(r) \end{aligned} \quad (5)$$

Donde P_t^ω es el precio del bien ω en r , equivalente a al precio en otro lugar neto de costos de transporte. Usando las condiciones de primer orden y teniendo en cuenta que el pago de renta por el uso de la tierra $R_t(r)$ garantiza los beneficios cero:

$$\frac{L_t^\omega(r)}{\mu} = \frac{\xi v \phi_t^\omega(r)^\xi}{\gamma_1} \quad (6)$$

Entonces usando las restricciones, tenemos que:

$$\bar{L}_t^\omega(r) = L_t^\omega(r) + v \phi_t^\omega(r)^\xi = \frac{L_t^\omega(r)}{\mu} \left[\mu + \frac{\gamma_1}{\xi} \right] \quad (7)$$

$$R_t(r) = \left[\frac{\xi(1-\mu)}{\gamma_1} - 1 \right] w_t(r) v \phi_t^\omega(r)^\xi \quad (8)$$

Por lo tanto, el total de empleados $\bar{L}_t^\omega(r)$ en (7) en el lugar r para el producto ω es la suma de los trabajadores que trabajan en producción $L_t^\omega(r)$ y aquellos que trabajan en innovación $v\phi_t^\omega(r)^\xi$. Adicionalmente, de acuerdo con (8), el pago de renta es proporcional al incremento en inversión para innovación de la firma. En equilibrio el número

de trabajadores contratados por unidad de tierra es idéntico para todos los bienes. Usando los resultados anteriores se pueden expresar los precios:

$$p_t^\omega(r, r) = \left[\frac{1}{\mu} \right]^\mu \left[\frac{v\xi}{\gamma_1} \right]^{1-\mu} \left[\frac{\gamma_1 R_t(r)}{w_t(r)v(\xi(1-\mu) - \gamma_1)} \right]^{(1-\mu) - (\gamma_1/\xi)} \frac{w_t(r)}{z_t^\omega(r)}$$

Para simplificar se puede expresar el precio como:

$$p_t^\omega(r, r) = \frac{mc_t(r)}{z_t^\omega(r)}$$

Donde:

$$mc_t(r) = \left[\frac{1}{\mu} \right]^\mu \left[\frac{v\xi}{\gamma_1} \right]^{1-\mu} \left[\frac{\gamma_1 R_t(r)}{w_t(r)v(\xi(1-\mu) - \gamma_1)} \right]^{(1-\mu) - (\gamma_1/\xi)} w_t(r) \quad (9)$$

es el costo marginal de producir en el lugar r .

2.1.5. Precios, Probabilidad de Exportar y Cuotas de Exportación

Sea $\varsigma(s, r) \geq 1$ los costos de iceberg de transportar un bien del lugar r al s . En ese caso el precio del bien ω , producido en r y vendido en s es igual al precio al que sería vendido en r , multiplicado por los correspondientes costos de transporte entre r y s :

$$p_t^\omega(s, r) = p_t^\omega(r, r)\varsigma(s, r) = \frac{mc_t(r)}{z_t^\omega(r)}\varsigma(s, r) \quad (10)$$

Adicionalmente se asume que la función $\varsigma(\cdot, \cdot) : S \times S \rightarrow \mathbb{R}$ es simétrica. La probabilidad de que cierto bien producido en el lugar r sea comprado en s está dada por:

$$\pi_t(s, r) = \frac{T_t(r) [mc_t(r)\varsigma(s, r)]^{-\theta}}{\int_s T_t(u) [mc_t(u)\varsigma(u, r)]^{-\theta} du} \quad (11)$$

Donde $T_t(r) = \tau_t(r)\bar{L}(r)^\alpha$, $\alpha, \theta \geq 0$. $\tau_t(r)$ refleja la tecnología del lugar r y es determinado endógenamente por un proceso dinámico que depende en pasadas innovaciones tecnológicas en este y otros lugares. La ecuación (11) se cumple para todos los lugares $r, s \in S$. Esta probabilidad se construye a partir de la probabilidad de que el precio de un bien producido en r sea el mas bajo dentro de todo el conjunto de lugares S a un radio de distancia δ de r , cuya función de densidad tiene parámetro θ . Esta expresión también corresponde con la cuota de exportación de r hacia s . Usando las expresiones anteriores y el concepto de índice ideal de precios mencionado anteriormente, se establece que el índice de precios del lugar s es:

$$P_t(s) = \Gamma \left(\frac{-\rho}{(1-\rho)\theta} + 1 \right)^{-(1-\rho)/\rho} \left\{ \int_s T_t(u) [mc_t(u)\varsigma(u, r)]^{-\theta} du \right\}^{-1/\theta} \quad (12)$$

$\Gamma(\cdot)$ representa una función de densidad gamma con parámetro $\frac{-\rho}{(1-\rho)\theta} + 1$, recordando que ρ es el parámetro de la función CES con la que se modela el consumo en la función de utilidad y proviene en esta expresión particular del índice ideal de precios.

2.1.6. Balanza Comercial

Se impone la restricción de mantener una balanza comercial equilibrada lugar por lugar, esto implica que tampoco

se tendrá un flujo de capitales entre lugares o regiones (no se puede prestar ni pedir prestado). Adicionalmente se deben cumplir las condiciones de vaciamiento del mercado, es decir, que el ingreso total en cierto lugar r debe ser igual al gasto total en ese mismo lugar. Entonces usando la condición de Euler y las ecuaciones (7) y (8) se tiene que:

$$w_t(r)H(r) [L_t(r) + v\phi_t^\omega(r)^\xi] + H(r)R_t(r) = \frac{1}{\mu}w_t(r)H(r)L_t(r)$$

Seguendo a Eaton and Kortum (2002), la cantidad de bienes que el lugar s compra de r debe ser igual a la fracción de gasto de bienes provenientes de r , entonces la condición de balanza comercial equilibrada se puede escribir como:

$$w_t(r)H(r)\bar{L}_t(r) = \int_s \pi_t(s,r)w_t(s)H(s)\bar{L}_t(s)ds \quad (13)$$

Donde el lado izquierdo muestra que el ingreso en el lugar r por sus exportaciones equivale a el gasto de las demás regiones en bienes de r .

2.1.7. Equilibrio

Para el lograr un equilibrio en este modelo, se requiere que el conjunto de lugares S y sus valores iniciales de tecnología, dotación de comodidades y servicios, población y funciones de tierra $((\tau_0, \bar{a}, \bar{L}_0, H) : S \rightarrow \mathbb{R}_{++})$, así como las funciones de comercio bilateral y costos de migración $((\zeta, m) : S \times S \rightarrow \mathbb{R}_{++})$ estén dados. Entonces un equilibrio competitivo es un conjunto de funciones $(u_t, \bar{L}_t, \phi_t, R_t, w_t, P_t, \tau_t, T_t) : S \rightarrow \mathbb{R}_{++}$ para todo $t = 1, \dots$, así como el conjunto de funciones $(\dot{p}_t, \dot{c}_t) : [0, 1] \times S \rightarrow \mathbb{R}_{++}$ para todo $t = 1, \dots$, de tal forma que para todo $t = 1, \dots$, :

1. Las firmas optimicen y los mercados se vacíen. Es decir se verifiquen las CPO del problema de la firma y la ecuación (7) de equilibrio en el mercado laboral.
2. La proporción del ingreso del lugar s gastado en bienes del lugar r esté dado por el costo marginal de producir en r (9) y las cuotas de exportación (11) para todo $r, s \in S$.
3. La balanza comercial implica que se verifica la igualdad de gastos e ingresos (13) para todo lugar $r \in S$.
4. Los mercados de tierra están en equilibrio, por lo que esta es asignada a quien realice la mas alta oferta. Entonces para todo lugar $r \in S$, $R_t(r) = \left[\frac{\xi - \mu\xi - \gamma_1}{\mu\xi + \gamma_1} \right] w_t(r)\bar{L}_t(r)$.
5. Dados los costos de migración y las preferencias idiosincrásicas, la gente decide donde vivir, por lo que la proporción de personas en el lugar r (4) se verifica para todo $r \in S$.
6. La utilidad asociada con el ingreso real y la provisión de comodidades y servicios en el lugar r está dada por: $u_t(r) = a_t(r) \left[\frac{w_t(r) + R_t(r)/\bar{L}_t(r)}{P_t(r)} \right] = \bar{a}_t(r)\bar{L}_t(r)^{-\lambda} \left[\frac{\xi}{\mu\xi + \gamma_1} \frac{w_t(r)}{P_t(r)} \right]$ para todo lugar $r \in S$, donde el nivel de precios está dado por la ecuación (12).
7. Los mercados laborales se vacían, por lo que $\int_s H(r)\bar{L}_t(r)dr = \bar{L}$
8. La tecnología avanza de acuerdo con lo que se invierta en innovación y con la innovación pasada tanto en el lugar r como en otros lugares, para todo $r \in S$.

2.1.8. Existencia del Equilibrio

En el modelo propuesto por Desmet et al. (2018) usando supuestos sobre la continuidad de las funciones mostradas anteriormente, en el rango de S ó de $S \times S$ e imagen en \mathbb{R}_{++} , se asume la no discontinuidad de las mismas en la representación de la actividad económica. Sin pérdida de generalidad, estas funciones se pueden modificar para hacerlas mas pendientes en las barreras naturales y se pueden utilizar aproximaciones discretas siguiendo a Allen and Arkolakis (2014). Usando lo anterior las ecuaciones que constituyen el equilibrio puede ser reducidas a un sistema que determina salarios, niveles de empleo y utilidad para todos los lugares $r \in S$, y puede probarse que existe una solución única para este sistema. Aunque este equilibrio cumple con la condición de existencia de una senda de crecimiento balanceado, donde todas las variables crecen a la misma tasa, se asumirá un crecimiento nulo en la población. Esto con el fin de evitar efectos de escala vinculados a la relación positiva entre el bienestar y el producto agregado con el tamaño de la población.

2.2. Como solucionar el modelo

2.2.1. Calibración de parámetros

En cuento a la calibración de los distintos parámetros requeridos, Desmet et al. (2018) utilizan una gran variedad de fuentes de la literatura que se encuentran resumidas en la tabla 1 del artículo en referencia. En cuanto a los intereses particulares de este proyecto, los parámetros para el cálculo de los costos de transporte son tomados de Allen and Arkolakis (2014). En el *Apéndice 1* se adjunta la tabla tomada de Desmet et al. (2018) para facilitar su consulta.

Los parámetros que no son tomados de la literatura son estimados a partir de los siguientes métodos:

1. Parámetro de provisión de comodidades y servicios está gobernada por la ecuación $a_t(r) = \bar{a}(r)\bar{L}_t(r)^{-\lambda}$ donde el parámetro λ cuantifica el efecto inverso de el tamaño de la población (elasticidad) sobre las comodidades. Tomando logaritmos se transforma en $\log(a_t(r)) = E(\log(\bar{a}(r))) - \lambda \log \bar{L}_t(r) + \varepsilon_a(r)$ que puede ser estimada por mínimos cuadrados en dos etapas. En Desmet and Rossi-Hansberg (2013) se usan datos de 192 ciudades para dotación de comodidades y servicios y población.
2. En cuanto a los parámetros referentes a la tecnología, reescribiendo la ecuación de crecimiento de la utilidad para el país c en la senda de crecimiento balanceada asumiendo la misma tasa de crecimiento para los países: $\log(u_{t+1}(c)) - \log(u_t(c)) = \log(y_{t+1}(c)) - \log(y_t(c)) = \alpha_1 + \alpha_2 \log \sum_{S_c} L_c(s)^{\alpha_3}$. Entonces el crecimiento está determinado por la distribución espacial de la población $L_c(s)^{\alpha_3}$. Luego de normalizar para eliminar el efecto del tamaño de un país y convertir a las celdas que representan un lugar r se estima esta ecuación, usando datos de G-Econ 4.0 para cuatro años (1990, 1995, 2000 y 2005) concentrándose en países con mas de 20 celdas, para un total de 106 países. Se pueden permitir tasas de crecimiento diferentes entre países en la senda de crecimiento balanceado y los resultados permanecen relativamente estables.

2.2.2. Algoritmo de Solución

Para solucionar el modelo, se usa un algoritmo iterativo propuesto por Zabreyko et al. (1975), donde:

1. Se plantea una solución arbitraria inicial para la distribución de la variable de interés, por ejemplo la utilidad u_t .
2. Se introduce esta solución arbitraria $\hat{u}_t^0(r)$ y se resuelve para la ecuación de interés, obteniendo $\hat{u}_t^1(r)$.
3. Se calcula la distancia entre las dos soluciones $dist_t^1 = \int_s [\hat{u}_t^1(r) - \hat{u}_t^0(r)]^2 dr$.

4. Si $dist_t^1 < \varepsilon$ donde ε es un nivel exógeno de tolerancia, se toma $\hat{u}_t^1(r)$ como solución, en caso contrario se usa este último como insumo para resolver la ecuación de interés y se obtiene un nuevo valor $\hat{u}_t^2(r)$.
5. Se repite el procedimiento hasta que algún valor $\hat{u}_t^n(r)$ cumpla con la condición mostrada en el punto 4.

Este algoritmo se implementa dentro del ambiente de MATLAB, paquete informático que se utiliza para realizar la programación del modelo en la práctica.

2.2.3. Valores Iniciales de las Variables

Una parte fundamental para que el modelo se pueda solucionar es establecer los valores iniciales de cada una de las variables fundamentales, como por ejemplo $\hat{u}_t^0(r)$ para la utilidad, empleado en la sección anterior para el algoritmo de solución. A continuación se resumen los métodos empleados por Desmet et al. (2018) con este propósito.

- Costos de transporte. En este caso se sigue la metodología de Allen and Arkolakis (2014) con el fin de obtener los coeficientes para calcular $\zeta(r)$. Luego usando datos de www.natureearthdata.com se observan vías férreas, autopistas, u otras en celdas de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ y se agregan a celdas de tamaño $1^\circ \times 1^\circ$ y así junto con los parámetros se calcula $\zeta(r)$. Una vez obtenido este ultimo, se usa el «Fast Marching Algorithm» para calcular el menor costo entre dos celdas diferentes. Para este cálculo se emplean parámetros de la literatura de análisis empírico de las ecuaciones de gravedad para modelos de comercio.
- Dotación de comodidades y servicios locales ($\bar{a}_t(r)$) y productividad ($\tau_0(r)$). En este caso se usan datos de la National Oceanic and Atmospheric Administration «NOAA» para $H(r)$ de la población $\bar{L}_0(r)$ y $w_0(r)$ aproximado por el PIB per cápita. Manipulando la ecuaciones reducidas que se obtienen a través del concepto de equilibrio y usando se resuelve para valores de $\bar{a}(r)/u_0(r)$ y $\tau_0(r)$. Para distinguir $\bar{a}(r)$ separadamente del nivel inicial de utilidad, se emplean datos de Gallup World Poll para lograr una estimación de $\hat{u}_t^0(r)$ con ayuda de parámetros de la literatura.
- Costos de migración. Usando la ecuación (4) y las ecuaciones derivadas del concepto de equilibrio se obtiene una solución para $\hat{m}_2(\cdot)$ en función de los valores iniciales de $\bar{a}(\cdot)$, $\tau_1(\cdot)$, $H(\cdot)$ y $\bar{L}_1(\cdot)$. Esta forma de medir los costos de migración implica que cada individuo tiene una «dotación» con el valor de su lugar de nacimiento, las personas que nacen en «mejores» lugares tienen una dotación mayor.

Apéndice 1

Figura 1: Tabla de Parámetros. Tomada de Desmet et al. (2018)

TABLE 1 PARAMETER VALUES	
Parameter	Target/Comment
1. Preferences: $\Sigma \beta^t u_t(r)$, where $u_t(r) = \bar{a}(r) \bar{L}_t(r)^{-\lambda} (r) \int_0^1 c_t^i(r)^\rho d\omega^{1/\rho}$ and $u_0(r) = e^{i\theta_0}$	
$\beta = .965$	Discount factor
$\rho = .75$	Elasticity of substitution of 4 (Bernard et al. 2003)
$\lambda = .32$	Relation between amenities and population
$\Omega = .5$	Elasticity of migration flows with respect to income (Monte et al. 2018)
$\psi = 1.8$	Deaton and Stone (2013)
2. Technology: $q_t^i(r) = \phi_T(r)^{\alpha} z_t^i(r) L_T^i(r)^{\theta}$, $F(z, r) = e^{-\tau_i(r) z}$, and $T_T^i(r) = \tau_i(r) \bar{L}_i(r)^{\mu}$	
$\alpha = .06$	Static elasticity of productivity to density (Carlino et al. 2007)
$\theta = 6.5$	Trade elasticity (Eaton and Kortum 2002; Simonowska and Waugh 2014)
$\mu = .8$	Labor or nonland share in production (Greenwood et al. 1997; Desmet and Rappaport 2017)
$\gamma_1 = .319$	Relation between population distribution and growth
3. Evolution of productivity: $\tau_i(r) = \phi_{i-1}(r)^{\gamma_1} \left[\int_0^1 \eta_{i-1}(s) ds \right]^{-\gamma_1} \tau_{i-1}(r)^{\gamma_1}$ and $\psi(\phi) = \nu \phi^{\xi}$	
$\gamma_2 = .993$	Relation between population distribution and growth
$\xi = 1.25$	Desmet and Rossi-Hansberg (2015)
$\nu = .15$	Initial world growth rate of real GDP of 2%
4. Trade Costs	
$c_{\text{road}} = .1434$	
$c_{\text{high_rail}} = .4302$	
$c_{\text{high_rail}}^{\text{india}} = .5636$	
$c_{\text{high_rail}}^{\text{china}} = 1.1272$	Allen and Arkolakis (2014)
$c_{\text{high_rail}}^{\text{colombia}} = 1.9726$	
$c_{\text{water}} = .0779$	
$c_{\text{high_water}} = .0779$	
$T = .393$	Elasticity of trade flows with respect to distance of $-.93$ (Head and Mayer 2014)

Referencias

- Allen, T. and Arkolakis, C. (2014). Trade and the topography of the spatial economy. *The Quarterly Journal of Economics*, 129(3):1085–1140.
- Asturias, J. (2020). Endogenous transportation costs. *European Economic Review*, 123:103366.
- Banerjee, A., Duflo, E., and Qian, N. (2020). On the road: Access to transportation infrastructure and economic growth in china. *Journal of Development Economics*, 145:102442.
- Desmet, K., Nagy, D. K., and Rossi-Hansberg, E. (2018). The geography of development. *Journal of Political Economy*, 126(3):903–983.
- Desmet, K. and Rossi-Hansberg, E. (2013). Urban accounting and welfare. *American Economic Review*, 103(6):2296–2327.
- Eaton, J. and Kortum, S. (2002). Technology, geography, and trade. *Econometrica*, 70(5):1741–1779.
- Hong, J., Chu, Z., and Wang, Q. (2011). Transport infrastructure and regional economic growth: evidence from china. *Transportation*, 38(5):737–752.
- Krugman, P. (1991). Increasing returns and economic geography. *Journal of political economy*, 99(3):483–499.
- Maparu, T. S. and Mazumder, T. N. (2017). Transport infrastructure, economic development and urbanization in india (1990–2011): Is there any causal relationship? *Transportation research part A: policy and practice*, 100:319–336.
- Núñez, J. and Torres, F. S. (2000). Geography and economic development in colombia: a municipal approach.