

DOCUMENTOS DE
TRABAJO SOBRE
**ECONOMÍA
REGIONAL
Y URBANA**

**Red de comercio departamental en
Colombia: Enfoque gravitacional y
análisis topológico de redes**

Por: Diana María Cortázar-Gómez
Juan F. Pineda-Guarín

Núm. 285
Diciembre, 2019



BANCO DE LA REPÚBLICA
CENTRO DE ESTUDIOS ECONÓMICOS REGIONALES (CEER) - CARTAGENA

Red de comercio departamental en Colombia: Enfoque gravitacional y análisis topológico de redes*

Diana María Cortázar-Gómez[†]
Banco de la República
dcortago@banrep.gov.co

Juan F. Pineda-Guarín[‡]
Universidad del Rosario
juanf.pineda@urosario.edu.co

Las opiniones contenidas en el presente documento son responsabilidad exclusiva de los autores y no comprometen al Banco de la República ni a su Junta Directiva.

Resumen

En este documento se estudian los flujos de comercio intra e inter departamental en Colombia para el periodo 2015-2018. Utilizando los datos del volumen de carga transportada por vía terrestre, se efectúa un análisis topológico de redes que permite construir, analizar y visualizar la estructura de la Red de Comercio Departamental en Colombia (RCD). Se aprecia una RCD con una estructura centro-periferia, concentrada en seis departamentos, que además, ejercen una fuerte relación entre ellos. Se destaca Buenaventura como el segundo nodo que envía más carga hacia las otras zonas del país, después de Cundinamarca, pero con una balanza deficitaria en cantidades. Por su parte, Bogotá se ubica como el mayor receptor de carga transportada por vía terrestre interdepartamentalmente. En cuanto a las conexiones autodirigidas, Antioquia y Valle del Cauca (sin Buenaventura) presentan un grado elevado de comercio intradepartamental. En términos de conectividad, se visualiza una red con alta integración en cuanto a las conexiones existentes entre los departamentos, pero un bajo grado en cuanto a la fuerza de dichas relaciones, la cual depende del volumen de carga comercializado. Por otro lado, los modelos gravitacionales estimados sugieren que el flujo de comercio depende positivamente del Producto Interno Bruto de origen y destino, los departamentos que colindan entre sí, los puertos marítimos y las zonas francas, pero negativamente de la distancia.

Clasificación JEL: R1, F1, D85, C5.

Palabras clave: Colombia, comercio interno, transporte terrestre de carga, topología de redes, modelo gravitacional.

*Agradecemos los valiosos comentarios y sugerencias de Juan Esteban Carranza, Fredy Alejandro Gamboa y Jaime Bonet. Los autores son responsables de cualquier error u omisión.

[†]Profesional especializado del Banco de la República.

[‡]Economista de la Universidad del Rosario.

Intra-national trade network in Colombia: Gravity approach and network analysis*

Diana María Cortázar-Gómez[†]

Banco de la República
dcortago@banrep.gov.co

Juan F. Pineda-Guarín[‡]

Universidad del Rosario
juanf.pineda@urosario.edu.co

The opinions contained in this document are the sole responsibility of the authors and do not commit Banco de la República or its Board of Directors.

Abstract

This document studies intra and inter-departmental trade flows in Colombia for the period 2015-2018. Network analysis is carried out to build, visualize and study the structure of the system. Finding to explain the determinants of the structure presented by the Departmental Trade Network (DTN), the hypothesis of the gravity model is contrasted. In general, the results show that the DTN is dense, and on average the departments are well integrated in the extensive margin of trade. However, when observing the intensive margin, the level of integration is low and trade is concentrated in few departments. The DTN presents a center-periphery structure, where the hierarchy is led by 6 nodes. Buenaventura stands out as a maritime port with a trade deficit in quantities, related to the absence of strengthened export baskets in the departments. Bogotá also stands out as the main transport node receiving merchandise. The gravity model suggest that the trade flows depends positively on the Gross Domestic Product of origin and destination, the departments that border each other, the maritime ports, the free zones, and also negatively on the distance.

Classification JEL: R1, F1, D85, C5.

Key Words: Colombia, intra-national trade, freight transport, network analysis, gravity model.

*We thanks Juan Esteban Carranza, Fredy Alejandro Gamboa and Jaime Bonet for their comments. Any remaining erros are our own.

[†]Economist, Banco de la República.

[‡]Economist, Universidad del Rosario.

1 Introducción

La dinámica del comercio al interior de los países cobra relevancia por su efecto sobre el crecimiento económico, la integración de la economía doméstica y la competitividad de las regiones de un país. El comercio terrestre intranacional tiene un rol fundamental en la cadena productiva de todos los sectores de bienes y servicios; en Colombia según el Ministerio de Transporte, el sector transporta el 77%¹ del total de la carga movilizada incluyendo bienes intermedios y bienes finales, por lo que su dinámica impacta directamente la estabilidad y el nivel de precios de la economía, así como las decisiones de consumo e inversión en las regiones.

La actividad de transporte de carga por vía terrestre, a través de la cual se comercializan los bienes, es una de las relaciones funcionales más importantes que existen entre los departamentos y suscita la existencia de un sistema. Para el caso en que el sistema de comercio está bien conectado, puede dinamizar el desarrollo y el crecimiento del país, fortaleciendo a los productores y consumidores. Al conformar un sistema, los departamentos generan *spillovers* de política económica y su dinámica impacta a los demás departamentos² mediante los canales de transmisión y las conexiones que se desarrollan en la red con el transporte terrestre.

Para el fortalecimiento de la economía y la integración económica de los departamentos en la red interna de comercio, se hace importante caracterizar la estructura del sector de manera precisa y entender el comportamiento de las relaciones bilaterales y sus determinantes, así como la selección de socios comerciales, y los efectos que puede tener o no, la implementación de políticas económicas de un departamento en materia de transporte de carga, sobre otro departamento con el que comercie de manera intensiva.

Pese a la importancia de los flujos de comercio al interior de los países, los estudios son escasos y la literatura está enmarcada principalmente en la caracterización de las redes de comercio mundial; mientras que, debido a la falta de datos, los flujos de comercio interno carecen de evidencia empírica que explique su evolución y estructura. De esta manera, el

¹El sector Ferroviario tiene una participación del 19%, Fluvial 3% y Aéreo 1%.

²Wang et al. (2012), proporcionan un análisis específico sobre el impacto que tienen las aglomeraciones y su conectividad en el país.

principal objetivo del presente documento es el estudio de los flujos de comercio intra e inter departamental para el periodo 2015-2018, haciendo uso de datos del Ministerio de Transporte sobre el volumen de carga transportada por vía terrestre, se efectúa un análisis topológico de redes que permite construir y analizar la estructura de la red de comercio intranacional.

Adicionalmente, se indaga sobre la conformación jerárquica de la red, el grado de integración, y la selección de socios comerciales (departamentos), con el propósito de mostrar la importancia y posición que tiene cada departamento en la Red de Comercio Departamental (RCD), con especial atención en Buenaventura por su influencia en la Red como uno de los principales puertos marítimos de Colombia debido al volumen de carga que maneja, lo que sugiere separar en el análisis su estructura del Valle del Cauca para identificar claramente su relevancia como nodo dentro de la RCD.

Finalmente, se contrasta la hipótesis del modelo gravitacional de comercio expuesto en un primer escenario por Jan Tinbergen en 1962, para explicar en términos departamentales los principales determinantes de los flujos comerciales que componen la RCD. El modelo expone que el intercambio comercial entre dos departamentos es directamente proporcional a la multiplicación de sus tamaños, medido en términos del Producto Interno Bruto (PIB), e inversamente proporcional a la distancia entre ellos. Los resultados se contrastan frente a las métricas y estadísticas obtenidas del análisis topológico de redes aplicado a la RCD.

A partir de los objetivos planteados, se busca contribuir a la escasa literatura de redes de comercio departamental en Colombia, dando respuesta a las siguientes inquietudes respecto a la RCD: ¿Cuáles son las principales características de la red de comercio en el país?, ¿Cómo es la estructura y conectividad de la red?, ¿Cuál es el grado de integración de los departamentos?, ¿Cuáles son los principales socios comerciales de cada departamento?, ¿Cuál es la estructura del flujo comercial del puerto de Buenaventura? y ¿Cuáles son los determinantes del flujo de comercio departamental en Colombia?.

Dentro de los hallazgos se destaca la alta conectividad entre todos los departamentos de la Red, con vínculos distribuidos homogéneamente entre departamentos; sin embargo, la

intensidad, que denota la fuerza de las relaciones comerciales a partir del flujo de carga transportado, es muy débil en la mayoría de departamentos, por lo que el comercio se concentra en unos pocos. Esto a su vez, refleja una estructura centro-periferia, en donde la jerarquía está liderada por los departamentos de Cundinamarca, Antioquia, Valle del Cauca(s.B)³, Buenaventura, Bogotá y Atlántico.

En particular, sobresale Buenaventura como un nodo predominantemente remitente de carga transportada y con una baja intensidad en el volumen de carga recibido (toneladas), denotando una balanza comercial deficitaria en cantidades, con importaciones dirigidas principalmente al Valle del Cauca (s.B) y Bogotá, y en menor medida, a Cundinamarca y Antioquia. Asimismo, la cantidad de nodos que envían carga de manera intensiva a Buenaventura (carga con mayor probabilidad de tipo exportación) es muy baja (Valle del Cauca(s.B) y Cundinamarca). De otro lado, Bogotá⁴ resalta como un nodo predominantemente receptor con muy pocas conexiones intensas de salida de carga transportada, enviando 0,5 veces el volumen que recibe de otros departamentos. En cuanto a Cundinamarca, Antioquia, Valle del Cauca(s.B) y Atlántico, sobresalen por tener niveles de recepción y envío de carga más equitativos en su intensidad, reflejo de economías tanto productoras como consumidoras.

También se encuentra que existen diferenciales importantes en la selección de socios comerciales y las conexiones autodirigidas⁵ tienen un peso importante en la red. Si bien Valle del Cauca(s.B) se destaca como receptor de carga transportada dentro de RCD, ese nivel está impulsado por las conexiones autodirigidas que tiene, a diferencia de nodos como Bogotá y Antioquia que registran una marcada variedad de departamentos que les envían mercancía, denotando una mayor diversificación en sus departamentos socios.

³En adelante Valle del Cauca (s.B) se refiere a Valle del Cauca sin Buenaventura. Aún cuando Buenaventura es un municipio perteneciente al departamento del Valle del Cauca, se analiza como un nodo independiente debido a su importancia comercial como puerto marítimo de Colombia.

⁴De acuerdo con cifras de la Aerocivil y el Ministerio de Transporte, en Bogotá la proporción de carga nacional que sale por vía aérea representa sólo el 1,4% respecto al total de carga salida desde la capital del país por ambas modalidades (terrestre y aérea), lo que denota la importancia del transporte terrestre de carga en la región. Por otro lado, Bogotá concentra alrededor del 48% de la carga nacional salida por todos los aeropuertos de Colombia, según cifras de la Aerocivil; no obstante, la carga aérea participa con el 1% del transporte total de carga del país, por lo que su importancia relativa disminuye considerablemente frente a la movilización de carga total.

⁵Conexiones autodirigidas: se refiere a los intercambios de volumen de carga entre los municipios de un mismo departamento.

En cuanto al modelo gravitacional, los hallazgos sugieren que el flujo de comercio depende positivamente del PIB de origen y destino, los departamentos que colindan entre sí, los puertos marítimos y las zonas francas, y depende negativamente de la distancia, controlando por los términos de resistencia multilateral⁶. Es relevante destacar que según el modelo, los habitantes de un departamento i , muestran preferencias por consumir más bienes provenientes de otros departamentos j .

Es importante referir que el presente documento no estudia la evolución del transporte de carga por carretera al disponer de un periodo corto que no permite obtener conclusiones sobre las variaciones de la red a través del tiempo. Tampoco se presenta un análisis sobre la clasificación de los productos transportados en el país, lo cuál podría abordarse en futuras investigaciones. Pese al enfoque del análisis del comercio a partir de la carga transportada intra e inter departamental, no se pretende abordar la disyuntiva de causalidad económica entre la situación actual de los sistemas de transporte por vía terrestre y el desarrollo del mercado interno en el territorio nacional, ni tampoco se enfoca en la calidad, estado y/o dimensión de la estructura vial del país; no obstante, brinda valiosos resultados para la planeación de programas de infraestructura vial.

Este documento se compone de 6 secciones. La segunda, aborda la revisión de literatura propia del análisis de topológico de redes de comercio y modelos gravitacionales. La tercera contiene la fundamentación de las metodologías a implementar y los datos utilizados como insumo. La cuarta sección indaga en el análisis topológico de redes sobre la RCD y expone sus principales características. La quinta comprende la aplicación del modelo gravitacional de comercio sobre los departamentos de Colombia, para explicar los principales determinantes que intervienen en el proceso de estructuración de la RCD. En la última sección se refieren las principales conclusiones y hallazgos del presente estudio.

⁶Variables que hacen referencia a que el flujo comercial entre i y j no está determinado únicamente por las variables que relacionan a los departamentos directamente, sino también por la relación que tenga i o j con todos los demás departamentos que hacen parte del sistema o RCD.

2 Revisión de literatura

El análisis de los flujos comerciales se basan principalmente en la integración mundial, dando paso a políticas públicas que favorezcan la generación de relaciones entre potenciales socios comerciales o afiancen las relaciones existentes. En particular, para el análisis de la dinámica comercial al interior de un país se cuenta con pocos estudios enfocados en la red interna de comercio; en este sentido, se realiza una revisión de antecedentes en ambos escenarios: interno y externo.

Un referente en el análisis del comercio internacional y su caracterización a través de la teoría de redes es el estudio realizado por Benedictis y Tajoli (2011), cuyo propósito fue examinar la Red de Comercio Mundial (RCM) y su evolución en el tiempo. Con datos de la Dirección de Estadísticas Comerciales del Fondo Monetario Internacional (FMI) para las décadas de 1950 a 2000, los autores muestran la ausencia de integración de los países en la RCM, es decir, observan una red que no está plenamente conectada; a lo que se adiciona la concentración del flujo comercial en un pequeño grupo de países. En cuanto a las estadísticas propias del análisis topológico de redes, los autores señalan un incremento en las relaciones comerciales, lo que disminuye paulatinamente la estructura jerárquica de la RCM. Adicionalmente, muestran la heterogeneidad en la elección de socios comerciales de cada país, lo que afianza el cambio de una estructura centro-periferia a una estructura más global y compleja. De otro lado, al analizar los países pertenecientes a la Organización Mundial de Comercio, los autores encuentran una mayor integración con muchos más vínculos comerciales que los países no socios, y una red menos centralizada que la del resto del mundo.

Recientemente, Cepeda, Gamboa, León y Rincón (2019) analizaron la Red Mundial de Comercio mediante análisis topológico de redes, con el objetivo de estudiar su estructura y evolución entre 1995 y 2014. Utilizando el método de muestreo, medición y visualización de la red aplicado a los datos de exportaciones en valor FOB⁷ de las Naciones Unidas (ComTrade), encuentran que la globalización comercial se ha reflejado en un mayor número de relaciones comerciales, mostrando una distribución densa y homogénea entre

⁷Free-On-Board: valor de las exportaciones antes de aplicar el valor de transporte, seguro, descarga y transporte del puerto de llegada al destino final.

regiones; sin embargo, su intensidad, medida por el peso de salida o entrada, sigue concentrada en un grupo pequeño de países. Uno de los aportes más relevantes se refiere al punto de inflexión que marcan los análisis de redes después de la crisis de 2008-2009, con una estructura jerárquica antes liderada por Estados Unidos y Alemania, pero desde 2007 liderada por dichos países más China como uno de los mayores contribuyentes al comercio mundial. De otro lado, descartan una estructura núcleo-periferia a partir de la visualización de una red de alta densidad pero homogénea en grado, pues la mayoría de países presenta un alto grado de conexiones y, por tanto, una diversificación de socios comerciales.

Para América Latina (AL), Beaton, Cebotari, Ding y Kmaromi (2017) estudian a través del análisis de redes y del modelo gravitacional, las medidas de centralidad de la red de AL frente a otras regiones del mundo. Los resultados revelan importantes avances en la integración de AL a la red mundial, destacándose las conexiones a diversos mercados, aunque en términos de intensidad o fuerza de los vínculos, la red se muestra aún un poco más débil. Adicionalmente, AL presenta una menor integración que otras regiones del mundo, pese a destacarse Brasil, Colombia, Argentina, Perú y Chile como los países más integrados y con mayor diversificación comercial en la red. Por su parte, los vínculos comerciales de la red han aumentado de manera sustancial, principalmente en los países grandes a excepción de México, último que sobresale en la red por el flujo de comercio bilateral con Estados Unidos. Finalmente, encuentran un efecto significativo de las variables de gravedad sobre el comercio bilateral, con resultados positivos según el tamaño de la economía y negativos según la distancia o el acceso al mar.

Ahora bien, en el contexto del comercio interno para Colombia, se destaca el estudio de Pérez (2005), quien se concentra en el estado de la red vial del país y la movilización interna de carga. En el análisis de la movilización de carga en Colombia a partir de los datos de la encuesta origen-destino para 2001 del Ministerio de Transporte, el autor encuentra un claro resultado respecto al Valle del Cauca(s.B), Antioquia y Cundinamarca como las estaciones de mayor movilización de carga en todo el país, siendo el comercio bilateral entre Antioquia y Valle, y entre Cundinamarca y Atlántico los de mayor intercambio. Adicionalmente, Cundinamarca se caracterizó como el mayor

receptor neto de carga movilizada por carretera; mientras se reconoce para el Valle del Cauca(s.B), la relevancia de Buenaventura por su dinámica como puerto marítimo que permite la conexión con mercados internacionales, al igual que Barranquilla y Cartagena. Entretanto, Nariño y los Santanderes son importantes por su vínculo con los mercados de Ecuador y Venezuela, pese a ser los departamentos con menores volúmenes de carga movilizada. Aunque las regiones con acceso al mercado internacional tienen un gran potencial para generar vínculos con la Red Mundial de Comercio, el autor señala que sólo el 2% de la carga movilizada en Colombia tiene origen o destino internacional.

En el mismo esquema de análisis nacional, Castro (2014) hace seguimiento a las relaciones comerciales de la industria en el mercado interno colombiano, examinando los flujos en dirección y magnitud a partir de la movilización de carga por vía terrestre. Al igual que Pérez (2005), Castro hace uso de la encuesta origen-destino del Ministerio de Transporte, en esta ocasión para el año 2008, con el objetivo de identificar los sectores y regiones que dinamizan el flujo de carga nacional. Entre los principales resultados, el autor encuentra que el comercio interno en Colombia está concentrado en sub-sectores industriales como el de alimentos y bebidas, y sustancias y productos químicos, en tanto las capitales con mayor movimiento de carga son las que muestran un alto grado de especialización industrial (Bogotá, Medellín y Cali). De acuerdo con la visualización de la red comercial del país, el autor señala que la diversificación industrial dinamiza el comercio por la variedad de oferta especializada, aunque esto no se cumple para todas las manufacturas, tales como la fabricación de muebles, caucho y plástico; sin embargo, son estas industrias muy especializadas las que tienen un gran potencial para atender demandas locales y generar encadenamientos con grandes nodos de producción nacional.

3 Metodología y datos

3.1 Teoría de redes

El análisis topológico de redes es eficiente para analizar un conglomerado de agentes que se relacionan entre sí. Al caracterizar la red, los agentes se convierten en nodos y la variable que los relaciona, en conexiones. Para este estudio, el sistema objeto de

caracterización es el flujo de comercio intra e inter departamental, los departamentos son representados por medio de nodos (n) de origen (i) o destino (j). Por otro lado, las conexiones (m) representan el envío de carga transportada -típico de una red dirigida- y pueden estar ponderadas por la cantidad de toneladas transportadas desde i hacia j . Lo anterior conforma la Red de Comercio Departamental (RCD).

Según la metodología de Newman (2010), se construye la matriz de adyacencia (A_{ij}) de dimensiones $n \times n$ que representa matemáticamente la red, donde los elementos de la diagonal denotan el comercio intra-departamental⁸. Los valores diferentes de cero dentro de la matriz de adyacencia pueden ser reemplazados por la cantidad de carga transportada desde i hacia j , con el objetivo de conformar la matriz ponderada.

$$A_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si existe una conexión desde } i \text{ hacia } j \\ 0 \text{ en otro caso} \end{array} \right\}$$

El análisis topológico de redes proporciona estadísticas descriptivas para caracterizar la estructura de la red y las conexiones entre los nodos que la conforman. Este documento utiliza las métricas dirigidas al análisis de la estructura y conectividad de la red como un conjunto, y por otro lado se enfoca en examinar la posición e importancia de cada nodo.

A continuación, se explican las estadísticas descriptivas utilizadas, las cuáles son incorporadas frecuentemente en el análisis de redes de comercio mundial:

1. Estadísticas de conectividad y estructura de la red.

- Densidad (δ): Hace referencia al número de conexiones existentes (m) en la red como porcentaje del número de conexiones posibles (n^2) y refleja qué tan bien conectada está la red. δ toma valores entre 0 y 1, valores cercanos a 1 reflejan un grado de densidad alto y, por tanto, una red con alta conectividad.

2. Estadísticas de caracterización de cada nodo.

- Grado de entrada (φ_{in}) y salida (φ_{out}): Denota el número de conexiones entrantes y salientes de cada nodo. El máximo valor que puede tomar cada

⁸Para más sobre conexiones autodirigidas ver Newman (2010)

una es igual al número de nodos existentes (n).

- Intensidad de entrada (γ_{in}) y salida (γ_{out}): γ_{in} (γ_{out}) es la suma por columnas (filas) de la matriz ponderada, y captura que tan fuertes o intensas son el total de conexiones de entrada (salida) de cada nodo.
- Cercanía: Es una medida de centralidad que calcula la inversa del camino más corto (en términos del número de conexiones) para conectar dos nodos (un nodo i se puede conectar con los demás nodos j por medio de una conexión). En una red dirigida, la cercanía se calcula en términos de la dirección que toman las conexiones (entrada o salida), y con esto se obtiene la cercanía de entrada (ρ_{in}) y la cercanía de salida (ρ_{out}). Al igual que todas las medidas de centralidad, los valores altos reflejan una mayor centralidad.
- Intermediación (ι): Al igual que la Cercanía, es una medida de centralidad. Mide que tanto un nodo se encuentra en medio del camino más corto entre otros vertices.

3.2 Fundamentación metodológica ecuación gravitacional

Las aplicaciones metodológicas para el análisis del modelo gravitacional de comercio se extienden principalmente alrededor de los modelos log-linealizados y estimados por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). Sin embargo, bajo la presencia de heteroscedasticidad y la desigualdad de Jensen, dichos modelos presentan estimaciones sesgadas e inconsistentes de las verdaderas elasticidades. Frente a esta dificultad, Santos Silva y Tenreyro (2006) proponen la aplicación de la ecuación gravitacional de comercio en su forma multiplicativa, estimada por el método de Poisson Pseudo Máxima Verosimilitud (PPML)⁹ por sus siglas en inglés), la cual propone no sólo abordar la presencia de heteroscedasticidad, sino también, una forma adecuada de tratar los valores igual a cero en la variable dependiente que se producen naturalmente cuando no existe un flujo de comercio entre un par de agentes, y que al log-linearizar desaparecen de la muestra.

Santos Silva y Tenreyro además de considerar la ecuación gravitacional de Tinbergen

⁹Poisson Pseudo Maximun Likelihood.

(1962), evalúan su aplicación con efectos fijos como lo propone Anderson y van Wincoop (2003). Tal y como lo exponen estos autores, validar el proceso de log-linealización en la ecuación gravitacional implica que el logaritmo natural del error sea estadísticamente independiente de los errores, pero si la varianza del error depende de variables explicativas de la ecuación como la distancia o el PIB, el valor esperado del logaritmo natural del error dependerá de los regresores, lo que viola la condición de consistencia del modelo MCO. Otro factor fundamental es el caso en que la variable dependiente sea cero, proceso en el que no es posible la log-linealización. Dicha situación ha sido corregida por diversos autores eliminando los registros de las observaciones sin flujo comercial, lo que no corrige la dependencia del error de las covariables y, por tanto, un MCO seguirá siendo inconsistente. Asimismo, considerar la aplicación de Mínimos Cuadrados No Lineales también desconoce la heteroscedasticidad, brindando un peso mayor a observaciones donde la esperanza condicional es más grande, pero son dichas observaciones las que también registran una mayor variación generando un estimador ineficiente que depende de un número restringido de observaciones. Es así como el método que utiliza el presente estudio se basa en las recomendaciones realizadas por Santos Silva y Tenreyro (2006) y adoptadas por la Organización Mundial del Comercio.

3.3 Datos y variables

La información sobre el envío de carga transportada¹⁰ es reportada por el Ministerio de Transporte a través del Registro Nacional de Despacho de Carga por Carretera - RNDC, con un promedio de 100.000 observaciones mensuales y con datos geográficos desagregados por municipio. Si bien los datos consisten en el envío de carga transportada bilateralmente, se genera la agregación por departamento (Tabla 2, Apéndice). Esta información permite obtener los datos de comercio por departamento de origen i y el departamento j al cual es destinada la carga. Con esto se tienen 33×33 parejas

¹⁰Los flujos de carga no distinguen entre la carga dirigida hacia zonas portuarias y la que se moviliza internamente, por lo que dicha característica puede sobreestimar el volumen de carga movilizada entre departamentos.

departamentales (incluyendo Bogotá D.C¹¹ y Buenaventura¹² como nodos individuales, y excluyendo San Andrés y Providencia por la necesidad de transportar bienes por vía aérea o marítima). Es importante señalar que además del envío de carga transportada inter-departamentalmente, se cuenta con los datos intra-departamentales, dado que los datos son reportados a nivel municipal. Después de procesar los datos se eliminan las observaciones en las que como consecuencia de un error de medición, no es posible identificar los departamentos *i* o *j* en la base, dejando el 99,5% de las cifras disponibles. La información utilizada para este documento corresponde a los años 2015, 2016, 2017 y 2018; no obstante, para efectos del análisis y debido a que los resultados son muy similares año tras año, se usa la información del año 2018 en la visualización de los datos, de acuerdo con los objetivos del presente estudio.

Para el modelo gravitacional, se utiliza el PIB a precios constantes, reportado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. También, se utiliza la distancia geodésica entre las capitales o principales municipios de los departamentos (Tabla 2, Apéndice) a partir de la información del Instituto Nacional de Vías - INVIAS.

Para el resto de variables incluidas en el modelo se establecen las Zonas Francas Permanentes y Especiales según la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia - ANDI¹³. En las zonas francas permanentes participan varias empresas, mientras que en las especiales una sola empresa desarrolla sus actividades económicas. Del mismo modo, a partir de la información generada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, se identifican aquellos departamentos que son colindantes entre sí. La distancia relativa es construida a partir del PIB y la distancia geodésica, utilizando la fórmula 1 del Apéndice.

¹¹Es de aclarar que se extrae de Cundinamarca a Bogotá, por su relevancia en términos económicos como capital del país.

¹²Se destaca que para todo el estudio se extrae del Valle del Cauca al municipio de Buenaventura, con el objetivo de analizar su estructura comercial de manera independiente dada la importancia de su puerto marítimo en el comercio exterior e interior del país. De este proceso surge el nodo Valle del Cauca (s.B), que refiere al Departamento del Valle del Cauca sin Buenaventura.

¹³Entidad que a su vez define las zonas francas como “áreas geográficas delimitadas dentro del territorio colombiano, en donde se desarrollan actividades industriales de bienes y de servicios, o actividades comerciales, bajo una normatividad especial en materia tributaria, aduanera y de comercio exterior”.

4 Red de Comercio Departamental

4.1 Red de comercio departamental - agregada por regiones

La red de comercio regional para el año 2018 se puede visualizar en la Figura 1, donde la agregación de cada uno de los departamentos se realizó según la clasificación del Banco de la República (Tabla 1 del Apéndice). Los nodos corresponden a las regiones, el tamaño de cada nodo corresponde a la contribución porcentual de cada región en el envío de carga transportada nacional, los nodos están ubicados geográficamente y su color está determinado por la región. Las conexiones representan el envío de carga transportada, la flecha indica la dirección y el grosor de cada línea denota un mayor volumen, al igual que la intensidad del color (guiados por la barra lateral).

Al observar la Figura 1 se puede concluir que la red de comercio regional está conectada en un 100%, todas las regiones comercian entre sí. El envío de carga por región, está liderado por los nodos de Suroccidente, Costa Caribe, Centro y Nororiente (en ese orden), en esta clasificación las conexiones auto-dirigidas son determinantes al ser las más intensas en la red (conexiones más gruesas y de color rosado). En lo que respecta únicamente a la relación con las demás regiones, la región Centro es el nodo que más envía carga transportada, seguido por los nodos de la Costa Caribe y Suroccidente. Las clasificaciones anteriores denotan la importancia del comercio intraregional, donde el orden de las regiones cambia según la inclusión o no de las conexiones auto-dirigidas; mostrando un porcentaje de comercio intraregional alto en los nodos de Suroccidente y Costa Caribe, principalmente.

Las regiones que concentran un gran volumen de carga recibida de otros nodos son la Costa Caribe, Bogotá, Centro y Noroccidente, reflejando un porcentaje de comercio interregional alto. Es de resaltar que adicionando el comercio intrarregional al volumen de carga recibida, los nodos con mayor cantidad son la Costa Caribe, Suroccidente y Centro.

En cuanto a las regiones de Eje Cafetero y Suroriente son los nodos que presentan una menor intensidad en el volumen de carga recibida y enviada, con conexiones débiles.

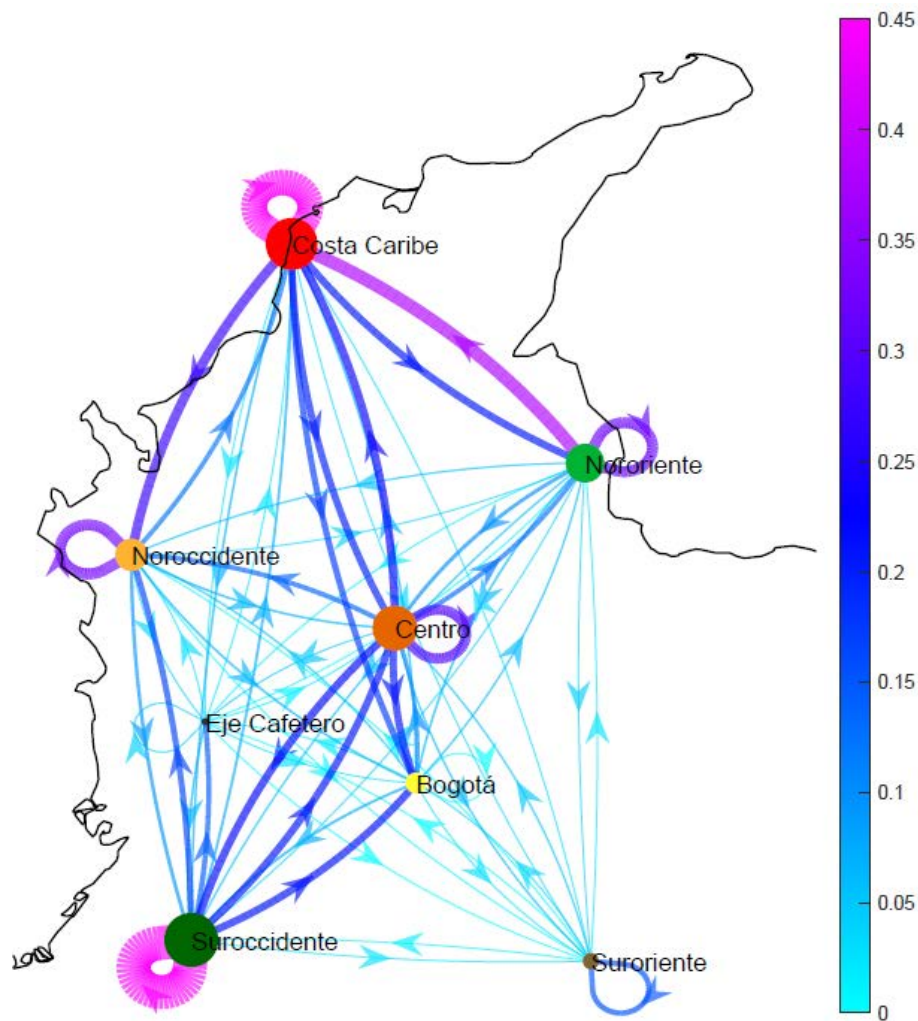


Figura 1: Red de Comercio Regional. Los nodos corresponden a las regiones, el tamaño de cada nodo corresponde a su contribución porcentual en el envío de carga transportada, están ubicados geográficamente y su color está determinado por la región. Las conexiones representan el envío de carga transportada y la flecha indica la dirección, el grosor de cada línea denota un mayor volumen, al igual que la intensidad del color (guiados por la barra lateral). Fuente: Cálculo de los autores.

En el caso de Bogotá, sus conexiones auto-dirigidas no tienen un peso importante en la red, sin embargo, tiene conexiones intensas en la recepción de carga transportada proveniente de la región Centro, Suroccidente y Costa Caribe (en ese orden), clasificándose de esta manera como una región netamente receptora de carga, recibiendo 1,95 veces el volumen de carga que envía. Teniendo en cuenta las conexiones intraregionales de Noroccidente, esta región se puede clasificar como un nodo receptor neto de carga que recibe 1,38 veces la carga que envía, destacando una alta intensidad en sus conexiones con la región Costa Caribe, principalmente el volumen de carga que

recibe de esa región. El nodo de Eje Cafetero es receptor, recibiendo 1,6 veces la carga que envía, y se destaca por tener una conexión de entrada de mercancía fuerte proveniente del Valle del Cauca (s.B). En lo que respecta a la región Suroriente, recibe 1,12 veces la carga que envía y sus conexiones con otras regiones son relativamente iguales.

En contraste con lo anterior, hay regiones que en el balance de carga recibida y enviada, tienen un mayor volumen de carga enviada. Este es el caso de la región Centro, Suroccidente, Nororiente y Costa Caribe. El nodo Centro presenta una dinámica en la que recibe 0,78 veces el volumen que envía y tiene una conexión de salida fuerte con la región Costa Caribe. Para el caso de Suroccidente, tiene una conexión de salida fuerte hacia el nodo de Centro, a su vez la región Suroccidente recibe 0,85 veces la carga que envía. La región Nororiente recibe 0,8 veces el volumen que envía y reporta un volumen de carga enviado a la Costa Caribe muy significativo. Por último, la región Caribe también es emisora de carga neta pero a una proporción más baja, recibe 0,97 veces el volumen de carga que envía, resaltando la cantidad dirigida a la región Noroccidente.

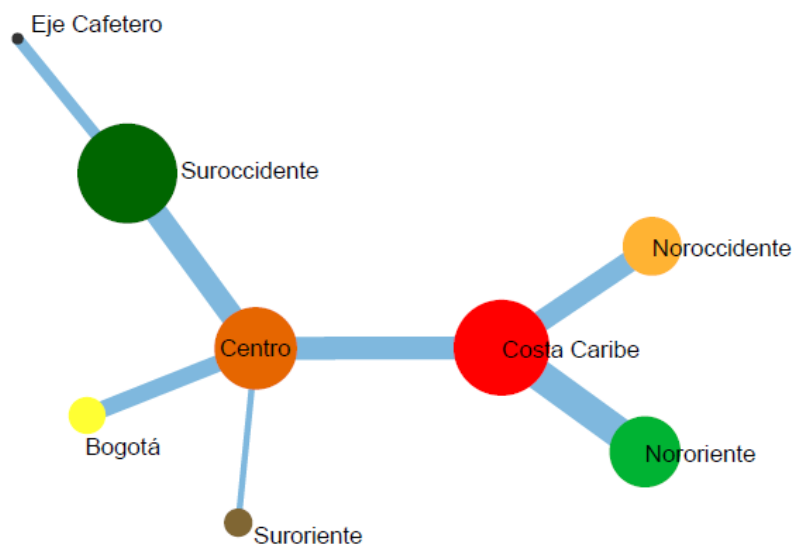


Figura 2: ACM - Departamentos agregados por regiones 2018. Los nodos corresponden a las regiones, el tamaño de cada nodo corresponde a su contribución porcentual en el envío de carga transportada en el ámbito nacional, su ubicación corresponde a la fuerza gravitacional y su color está determinado por la región a la cual pertenece (Costa Caribe, Centro, Eje Cafetero, Nororiente, Suroriente, Suroccidente Noroccidente y Bogotá D.C). Las conexiones representan la conexión más fuerte resultante de sumar el envío y la recepción de carga transportada por parejas de regiones y el grosor de cada línea denota un mayor volumen. Fuente: Cálculo de los autores.

El resumen de lo anterior se puede observar en la Figura 2, donde se muestra el Árbol

de Cobertura Mínima (ACM) de la red de comercio departamental agregada por regiones. Este grafo extrae la conexión más fuerte de cada nodo, para reducir la dimensionalidad de la red, sintetizando los elementos de conectividad e interacción analizados anteriormente. En el ACM los nodos corresponden a las regiones, su diámetro a la contribución en el envío total de carga transportada y su color está determinado por la región. Las conexiones corresponden a la relación comercial más importante de cada región (que para este caso es entendida como el comercio bilateral entre dos regiones, carga recibida y enviada), y la posición de los nodos refiere la fuerza gravitacional del nodo central al que están sujetos.

Así es como el comercio bilateral más fuerte para Eje Cafetero es con el nodo de Suroccidente, que a su vez, tiene la relación comercial más intensa con la región Centro. Siguiendo con el mismo análisis, Bogotá está relacionada más fuertemente con el Centro, al igual que la región Suroriente. Por su parte el Centro tiene su relación comercial más fuerte con la Costa Caribe, al igual que Nororiente. Noroccidente por su parte, recibe y transporta más carga de la Costa Caribe, nodo que a su vez está más relacionado comercialmente con la región Nororiente.

Con el objetivo de profundizar el análisis de acuerdo a los objetivos de este documento, se estudia cada uno de los departamentos de las regiones, lo que permite entender de manera precisa la estructura que presenta la red de comercio regional, explicada a partir de la Red de Comercio Departamental (RCD).

4.2 Red de Comercio Departamental

Para el análisis de la Red de Comercio Departamental (RCD) se visualiza la información del transporte de carga terrestre para el año 2018, esto al identificar que la red es similar en los tres años precedentes. La RCD se aprecia en la Figura 3 (realizando un acercamiento visual sobre el croquis de Colombia, sin embargo, el mapa completo está disponible en los Anexos Figura 1A). En la red, el tamaño de cada nodo corresponde a su contribución porcentual en el envío de carga transportada en el país, su ubicación corresponde a la posición geográfica de los departamentos y su color está determinado por la región a la cual pertenece (Costa Caribe, Centro, Eje Cafetero, Nororiente, Suroriente, Suroccidente

Noroccidente y Bogotá D.C). Las conexiones representan el envío de carga transportada por departamento y la flecha indica la dirección desde el nodo i hacia el nodo j , el grosor de cada línea denota un mayor volumen, al igual que la intensidad del color (guiados por la barra lateral).

Se puede apreciar que un gran volumen de envío de carga transportada está concentrado en unos pocos departamentos (envío inter e intradepartamental). Cundinamarca, Valle del Cauca (s.B), Buenaventura, Antioquia, Atlántico y Bolívar (en ese orden), presentan nodos de gran tamaño y son los departamentos que realizan una mayor contribución en el envío de carga transportada por vía terrestre en el país. Al mismo tiempo, existe una relación más fuerte entre estos nodos, concentrando flujos comerciales más intensos, denotados por las conexiones de color rosado y líneas más gruesas. Analizando exclusivamente la mercancía enviada interdepartamental, los principales nodos remitentes son Cundinamarca y Buenaventura, seguido por Valle del Cauca (s.B), Atlántico y Bolívar, desplazando del análisis al departamento de Antioquia. Se destaca el municipio de Buenaventura, donde se ubica el principal puerto marítimo de Colombia, como el segundo nodo de mayor importancia en el envío de carga hacia otros departamentos, mostrando la importancia del consumo de bienes intermedios y finales de procedencia principalmente extranjera.

En cuanto a la recepción de carga transportada interdepartamentalmente, Bogotá es el nodo más importante en la RCD, siendo el principal destino de carga transportada y generando una contribución importante en el consumo nacional de bienes. Seguido de Bogotá, se encuentran Valle del Cauca (s.B), Antioquia, Cundinamarca, Atlántico y Bolívar, como departamentos que más reciben carga de otros nodos. En este caso, la dinámica de Buenaventura es bastante limitada, la carga que recibe de otros departamentos (mercancía predominantemente de exportación) es muy baja y la cantidad de mercancía que recibe es 0,36 veces la cantidad que envía, mostrando una balanza comercial en cantidades altamente deficitaria.

Es importante mencionar que al agregar la carga recibida inter e intradepartamental, los principales nodos receptores son Antioquia, Valle del Cauca (s.B), Bogotá, Cundinamarca

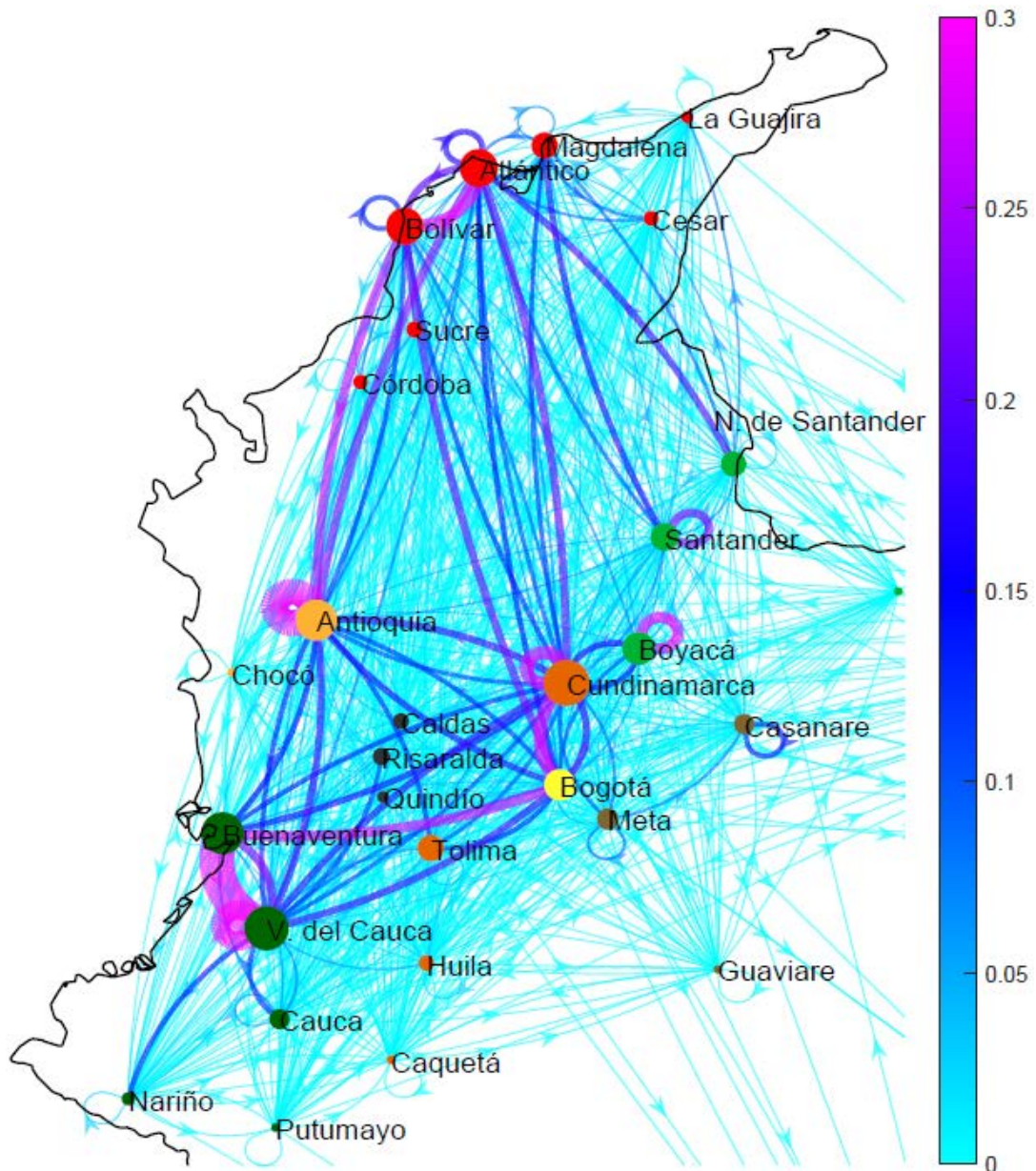


Figura 3: Red de Comercio Departamental (RCD) - con acercamiento visual. Los nodos corresponden a los departamentos, el tamaño de cada nodo corresponde a su contribución porcentual en el envío de carga transportada en el ámbito nacional, su ubicación corresponde a la posición geográfica de los departamentos y su color está determinado por la región a la cual pertenece (Costa Caribe, Centro, Eje Cafetero, Nororiente, Suroriente, Suroccidente Noroccidente y Bogotá D.C). Las conexiones representan el envío de carga transportada por departamento y la flecha indica la dirección, el grosor de cada línea denota un mayor volumen, al igual que la intensidad del color (guiados por la barra lateral). La RCD sin acercamiento visual se encuentra disponible en el Anexo - Figura 1A. Fuente: Cálculo de los autores.

y Atlántico (en ese orden), reflejando un grado elevado de carga transportada intradeparamentalmente en los nodos de Antioquia, Valle del Cauca (s.B), Cundinamarca y Atlántico (conexiones auto-dirigidas).

En contraste con lo anterior, departamentos como Vaupés, Amazonas, Guaviare, Chocó, Arauca, Caquetá, Guainía, Putumayo y Vichada, aportan una contribución muy pequeña al volumen total de envío y recepción de carga, con nodos muy pequeños y conexiones débiles con los demás departamentos, líneas de color magenta y muy delgadas (ver Figura 1A - Anexos).

De la misma forma, en la Figura 3 se puede observar que la RCD presenta una estructura de centro-periferia, al evidenciar una concentración del comercio entre los departamentos con una estructura productiva y consumo fuerte, que atrae y genera transporte de bienes, mientras que departamentos que presentan una estructura productiva simple y consumo más débil, tienden a quedar más apartados y segregados de la red, aspecto que se refleja en las regiones Suroriente y Nororiente que se encuentran en la periferia de la RCD. Lo anterior también se relaciona con la ausencia de una estructura vial que facilite el transporte de carga terrestre, y por tanto, una provisión de bienes que facilite y promueva el consumo y la producción.

Con las métricas de integración usuales (comercio/PIB) resulta difícil saber el grado de integración de cada departamento dentro en la red de comercio. El análisis topológico de redes proporciona herramientas muy útiles para describir el grado de conectividad de la red y de integración de cada departamento. Observando la densidad de la red (δ), para el año 2015 se encontraba en 0,79 y para el 2018 en 0,80, lo cual refleja que la RCD está, en términos generales, bien conectada con vínculos distribuidos homogéneamente entre los departamentos. Abreviando lo anterior, la densidad explica que de un 100% de posibles conexiones, son efectuadas un 80%.

Para continuar, se analiza el grado de integración departamental en el margen extensivo e intensivo de comercio. El primero referente a la cantidad de relaciones comerciales existentes que tiene un nodo, medido por el grado de entrada y salida ($\varphi_{in}, \varphi_{out}$). Asimismo, el margen intensivo de comercio es analizado a partir de la fuerza de las relaciones comerciales ya existentes, en topología de redes esto es el grado de intensidad ($\gamma_{in}, \gamma_{out}$) de entrada y salida (toneladas).

En la Figura 4 panel (a), está representado el margen extensivo de comercio mediante

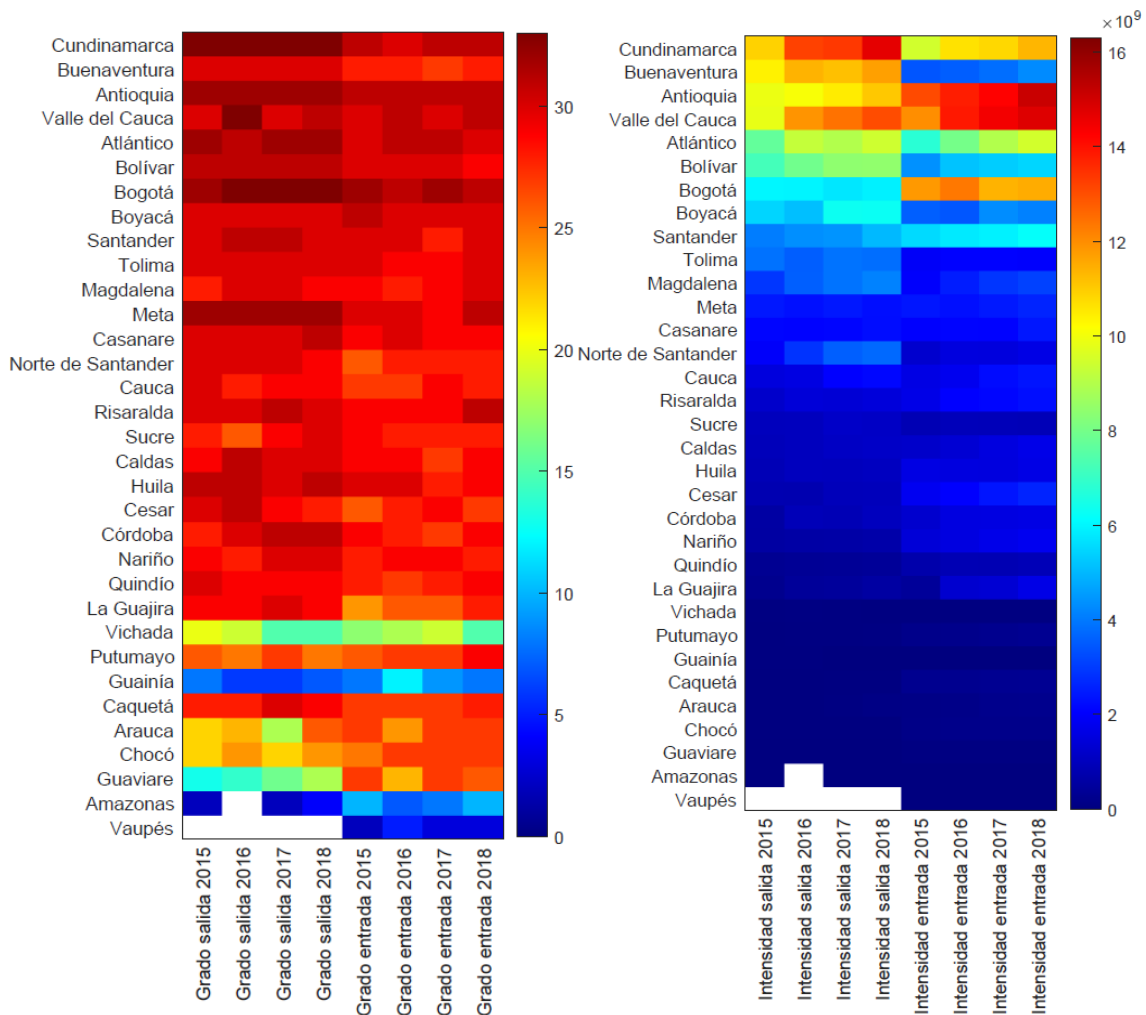
el grado de entrada y salida para cada departamento. El grafo muestra la información correspondiente a los años 2015 a 2018, el color de cada sección del mapa de calor (intersección entre ejes) está determinado por el número de conexiones de entrada o salida que tiene un nodo en el transporte de carga, según la barra de color. En general, se observa una distribución homogénea en la mayoría de nodos, con colores rojo y rojo intenso para la entrada y salida de carga transportada, es decir, que existe un número importante de relaciones comerciales entre los departamentos y en promedio un grado de integración alto en el margen extensivo, con una reciprocidad en las conexiones de entrada y salida.

En particular, Vichada, Guainía, Amazonas y Vaupés no están bien integrados en el margen extensivo en la RCD, tienen muy pocos socios comerciales para el envío y recepción de carga (colores de tonalidad azul, y amarillo). Por otro lado, es de resaltar el caso de Guaviare, que tiene un grado de integración más elevado en la recepción de carga (colores rojos) en comparación con el envío (colores azules).

En general, el margen extensivo de entrada y salida tiene magnitudes similares (ver barra de color), es decir, el número de departamentos de los cuales i recibe mercancía es proporcional al número de departamentos al cual i envía, por lo que existe una reciprocidad en el envío de carga transportada entre los nodos. Mostrando que la probabilidad de que i le envíe a j , dado que j le envía a i , es alta.

Continuando con el análisis de integración y conectividad, es necesario analizar qué tan fuertes son las conexiones entre los departamentos a través del margen intensivo de comercio. La Figura 4 panel (b) presenta el grado de intensidad de entrada y salida para los años 2015 a 2018, el color de cada sección está determinado por la cantidad de carga transportada (guiados por la barra de color). Según lo anterior, existen vínculos comerciales muy débiles en la mayor parte de los departamentos (tonalidad azul oscuro) y una concentración de los flujos comerciales en los departamentos que encabezan la lista, con tonalidades rojas, amarillas y magentas en el mapa de calor.

La oferta se concentra principalmente en Cundinamarca, seguido en menor grado por Valle del Cauca (s.B), Buenaventura y Antioquia (acorde a los resultados previos), mientras que la demanda se concentra en Antioquia, Valle, Bogotá y Cundinamarca,



(a) Grado (medido en el número de conexiones)

(b) Intensidad (medido en toneladas)

Figura 4: Mapa de calor, grado e intensidad 2015-2018. Fuente: Cálculo de los autores.

clasificación en la que las conexiones autodirigidas tienen un peso importante (como se mencionó anteriormente). Se confirma la tendencia presentada en Buenaventura, donde la intensidad de salida es alta (proxy de importaciones - colores rojos) y la intensidad de entrada (proxy de exportaciones - colores azules), es baja, mostrando un consumo alto de bienes importados, intermedios o finales, en comparación con la exportación.

Es de notar que en el panel (b), las tonalidades azules en la barra de calor se concentran en el 80% del gráfico, mientras que para el panel (a) los colores rojos de la barra de calor se concentran en la mayor parte del grafo; esto refleja que en promedio, la integración en el margen intensivo es baja, medida en términos del grado de intensidad de los nodos, y que el grado de integración promedio en el margen extensivo es

alto. Lo anterior muestra una concentración de los flujos comerciales en unos pocos departamentos, aún cuando un porcentaje elevado de los nodos comercian entre sí. Es preciso señalar que Vichada, Guainía, Amazonas y Vaupés presentan una integración baja tanto en el margen extensivo como intensivo de comercio con tonalidades azules en ambos grafos.

Analizando de manera precisa como se relacionan los departamentos entre sí y explicando en detalle los diferenciales en los grados de integración, se estudia la matriz de adyacencia y ponderada, que como fue mencionado anteriormente, muestran la existencia o no de comercio entre los nodos, así como el volumen del comercio bilateral.

La matriz que representa la red se muestra en la Figura 5 para el año 2018 (con un acercamiento visual en el top 14 de nodos, el mapa de calor completo para la totalidad de los departamentos se puede ver en los Anexos, Figura 2A). Las filas denotan el envío de carga transportada desde i hacia j , y las columnas evidencian la recepción (así, horizontalmente podemos ver el envío de carga y verticalmente la recepción), y el volumen transportado está determinado por la barra color. Los espacios en blanco en el grafo representan un valor cero en la matriz de adyacencia y, por tanto, la ausencia de una relación comercial entre dichos departamentos. Cabe mencionar que para cada nodo la suma de todas las celdas por columnas representa el grado de intensidad de entrada (γ_{in}), mientras que la suma por celdas en filas, el grado de intensidad de salida (γ_{out}), estadísticas descriptivas previamente analizadas.

En la Figura 5 se pueden observar los socios comerciales de cada nodo, ponderados por el volumen de carga transportada. Los departamentos de Bogotá, Antioquia, Cundinamarca, Buenaventura, Valle del Cauca (s.B), Atlántico y Bolívar son los principales socios comerciales en general, pero con nodos destino distribuidos de una forma heterogénea.

Precisando lo anterior, Cundinamarca es un nodo predominantemente emisor de carga transportada, sus principales socios comerciales en el envío de carga son Cundinamarca (conexiones auto-dirigidas), Bogotá, Atlántico, Antioquia y Valle del Cauca (s.B). En menor medida resaltan los nodos de los cuales recibe carga, siendo Bogotá, Boyacá y Buenaventura sus principales remitentes, pero con una distribución homogénea en la carga

recibida de los demás nodos (tonalidad magenta verticalmente).

Buenaventura (nodo netamente emisor) tiene como primordiales destinos de carga importada a Valle del Cauca (s.B) y Bogotá, y en menor medida a Cundinamarca y Antioquia. En lo que respecta a los nodos que le envían carga (con mayor probabilidad de tipo exportación), resalta el Valle del Cauca (s.B), seguido por Cundinamarca; mostrando la ausencia de otra conexión fuerte de envío hacia el puerto, lo que denota el déficit en cantidades de la balanza comercial de Buenvanetura, dejando ver que no hay diversidad de departamentos que tienen una canasta exportadora fortalecida en cantidades que permita aumentar la carga dirigida hacia el puerto.

Para el caso de Antioquia, es clasificado como un nodo receptor y sus principales socios en el envío de carga son: Antioquia (comercio intradepartamental y conexión más intensa), Bogotá y Valle del Cauca (s.B), en su respectivo orden. En contraste, los nodos con los que sostiene una conexión fuerte de entrada de mercancía son más variados, empezando por Antioquia, Bolívar, Atlántico, Valle del Cauca (s.B), Cundinamarca y Buenaventura (en ese orden). Mostrando relaciones comerciales fuertes con la Costa Caribe.

Valle del Cauca (s.B) es un nodo remitente de carga transportada, y tiene conexiones más fuertes en el envío con Valle del Cauca (s.B), seguido por Buenaventura, Antioquia y Bogotá. En lo que respecta al volumen recibido, resaltan los nodos de Buenaventura, Cundinamarca y Antioquia, como principales socios comerciales.

Por su parte, Bogotá no sobresale en el envío de carga transportada, sino como receptor, donde es uno de los principales socios comerciales de cada uno de los departamentos mencionados, entre los que se destaca la mercancía que recibe proveniente de Cundinamarca y Buenaventura. Además de Bogotá, resalta Antioquia por el volumen de carga recibida y la heterogeneidad en los departamentos que le envían carga transportada por carretera, mientras los demás departamentos tienen menos de cinco nodos de los cuales procede carga de manera intensiva, dejando una distribución más homogénea y baja en promedio.

En general, es de resaltar la importancia de las conexiones auto-dirigidas, como las

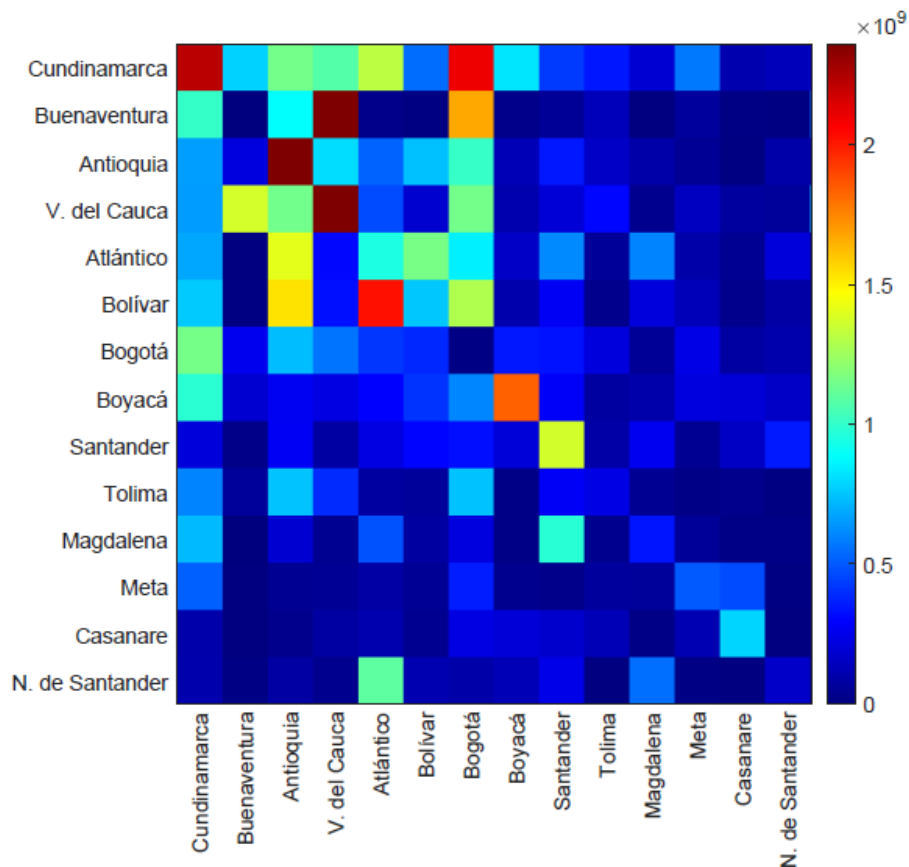


Figura 5: Matriz de adyacencia y matriz ponderada (2018), mapa de calor. Fuente: Cálculo de los autores.

conexiones más fuertes en la red, caso que se evidencia en Antioquia con un alto volumen de recepción de carga dentro de la RCD (según el grado de intensidad de entrada), determinado principalmente por el comercio intradepartamental, a diferencia de Bogotá, que se destaca por su elevado comercio interdepartamental, convirtiéndose en el principal nodo receptor de carga transportada de la RCD.

En los demás departamentos no mencionados, se observa un dominio del color azul en la Figura 5, reflejo de intensidades de comercio más débiles y homogéneas en el resto de departamentos. También se puede apreciar en la Figura 2A de los Anexos, una gran cantidad de celdas en blanco, lo que denota la ausencia de comercio bilateral entre los nodos que se encuentran en la periferia y que no tienen conexiones intensas de entrada o salida; aún ni con los departamentos colindantes, lo que genera una segregación importante en la RCD.

Por otro lado, en la Tabla 1 se pueden contrastar las estadísticas de los principales nodos (año 2018) y de esta manera observar la importancia y posición de los departamentos en la RCD, con métricas no utilizadas previamente. En general, se confirman los resultados expuestos previamente, con un indicador de cercanía de entrada (ρ_{in}), que resalta los nodos descritos en la tabla como los más centrales, mientras que los departamentos de Vaupés, Amazonas, Guainía, Vichada y La Guajira, son los nodos menos centrales de acuerdo con dicha métrica (Tabla 4 - Anexos). Es preciso señalar que esta medida esta sujeta al grado de entrada y no tiene en cuenta otras métricas como la intensidad.

Realizando el mismo análisis para la cercanía de salida (ρ_{out}) y la Intermediación (ι) se mantiene la misma tendencia a un análisis de centro-periferia con los mismos departamentos como protagonistas.

Tabla 1: Estadísticas Red de Comercio Departamental 2018.

Departamento	Principales nodos de la red						
	φ_{in}	φ_{out}	ρ_{in}	ρ_{out}	ι	$\gamma_{out}^a/$	$\gamma_{in}^a/$
Cundinamarca	33	31	0,02	0,019	27,78	10.899.841	9.462.071
Buenaventura	30	28	0,018	0,017	2,15	10.395.992	3.401.486
Antioquia	32	31	0,019	0,019	12,28	9.904.226	13.083.098
Valle del Cauca (s.B)	30	30	0,018	0,018	5,37	9.838.928	11.984.528
Atlántico	32	30	0,019	0,018	10,3	7.708.968	6.777.551
Bolívar	31	30	0,019	0,018	8,15	7.215.516	4.362.024
Bogotá	32	32	0,019	0,019	27,78	6.000.007	11.817.927
Meta	32	30	0,019	0,018	20,73	2.419.873	2.386.566

a/ Toneladas. φ_{in} :Grado entrada, φ_{out} :Grado salida, ρ_{in} :Cercanía de entrada
 ρ_{out} :Cercanía de salida, ι :Intermediación, γ : Intensidad

Resaltando la dinámica del nodo de Buenaventura y su importancia en la RCD, se presenta el gráfico 5A que muestra únicamente las conexiones de entrada y salida de carga transportada en las que Buenaventura es partícipe. En el grafo, el tamaño de cada nodo refiere el envío de carga transportada, que para Buenvanetura es proxy de importaciones y para el caso de los otros nodos, denota la exportación de carga transportada. Las conexiones representan el comercio y la flecha indica su dirección, el grosor de cada

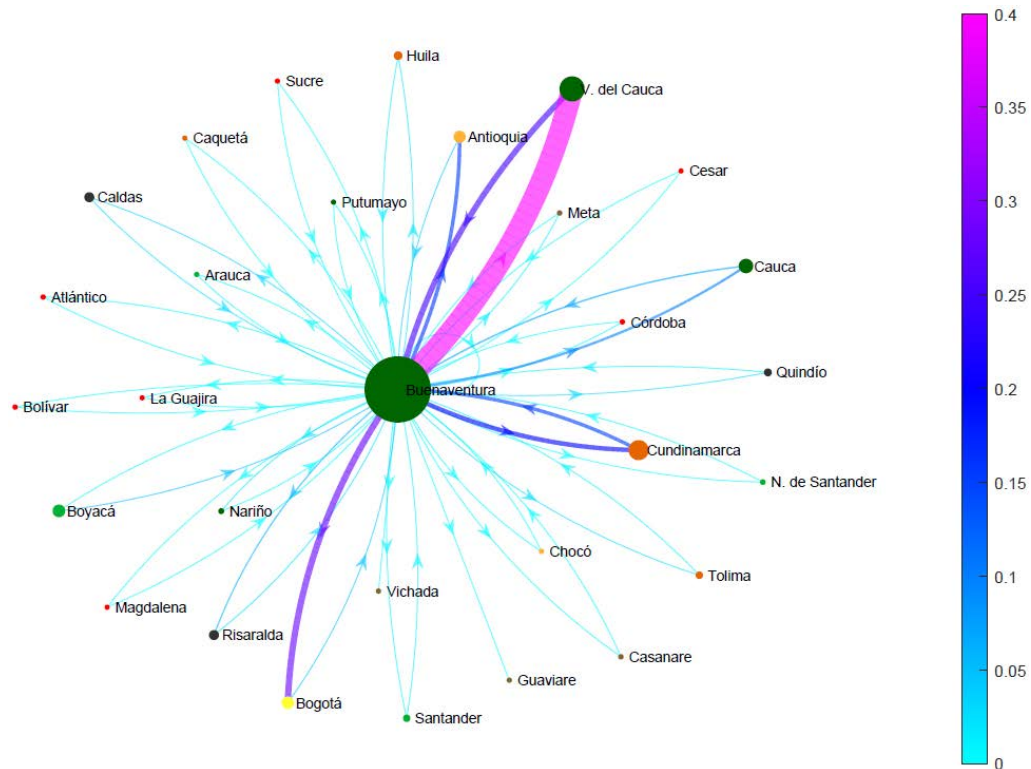
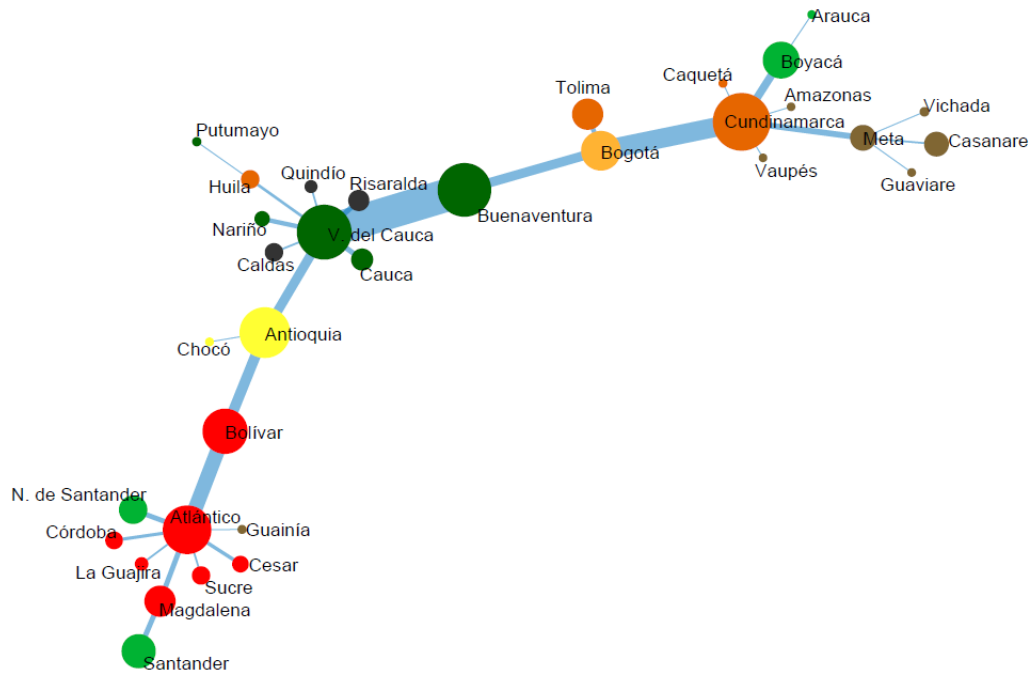


Figura 5A: Red de Comercio Departamental (RCD) - Buenaventura. Los nodos corresponden a los departamentos, el tamaño de cada nodo corresponde a su contribución porcentual en el envío de carga transportada en el ámbito nacional, su ubicación corresponde a la fuerza gravitacional que ejerce Buenaventura y su color está determinado por la región a la cual pertenece (Costa Caribe, Centro, Eje Cafetero, Nororiente, Suroriente, Suroccidente Noroccidente y Bogotá D.C). Las conexiones representan el envío de carga transportada por departamento y la flecha indica la dirección, el grosor de cada línea denota un mayor volumen, al igual que la intensidad del color (guiados por la barra lateral). Esta Red denota las únicamente el envío y recepción de carga donde Buenaventura es partícipe.

línea denota un mayor volumen, al igual que la intensidad del color (guiados por la barra lateral). Se puede apreciar de manera puntual la dinámica de la balanza deficitaria en cantidades que presenta Buenaventura, la carga que es importada y tiene como destino los departamentos de Valle del Cauca (s.B), Bogotá, Cundinamarca y Antioquia, tiene un grado de intensidad alto (conexiones gruesas). En contraste, la intensidad de la carga que es enviada hacia Buenaventura es bajo, denotando una canasta exportadora escasa en todos los departamentos.

En cuanto a la estructura jerárquica de la Red de Comercio Departamental, se construyó el árbol de cobertura mínima (ACM), con el objetivo de filtrar las características más sobresalientes del sistema y reducir la dimensionalidad de la red, sintetizando los



Árbol de Cobertura Mínima (ACM) 2015

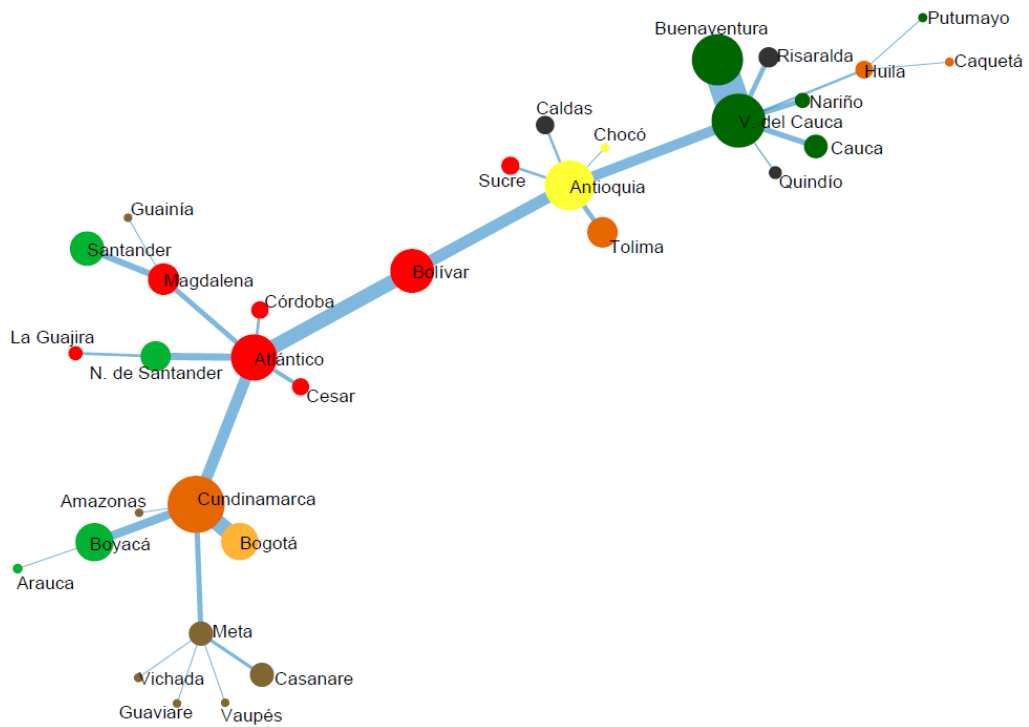


Figura 6: Árbol de Cobertura Mínima (ACM) 2018. Fuente: Cálculo de los autores.

elementos de conectividad e interacción analizados anteriormente. El ACM se presenta en la Figura 6, cuyos nodos corresponden a los departamentos, su diámetro a la contribución en el envío total de carga transportada y su color está determinado por la región a la cual

pertenecen. Las conexiones corresponden a la relación comercial más importante para cada departamento dentro de la RCD (ponderadas por su tamaño - grosor de la conexión), y la posición de los nodos refiere la fuerza gravitacional del nodo central al que están sujetos; por tanto, los nodos cercanos son los de mayor atracción y los apartados no están sujetos a ningún campo de gravedad de manera relevante, lo que los deja en la periferia.

El resultado más notorio es que la RCD muestra una estructura jerárquica en cabeza de tres departamentos que son Valle del Cauca (s.B), Cundinamarca y Atlántico como los líderes de la jerarquía, generando una fuerza gravitacional sobre un mayor número de nodos; mientras Bolívar, Antioquia, Bogotá y Buenaventura, distribuyen su eje gravitacional entre los nodos que atraen más departamentos. El ACM evidencia una correspondencia entre la estructura jerárquica y la posición geográfica de los departamentos; resultados consistentes con los modelos de gravedad que predicen flujos comerciales proporcionales a la masa económica e inversamente proporcionales a la distancia. En este sentido, se observa cómo tres de las economías más grandes del país conducen a un sub-grupo de departamentos próximos según su distancia, posición de adyacencia y peso dentro de la RCD. Es de mencionar que Meta aparece como un eje que se asocia directamente con el grupo de Cundinamarca, pero a su vez ejerce una fuerza gravitacional sobre Casanare, Guaviare y Vichada, como sus socios más estables.

En particular, Atlántico mantiene una posición dominante en la zona costera y nororiental del país, a excepción de Boyacá y Arauca que se asocian en mayor medida con Cundinamarca; mientras Valle del Cauca (s.B) presenta una fuerte atracción con los departamentos del Suroccidente, Centro y Eje Cafetero. Estas características de la estructura jerárquica reflejan el posicionamiento comercial de unos pocos departamentos del país, acorde con su tamaño económico, margen extensivo e intensivo del comercio, al tiempo que la distancia asociada a los costos de transporte, puede estar influyendo en la agrupación jerárquica de la red (aspecto que se contrasta en el modelo gravitacional).

Es de resaltar que el ACM para los años 2015 y 2018 no presenta cambios relevantes en su estructura más allá de la distribución de las fuerza gravitacionales de los nodos de Bogotá y Buenaventura, que no tienen un centro de gravedad definido y se distribuyen

como nodos independientes, o nodos asociados a Cundinamarca y Valle del Cauca (s.B), respectivamente.

En resumen, la Red de Comercio Departamental para los años 2015-2018 se caracteriza por ser una red con una densidad alta y por tanto, bien conectada en promedio. Sus nodos están bien integrados en el margen extensivo de comercio, en contraste con el grado de integración en el margen intensivo que es bajo y refleja un diferencial en el volumen de carga transportada. Asimismo, las conexiones auto-dirigidas juegan un papel importante en la determinación de estas estadísticas.

A continuación, se realiza una comparación del sistema descrito anteriormente con la hipótesis del modelo gravitacional, para estudiar los determinantes de la estructura que presenta la Red de Comercio departamental y sus componentes jerárquicos.

5 Modelo gravitacional

La hipótesis del modelo gravitacional de comercio fue expuesta en un primer escenario por Jan Tinbergen en 1962. En este contexto, el modelo refiere que el flujo de comercio entre dos departamentos es proporcional a la multiplicación de sus tamaños, medido en términos del PIB, e inversamente proporcional a la distancia entre ellos. La inclusión de estas variables se basa en la representación de la fuerza de atracción, generación y repulsión de los flujos de comercio; es decir, el PIB es proxy de la fuerza de atracción y generación, mientras que los costos de transporte bilateral están asociados a la distancia (repulsión).

La ecuación gravitacional que simboliza el modelo toma forma multiplicativa como lo muestra la ecuación (1). Adicionalmente, se incluye un conjunto de términos que impactan el flujo de comercio entre una pareja de departamentos, lo que permite hacer un análisis más exhaustivo de los determinantes de los flujos de comercio y por tanto de la estructura de la RCD.

$$X_{ij,t} = \beta_0 PIB_{i,t}^{\beta_1} PIB_{j,t}^{\beta_2} D_{ij}^{-\beta_3} \left(\prod_{k=1}^K RM_{h,t}^{\alpha_k} \right) \left(\prod_{w=1}^W Y_{h,t}^{\phi_w} \right) \times \exp \left(\sum_{a=1}^A \theta_a B_h \right) \epsilon_{ij,t} \quad (1)$$

La variable dependiente $X_{ij,t}$, denota el envío de carga transportada del departamento i hacia el departamento j en el periodo t , medido en toneladas; donde $(i=j)$ refleja el comercio intra-departamental. $PIB_{i,t}$, $PIB_{j,t}$ representan el PIB del departamento i y el departamento j respectivamente, en el periodo t , medido en miles de millones de pesos. D_{ij} es la distancia geodésica entre los departamentos i y j , medida en kilómetros. $RM_{h,t}$, $h = i, j$ representan los términos de resistencia multilateral, su inclusión en el modelo gravitacional se sustenta en que el comercio entre i y j no está determinado únicamente por las variables que relacionan estos departamentos directamente, sino también por la relación que tenga i ó j con todos los demás departamentos (i, j) que hacen parte del sistema o RCD. Estos términos¹⁴ son clasificados en la literatura como no observables, se proponen variables proxy que sirven como alternativa de los términos de resistencia multilateral en el modelo gravitacional, estas son: $DR_{i,t}$, $DR_{j,t}$ que indican la distancia relativa de los departamentos i y j respectivamente, en el periodo t , elaboradas como función del PIB departamental y la distancia geodésica (Wei, 1996). Asimismo, De Benedictis y Tajoli (2011) proponen el uso de las estadísticas descriptivas de la red de comercio como proxy de los términos de resistencia multilateral, debido a que muestran la posición e importancia relativa de los nodos dentro del sistema, además de ser variables que fluctúan en el tiempo, tal y como lo hacen los terminos de resistencia. Los grados de entrada y de salida $(\varphi_{in}, \varphi_{out})$ son las principales estadísticas de topología de redes utilizadas dentro del análisis gravitacional.

Por otro lado, se incluye la variable $Y_{h,t}$ ¹⁵ con $h = i, j$, que representa un conjunto de variables que controlan el tamaño de los departamentos como fuerza de atracción y generación de comercio. También se incluyen $Z_{i,t}$, $Z_{j,t}$ que representan el número de zonas francas permanentes y especiales ubicadas en el departamento i y j respectivamente,

¹⁴Para más detalle sobre los términos de resistencia multilateral ver Anderson, J., y E. van Wincoop (2003)

¹⁵Esta variable incluye el PIB por origen y destino de cada departamento. La literatura refiere variables adicionales como el PIB por habitante o la población de origen y destino, pero no son incluidas en el análisis debido a la alta correlación que presentan con el PIB.

en el periodo t . Por su parte, $B_h, h = i, j$, con $i = j$, representan un conjunto de variables dicótomas, incluidas con el propósito de controlar por efectos de pares de departamentos, la naturaleza de procedencia de la carga transportada y efectos individuales de cada departamento. En línea con lo anterior, se incorpora la variable COL_{ij} , que toma valor de uno si los departamentos i y j son colindantes entre sí (al igual que la distancia geodésica sirve como proxy del costo de transporte bilateral). Del mismo modo, $INTRA_{i=j}$ toma valor de uno para el transporte de carga intra-departamental y cero para el transporte de carga inter-departamental, evidenciando las preferencias de los consumidores de cada departamento por bienes locales o externos a su departamento. PM_i, PM_j toman el valor de uno si los departamentos de referencia (i, j) tienen puerto marítimo. Finalmente, $\epsilon_{ij,t}$ denota el término de perturbación estocástico y se asume que es estadísticamente independiente de los regresores $E(\epsilon_{ij,t} | \cdot) = 1$.

La ecuación gravitacional en su forma multiplicativa (1) puede ser estimada (sin necesidad de un proceso de loglinealización y evitando caer en las problemáticas que esta transformación trae) por medio de métodos no lineales, en particular, *Poisson Pseudo Maximum Likelihood (PPML)*, propuesto por Santos Silva y Tenreyro (2006) y recomendado por la Organización Mundial del Comercio (2013). Este método asume que la varianza condicional es proporcional (no igual) a la media condicional, $V(X_{ij,t}|x) \propto E(X_{ij,t}|x)$, lo cual le permite controlar la heterocedasticidad que es usual encontrar en los datos de comercio bilateral. En relación a lo anterior, es habitual observar que la varianza condicional es superior a la esperanza condicional, Santos Silva y Tenreyro (2011) sostienen que incluso cuando el supuesto $V(X_{ij,t}|x) \propto E(X_{ij,t}|x)$ no se cumple, el estimador de *PPML* se comporta de manera correcta (propiedades de muestra no finita) en comparación con otros estimadores y en lo relativo a las propiedades de muestra finita, la consistencia de los parámetros estimados por *PPML* es basada en la correcta especificación de la esperanza condicional $E(X_{ij,t}|x) = \exp(x\beta)$.

Otra de las ventajas del estimador es que aún cuando existe una proporción grande de ceros dentro de los datos, el estimador *PPML* no se ve afectado en su desempeño¹⁶). La aplicación del *PPML* se puede llevar a cabo sobre la ecuación (2), la cual es una

¹⁶Ver Santos Silva y Tenreyro (2011)

transformación monótona de (1).

$$X_{ij,t} = \exp \left[\alpha_0 + \beta_1 \ln PIB_{i,t} + \beta_2 \ln PIB_{j,t} - \beta_3 \ln D_{ij} + \left(\sum_{k=1}^K \alpha_k \ln RM_{h,t} \right) + \left(\sum_{w=1}^W \phi_w \ln Y_{h,t} \right) \right] \times \exp \left(\sum_{a=1}^A \theta_a B_h \right) \epsilon_{ij,t} \quad (2)$$

De acuerdo a la literatura, la especificación Log-Log (ecuación (1) loglinearizada), es la ecuación gravitacional más empleada para analizar los determinantes del flujo de comercio entre dos agentes (países, regiones, departamentos). Según lo expuesto por Santos Silva y Tenreyro (2006), la especificación Log-Log es comunmente estimada por medio de Mínimos Cuadrados Ordinarios, generando una serie de problemas en los resultados obtenidos. Primero, se generan los valores ajustados de $\ln X_{ij,t}$ y no de $X_{ij,t}$, (desigualdad de Jensen $E(\ln X_{ij,t}) \neq \ln E(X_{ij,t})$); segundo, se viola el supuesto de homocedasticidad debido a la particularidad existente en los datos de comercio donde la varianza de los errores no es constante. Como consecuencia de estos dos problemas, la interpretación de las elasticidades no es la adecuada. Tercero, la información contenida en los flujos de comercio igual a cero no se puede tener en cuenta dentro del análisis debido a que son descartados con la transformación Log-Log. Todo lo anterior provoca una inconsistencia de los estimadores que se deriven de una transformación lineal de la ecuación gravitacional. En consecuencia de lo anterior, el presente estudio enfoca sus conclusiones en los resultados obtenidos por el método de estimación PPML.

5.1 Resultados de Estimación

La Tabla 2 muestra los resultados de estimación de la ecuación gravitacional (2) por medio del estimador *PPML*¹⁷. Como es sugerido por la OMC (2013), la variable dependiente está en niveles con el objetivo de incluir de manera adecuada la información que

¹⁷También se utilizó un *Zero-Inflated Poisson Pseudo Maximum Likelihood (ZIPML)* sobre la ecuación (2), puesto que hay autores que sostienen que una proporción grande de ceros en la variable dependiente puede afectar el desempeño del estimador *PPML*. Para más detalles sobre esta crítica se puede ver Burger et al. (2009), más sin embargo cabe resaltar que Santos Silva y Tenreyro (2011) realizan simulaciones de Monte Carlo para probar la efectividad del modelo cuando la proporción de los ceros es grande y confirman que el rendimiento del estimador no se ve afectado por este hecho. Los resultados son reportados en el Apéndice y las elasticidades estimadas por *ZIPML* son muy similares a las resultantes del *PPML* e idénticas a estimar *PPML* con $X_{ij,t} > 0$.

los flujos de comercio cero aportan al modelo.¹⁸ Igualmente se realiza la estimación de la transformación logarítmica de la ecuación (2), para contrastar las estimaciones del *PPML* con las técnicas tradicionales de regresión lineal, usando como variable dependiente $\text{Log}(X_{ij,t})$ como forma de lidiar con los ceros, dejando por fuera el 24% de las observaciones. En cuanto a esto, el 20% es provocado por los flujos de carga transportada que son iguales a cero, y el 4 % restante es explicado por las observaciones que si bien son diferentes de cero, debían ser eliminadas para balancear el panel.

Los coeficientes estimados del Log PIB son estadísticamente significativos y positivos para cada uno de los métodos, reflejando la importancia del Producto Interno Bruto i como fuerza de generación de comercio (oferta) y del Producto Interno Bruto j como fuerza de atracción (demanda). No obstante, las elasticidades del *MCO* son más grandes que las producidas por el *PPML*, especialmente en el Log PIB origen. Al observar el impacto que tienen las zonas francas por origen y destino en el volumen de comercio, se concluye que ambas variables tienen efecto positivo y significativo sobre la variable dependiente en todos los modelos, y que las zonas francas origen tienen una elasticidad más elevada en el *MCO*. Analizando las proxy de los costos de transporte bilateral, Log distancia geodésica y Colindantes, se puede observar que para la distancia el signo es el esperado de acuerdo a la literatura para todos los estimadores, lo cual indica que un aumento en la distancia entre los dos departamentos dificulta los flujos de carga transportada. Igualmente, el coeficiente de *PPML* es menor que en el estimador lineal, siendo la variable estadísticamente significativa en los dos. En lo referente a la dummy colindantes, su signo señala que manteniendo todo lo demás constante, dos departamentos i y j que comparten frontera tienden a presentar un mayor flujo de carga transportada proveniente de i a j , comparados con dos departamentos que no son colindantes entre sí. En los dos estimadores el coeficiente es significativo y los parámetros estimados por *MCO* son notablemente mayores.

El desarrollo del modelo gravitacional debe incluir datos de comercio intradepartamental

¹⁸Es frecuente en la literatura encontrar métodos en los que es utilizada como variable dependiente $\text{Log}(X_{ij,t} + 1)$ procurando incluir la información contenida en estos flujos, pero como menciona la Organización Mundial del Comercio (2013), esta práctica debe ser evitada ya que es teóricamente inconsistente.

Tabla 2: Ecuación Gravitacional

Estimador	(1) <i>PPML</i>	(2) <i>PPML</i>	(3) <i>PPML</i> Efectos fijos	(4) <i>MCO</i> <i>Robusto</i>
Variables	$X_{ij,t}$	$X_{ij,t}$	$X_{ij,t}$	$\text{Ln}X_{ij,t} > 0$
Log PIB origen	0.558*** (0.0703)	0.680*** (0.0644)		1.193*** (0.0753)
Log PIB destino	0.694*** (0.0854)	0.684*** (0.0871)		1.054*** (0.0722)
Log distancia geodésica	-0.411*** (0.0654)	-0.444*** (0.0631)	-0.392*** (0.0678)	-0.806*** (0.118)
Colindantes	0.499*** (0.133)	0.468*** (0.133)	0.543*** (0.126)	1.015*** (0.194)
Intra-departamental	-0.985** (0.469)	-1.173** (0.465)		-2.195** (0.880)
Puerto marítimo origen	1.160*** (0.177)	0.781*** (0.129)		0.723*** (0.167)
Puerto marítimo destino	0.235 (0.201)	0.294** (0.132)		0.332* (0.186)
Zonas francas origen	0.0564*** (0.0112)	0.0597*** (0.0118)		0.104*** (0.0109)
Zonas francas destino	0.0336*** (0.0117)	0.0330*** (0.0120)		0.0283* (0.0161)
Log Grado salida j destino	0.879 (0.605)	0.853 (0.600)		0.335 (0.235)
Log Grado entrada j destino	1.733 (1.281)	1.514 (1.207)		0.772 (0.531)
Log distancia relativa origen	-0.811*** (0.282)			-0.167 (0.257)
Log distancia relativa destino	0.155 (0.296)			0.648** (0.271)
Constante	2.807 (5.120)	-1.080 (3.503)	20.34*** (0.440)	-7.412** (3.006)
Observaciones	2,048	2,048	2,048	1,558
Parejas de departamentos	1024	1024	1024	779
Origen efectos fijos-tiempo	No	No	Si	No
Destino efectos fijos-tiempo	No	No	Si	No
RESET Test p-valor	0.072	0.143	0.006	0.474

Todos los métodos de estimación tienen cluster por pareja de departamentos.

Errores estándar en paréntesis.

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

para mostrar las preferencias que tienen los consumidores de elegir entre bienes locales o foráneos (Organización Mundial del Comercio, 2013). La forma en la que los flujos de comercio son presentados en la base de datos permite construir el flujo de carga transportada intra-departamental en el periodo t para cada departamento ($X_{i=j,t}$), por esta razón fue incluida dentro de la regresión la variable Intra-departamental, la cual es significativa para los tres estimadores y su signo negativo refleja las preferencias del comercio inter-departamental sobre el intra-departamental.

Del mismo modo, se analiza el efecto que puede tener la existencia de un puerto marítimo dentro de los departamentos. El coeficiente de la variable Puerto marítimo en origen es estadísticamente significativo y refleja que un departamento i que tiene puertos marítimos dentro de su territorio, presenta en promedio, un mayor volumen de carga transportada hacia otros departamentos, lo que se traduce como un impacto positivo sobre los flujos de comercio y una mayor probabilidad de consumo de bienes importados. Continuando con la variable puerto marítimo destino, tiene un impacto positivo pero no significativo sobre los flujos de comercio, mientras que en el modelo (2), la significancia se ubica en un nivel menor al 5%. Sin embargo, se puede concluir que un nodo con puerto marítimo, no recibe en promedio más volumen de carga transportada, denotando un sistema exportador poco fortalecido en cantidades.

La distancia relativa es proxy de los términos de resistencia multilateral. Dicha variable busca controlar el hecho de que largas distancias (ponderadas por el PIB) de un departamento con respecto a todos los demás, tienden a incrementar el flujo de carga transportada bilateralmente con los departamentos más cercanos. La variable Log distancia relativa origen, parece no ajustarse a los datos debido a que no presenta el signo esperado según la literatura, por lo que se estimó la ecuación gravitacional sin las variables de distancia relativa y controlando únicamente por el logaritmo del grado de entrada y salida como proxy de los términos de resistencia multilateral.

En lo que respecta al *PPML* y *MCO*, las estadísticas descriptivas de la Red de Comercio Departamental sirven como proxy de los términos de resistencia multilateral, pues parecen tener influencia sobre los flujos de carga transportada bilateralmente. Los grados de

entrada y salida tienen un signo positivo, indicando que un aumento en el número de conexiones de un departamento de destino (j), tiende a incrementar el flujo de comercio en el que este actúe como receptor de carga transportada.

Adicionalmente, se estimó el modelo con la especificación propuesta por Anderson y Van Wincoop(2003), la cual consiste en un estimador de efectos fijos de tiempo por departamento de origen y destino, de tal manera que se controle por todo lo observable y no observable de cada departamento que este afectando al flujo de comercio entre i y j . Lo anterior incluye un control adecuado sobre los términos de resistencia multilateral. Los parámetros estimados de esta especificación con el *PPML* son reportados en el modelo (3) de la Tabla 2. Es de resaltar que deben ser removidos del análisis las variables que caracterizan cada departamento, dejando únicamente aquellas que reflejan la relación directa entre i y j . Las elasticidades del modelo de *PPML* con efectos fijos son muy cercanas al modelo (1) y (2), y no es de extrañarse que los coeficientes estimados varíen un poco debido a que se está controlando por muchas más variables (observables y no observables). Un defecto que tiene esta última regresión es que es poco intuitiva y no permite ver el efecto de algunas variables de interés sobre los flujos de comercio, sin embargo, tiene gran relevancia en el sentido que permite realizar una comparación entre las elasticidades estimadas resultantes de Log distancia relativa y colindantes con las resultantes de la especificación (1) y (2), como se mencionó anteriormente.

De acuerdo con los resultados, los métodos de estimación lineales y no lineales arrojan diferencias importantes en los valores estimados de los coeficientes, esto puede deberse a la heterocedasticidad que presentan los datos de comercio y los efectos que tiene la desigualdad de Jensen sobre las elasticidades, problemas que no son corregidos de manera óptima en los modelos lineales. Al estimar el *PPML* con $X_{ij,t} > 0$ (equivalente al *Zero Inflated Poisson (ZIP)*, segunda etapa), los resultados en cuanto a la magnitud de las elasticidades estimadas por *ZIP* y *PPML* son muy cercanas. Si bien los estimadores buscan controlar los problemas mencionados, el *PPML* es ampliamente aceptado dentro de la literatura al generar estimadores consistentes en presencia de heterocedasticidad y de la desigualdad de Jensen, además de incluir la información contenida en los flujos de comercio igual a cero y estimar la ecuación gravitacional en su forma multiplicativa.

Santos Silva y Tenreyro (2006) destacan la importancia de la especificación adecuada de la ecuación gravitacional para poder aplicar este método de forma consistente. Para evaluar la forma funcional de la esperanza condicional, $E(X_{ij,t}|x) = \exp(x\beta)$, los autores proponen el Ramsey RESET test, el cual consiste en estimar una regresión auxiliar en la que se incluyen los valores ajustados al cuadrado de la regresión original $(x'b)^2$ y los regresores originales, para luego realizar un test de significancia de esta nueva variable. Los resultados de estimación y el p-valor del test para cada regresión es reportado en la Tabla 2. Para las estimaciones por *PPML* (1) y (2), la hipótesis nula de forma funcional correcta no es rechazada, esto asegura que los estimadores son consistentes y en línea con el supuesto de $V(X_{ij,t}|x) \propto E(X_{ij,t}|x)$, al estar la esperanza condicional bien especificada. Cabe resaltar que el estimador *MCO* pasa el test con la especificación Log-Log, sin embargo, a diferencia del *PPML* esto no garantiza la consistencia del estimador.

En definitiva, las variables utilizadas en la ecuación gravitacional pueden explicar los flujos de carga transportada bilateralmente en términos departamentales, se garantiza la consistencia del estimador utilizado (*PPML*) a raíz de los resultados obtenidos con el Ramsey RESET test y, por tanto, el cumplimiento de la hipótesis del modelo gravitacional sobre sistema de transporte de carga departamental en Colombia.

6 Conclusiones

Haciendo uso de las herramientas del análisis topológico de redes sobre los datos de carga transportada en los años 2015 a 2018, se visualiza y estudia la red de comercio intranacional y la importancia que tiene cada departamento en dicha red. Se encuentra que la RCD presenta grados de conectividad altos en promedio con una red densa y recíproca, pero al observar la centralidad de cada nodo se concluye que existen grandes diferenciales en los grados de integración en el margen intensivo, generando así una estructura de centro-periferia dentro de la red en donde los nodos de mayor jerarquía se ubican en el centro del país, mientras en las periferias conformadas por las zonas del Caribe, Nororiente, Suroriente y parte del Suroccidente, los márgenes extensivos e intensivos de comercio son más bajos.

De otro lado, la estructura jerárquica de la RCD muestra tres grupos con tres departamentos a la cabeza (Cundinamarca, Valle del Cauca (s.B) y Atlántico), además de otros nodos centrales que se adhieren al grupo de departamentos con la mayor fuerza de atracción comercial del país (Antioquia, Bogotá, Buenaventura y Bolívar), los cuales atraen nodos más pequeños y próximos según su distancia, adyacencia y peso dentro de la red. Se destacan los Bogotá y Buenaventura al no tener un centro de gravedad definido en el periodo de estudio, clasificándose como nodos adheridos a otros, aunque sin afectar su jerarquía en la RCD.

En lo que respecta al envío de carga transportada inter e intradepartamentalmente, los nodos de Cundinamarca, Valle del Cauca (s.B), Buenaventura y Antioquia lideran la estadística en ese orden. Asimismo, los principales nodos receptores inter e intradepartamental son, en el siguiente orden, Antioquia, Valle del Cauca (s.B), Bogotá y Cundinamarca. En cuanto a la recepción de carga exclusivamente interdepartamental, Bogotá es el nodo más importante en la RCD, siendo el principal destino de carga transportada y generando una contribución importante en el consumo nacional de bienes. Cundinamarca es el departamento que más envía carga transportada con destino a otros nodos (exclusivamente interdepartamental).

También se encuentra que existen diferenciales importantes en la selección de socios comerciales y las conexiones autodirigidas tienen un peso importante en la red. Si bien Valle del Cauca(s.B) se destaca como receptor de carga transportada dentro de RCD, esa jerarquía está impulsada principalmente por las conexiones autodirigidas que tiene, a diferencia de nodos como Bogotá y Antioquia que tienen una marcada variedad de departamentos que les envían mercancía.

Resalta Buenaventura como un nodo predominantemente remitente de carga transportada y con una baja cantidad de carga recibida por vía terrestre (toneladas), denotando una balanza comercial deficitaria en cantidades, con importaciones dirigidas principalmente al Valle del Cauca (s.B) y Bogotá, y en menor medida a Cundinamarca y Antioquia. Asimismo, la cantidad de nodos que envían carga de manera intensiva a Buenaventura (carga con mayor probabilidad de tipo exportación) es muy baja (Valle del Cauca (s.B)

y Cundinamarca). Bogotá resalta como un nodo predominantemente receptor, con muy pocas conexiones intensas de salida de carga transportada.

Adicionalmente, se analiza la estructura de la red por medio del modelo gravitacional de comercio donde el PIB, los puertos marítimos y el número de zonas francas juegan un papel importante como fuerza de generación y atracción de comercio, mientras que los costos de transporte bilateral, expuestos por medio de variables proxy como la distancia y la colindancia de los departamentos, indican que un aumento en la distancia entre dos departamentos reduce el flujo de comercio entre ellos. Por otro lado, se revelan las preferencias de los consumidores de cada departamento por los bienes de otros departamentos, lo anterior apoyado por las conexiones auto-dirigidas de los nodos en el análisis de redes, que si bien tienen un papel importante dentro del flujo de comercio, en promedio no supera las conexiones provenientes de otros departamentos.

Referencias

Almanza, A. S. (2016). Sistema de ciudades y redes urbanas en los modelos económicos de México. *Problemas del desarrollo*, Vol. 47, No. 184, págs. 7-34.

Anderson, J., y E. van Wincoop (2003). Gravity with Gravitas: A Solution to the Border Puzzle, *American Economic Review*, Vol. 93, No. 1, págs. 170-192.

Ávila Aguirre, H. (2017). El modelo de gravedad y los determinantes del comercio entre Colombia y sus principales socios económicos. *Revista Civilizar De Empresa Y Economía*, Vol. 7, No. 12, págs. 89-121.

Buongiorno, J. (2016). Gravity models of forest products trade: applications to forecasting and policy analysis. *Forestry*, Vol. 89, No. 2, págs. 117-126.

Burger M, Oort Fv, Linders G (2009). On the specification of the gravity model of trade: Zeros, excess zeros and zero-inflated estimation. *Spatial Economic Analysis*, Vol. 4, No. 2, págs. 167-190.

Cafiero, J. A. (2005). Modelos gravitacionales para el análisis del comercio exterior. *Revista del CEI Comercio Exterior e Integración*, Vol. 4, págs. 77-89.

Castro, E. (2014). Relaciones comerciales de la producción industrial en el mercado interno colombiano. *Ecos de Economía: A Latin American Journal of Applied Economics*, Vol. 18, No. 39, págs. 73-95.

Castro, E. (2016). Especialización regional de la producción y el comercio industrial en Colombia. *Semestre Económico*, Vol. 19, No. 41, págs. 87-116.

Cepeda F, Gamboa F, León C, Rincón H (2019). The evolution of world trade from 1995 to 2014: A network approach. *The Journal of International Trade Economic Development, Taylor Francis Journals*, Vol. 28, No. 4, págs. 452-485.

De Benedictis L, Tajoli L (2011) The world trade network. *The World Economy*, 2011, Vol. 34, No. 8, págs. 1417-1454.

Dueñas M, Fagiolo G (2013), Modeling the International-Trade Network: a gravity approach. *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 2013, Vol. 8, No. 1, págs. 155-178.

Kabir, M., Salim, R., Al-Mawali, N. (2017). The gravity model and trade flows: Recent developments in econometric modeling and empirical evidence. *Economic analysis and policy*, Vol. 56, págs. 60-71.

Lundmark, R. (2018). Analysis and projection of global iron ore trade: a panel data gravity model approach. *Mineral Economics*, Vol. 31, No. 1-2, págs. 191-202.

Narayan, S., Nguyen, T. T. (2016). Does the trade gravity model depend on trading partners? Some evidence from Vietnam and her 54 trading partners. *International Review*

of *Economics Finance*, Vol. 41, págs. 220-237.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2012). Preserving and Protecting Freight Infrastructure and Routes. *The National Academies Press*.

Martinez-Zarzoso, I. (2013) The log of gravity revisited. *Applied Economics*

Martínez, D. R. A., Díaz, C. E. G. (2014). Evolución de la red de comercio internacional: una aproximación a través de la Teoría de Redes Sociales (1970-2011) (No. 013131). *Universidad Nacional de Colombia-FCE-CID*.

Minford, P., Xu, Y. (2017). Classical or Gravity? Which trade model best matches the UK facts?. *Open Economies Review*, Vol. 29, No. 3, págs. 579-611.

Montenegro, C. E., Pereira, M., Soloaga, I. (2011). El efecto de China en el comercio internacional de América Latina. *Estudios de economía*, Vol. 38, No. 2, págs. 341-368.

Newman, M.E.J (2010) Networks: An Introduction. *Oxford University Press*, New York.

Ortiz, D. y Villarreal, S. (2016). Transporte y mercado interno en Colombia: una contribución a un debate hasta ahora desconocido, 1928-1950. *Tiempo & economía*, Vol. 3, No. 1, págs. 83-107.

Pérez-Valbuena, G. J. (2005). La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana*; No. 64.

Ranilović, N. (2017). The effects of economic integration on Croatian merchandise trade: a gravity model study. *Comparative Economic Studies*, Vol. 59, No 3, págs. 382-404.

Santos Silva, J.M.C. y Tenreyro, S. (2011), Further simulation evidence on the performance of the Poisson pseudo-maximum likelihood estimator. *Economic letters*,

Vol. 112, No. 2, págs. 220-222.

Santos Silva, J.M.C. y Tenreyro, S. (2006), The Log of Gravity. *Review of Economics and Statistics*, Vol. 88, No. 4, págs. 641-658.

Tinbergen, Jan. (1962). An Analysis of World Trade Flows. *Shaping the World Economy*, Vol. 3, págs. 1-117.

Wang, H. G., Baird-Zars, B. (2012). Competitiveness and Connectivity across the Colombian Urban System. *Colombia Urbanization Review*, No. 59.

Wei, S.(1996), Intra-national versus International Trade: How Stubborn Are Nation States in Globalization?. *National Bureau of Economic Research*, working paper No. 5331.

Yotov, Y. V., Piermartini, R., Monteiro, J. A., Larch, M. (2016). An advanced guide to trade policy analysis: The structural gravity model. World Trade Organization.

Apéndice

Tabla 1. Regiones y Departamentos

Región	Departamento
Bogotá	Bogotá
Costa Caribe	Bolívar
	Atlántico
	Magdalena
	La Guajira
	Cesar
	Sucre
Centro	Córdoba
	Cundinamarca
	Tolima
	Huila
Eje Cafetero	Caquetá
	Caldas
	Risaralda
Noroccidente	Quindío
	Antioquia
Nororient	Chocó
	Norte de Santander
	Santander
	Boyacá
Suroccidente	Arauca
	Valle del Cauca (s.B)
	Buenaventura
	Cauca
	Nariño
Surorient	Putumayo
	Meta
	Casanare
	Guaviare
	Vichada
	Guainía
	Vaupés
	Amazonas

$$Distancia Relativa_i = \sum_{j=1}^n \frac{PIB_j}{PIB_{Total}} DISTANCIA_{ij} \quad (1)$$

Tabla 2. Departamentos

Departamentos	Municipio/Capital ^{b/}
Amazonas	Leticia
Antioquia	Medellín
Arauca	Arauca
Atlántico ^{a/}	Barranquilla
Bogotá D.C	Bogotá D.C
Bolívar ^{a/}	Cartagena
Boyacá	Tunja
Caldas	Manizales
Caquetá	Florencia
Casanare	Yopal
Cauca	Popayán
Cesar	Valledupar
Chocó	Quibdó
Córdoba	Montería
Cundinamarca	Soacha
Guainía	Puerto Inírida
Guaviare	San José del Guaviare
Huila	Neiva
La Guajira ^{a/}	Riohacha
Magdalena ^{a/}	Santa Marta
Meta	Villavicencio
Nariño	Pasto
Norte de Santander	Cúcuta
Putumayo	Mocoa
Quindio	Armenia
Risaralda	Pereira
Santander	Bucaramanga
Sucre ^{a/}	Sincelejo
Tolima	Ibagué
Valle del Cauca ^{a/}	Cali
Vaupés	Mitú
Vichada	Puerto Carreño

a/Departamentos con puerto marítimo

b/Punto de referencia para medir la distancia geodésica

Tabla 2a. Estadísticas Descriptivas

Variable	Promedio	Desviación Estandar	Mínimo	Máximo
Envío de carga transportada ^{a/}	93.510.000	388.600.000	0	9.735.000.000
Log Envío de carga transportada	15,5600	3,2350	5,2980	23,0000
Log PIB origen	8,6860	1,6720	5,0040	11,8800
Log PIB destino	8,6860	1,6720	5,0040	11,8800
Log distancia geodésica	5,9920	1,2730	0	7,4670
Colindantes dummy	0,1400	0,3470	0	1
Log distancia relativa origen	6,0880	0,4010	5,4680	7,1160
Log distancia relativa destino	6,0880	0,4010	5,4680	7,1160
Intra-departamental dummy	0,0313	0,1740	0	1
Comercio Intra-departamental	0,0657	0,0812	0,0000	0,3260

a/Medida en toneladas

Tabla 3: Ecuación Gravitacional

Estimador	(1) <i>PPML</i>	(2) <i>PPML</i>
VARIABLES	$X_{ij,t} > 0$	$X_{ij,t} > 0$
Log PIB origen	0.550*** (0.0711)	0.670*** (0.0662)
Log PIB destino	0.696*** (0.0856)	0.686*** (0.0876)
Log distancia geodésica	-0.410*** (0.0652)	-0.443*** (0.0627)
Colindantes	0.494*** (0.133)	0.463*** (0.133)
Intra-departamental	-0.976** (0.467)	-1.162** (0.462)
Puerto marítimo origen	1.151*** (0.179)	0.775*** (0.130)
Puerto marítimo destino	0.236 (0.202)	0.292** (0.132)
Zonas francas origen	0.0563*** (0.0112)	0.0595*** (0.0117)
Zonas francas destino	0.0337*** (0.0117)	0.0331*** (0.0120)
Log Grado salida j destino	0.846 (0.616)	0.818 (0.614)
Log Grado entrada j destino	1.647 (1.290)	1.435 (1.217)
Log distancia relativa origen	-0.803*** (0.283)	
Log distancia relativa destino	0.149 (0.296)	
Constante	3.248 (5.191)	-0.628 (3.610)
Observaciones	1619	1619
Parejas de departamentos	840	840
RESET Test p-valor	0.1	0.16

Todos los métodos de estimación tienen cluster por pareja de departamentos.

Errores estándar en paréntesis.

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Tabla 4: Estadísticas descriptivas de la Red de Comercio Departamental.

Departamento	2015							2018						
	φ_{in}	φ_{out}	ρ_{in}	ρ_{out}	ι	γ_{out}^a	γ_{in}^a	φ_{in}	φ_{out}	ρ_{in}	ρ_{out}	ι	γ_{out}^a	γ_{in}^a
Cundinamarca	33	31	0,02	0,019	27,78	10.899.841	9.462.071	33	31	0,02	0,019	21,43	14.671.270	11.345.590
Buenaventura	30	28	0,018	0,017	2,15	10.395.992	3.401.486	30	28	0,018	0,017	1,43	11.703.948	4.273.909
Antioquia	32	31	0,019	0,019	12,28	9.904.226	13.083.098	32	31	0,019	0,019	11,76	11.061.800	15.127.681
Valle del Cauca (s.B)	30	30	0,018	0,018	5,37	9.838.928	11.984.528	31	31	0,019	0,019	12,33	13.053.783	14.789.691
Atlántico	32	30	0,019	0,018	10,3	7.708.968	6.777.551	32	30	0,019	0,018	17,53	9.424.266	9.487.187
Bolívar	31	30	0,019	0,018	8,15	7.215.516	4.362.024	31	29	0,019	0,018	5,23	8.447.310	5.466.811
Bogotá	32	32	0,019	0,019	27,78	6.000.007	11.817.927	33	31	0,02	0,019	21,43	5.902.094	11.517.516
Boyacá	30	31	0,018	0,019	18,59	5.451.553	3.570.943	30	30	0,018	0,018	3,21	6.276.298	4.107.393
Santander	30	30	0,018	0,018	6,52	4.050.334	5.539.058	30	30	0,018	0,018	3,21	5.000.415	6.183.907
Tolima	30	30	0,018	0,018	4,09	3.863.137	1.928.375	30	30	0,018	0,018	3,21	3.800.414	2.020.174
Magdalena	28	29	0,017	0,018	3,54	2.911.948	2.004.555	29	30	0,018	0,018	4,63	4.125.561	3.081.898
Meta	32	30	0,019	0,018	20,73	2.419.873	2.386.566	32	31	0,019	0,019	19,06	2.252.212	2.606.800
Casanare	30	29	0,018	0,018	6,2	2.116.507	2.029.391	31	29	0,019	0,018	5,62	2.235.115	2.391.788
N. de Santander	30	26	0,018	0,016	2,95	1.971.205	1.261.632	29	28	0,018	0,017	0,55	3.732.341	1.627.565
Cauca	30	27	0,018	0,017	1,6	1.510.048	1.617.745	29	28	0,018	0,017	1,36	2.135.975	2.343.820
Risaralda	30	29	0,018	0,018	3,68	1.207.844	1.668.851	30	31	0,018	0,019	10,86	1.461.118	2.254.098
Sucre	28	29	0,017	0,018	1,6	983.331	844.623	30	28	0,018	0,017	9,45	1.116.854	891.686
Caldas	29	29	0,018	0,018	1,73	940.355	1.200.780	30	29	0,018	0,018	4,74	1.150.007	1.674.562
Huila	31	30	0,019	0,018	6,23	880.930	1.605.577	31	29	0,019	0,018	4,92	1.034.362	1.631.618
Cesar	30	26	0,018	0,016	4,45	804.853	1.827.179	28	27	0,017	0,017	0,25	958.751	2.598.464
Córdoba	28	29	0,017	0,018	1,6	570.607	1.263.570	31	29	0,019	0,018	4,26	1.014.379	1.610.146
Nariño	29	28	0,018	0,017	2,86	560.869	1.413.762	30	28	0,018	0,017	2,39	675.715	1.801.202
Quindío	30	28	0,018	0,017	3,12	295.894	703.821	29	29	0,018	0,018	1,31	403.362	892.309
La Guajira	29	24	0,018	0,015	0,24	245.145	417.471	29	28	0,018	0,017	0,55	552.693	1.649.036
Vichada	20	17	0,014	0,013	0,9	46.618	30.956	15	15	0,013	0,013	0	39.083	27.674
Putumayo	26	26	0,016	0,016	1,42	36.807	172.953	25	29	0,016	0,018	0,83	58.777	281.226
Guainía	8	8	0,011	0,011	0	30.427	1.864	7	8	0,011	0,011	0,18	5.954	1.909
Caquetá	28	27	0,017	0,017	2,2	23.178	247.749	29	28	0,018	0,017	1,19	33.971	301.163
Arauca	22	27	0,015	0,017	0,85	14.836	110.187	26	27	0,016	0,017	0,66	94.552	223.129
Chocó	22	25	0,015	0,016	0,08	14.219	134.873	24	27	0,016	0,017	0,13	12.090	174.937
Guaviare	13	27	0,012	0,017	1,03	1.707	44.269	18	26	0,014	0,016	2,29	3.555	52.411
Amazonas	2	10	0,01	0,012	0	1	245	4	10	0,01	0,012	0	23	512
Vaupés	0	2	0	0,01	0	0	26	0	3	0	0,01	0	0	235

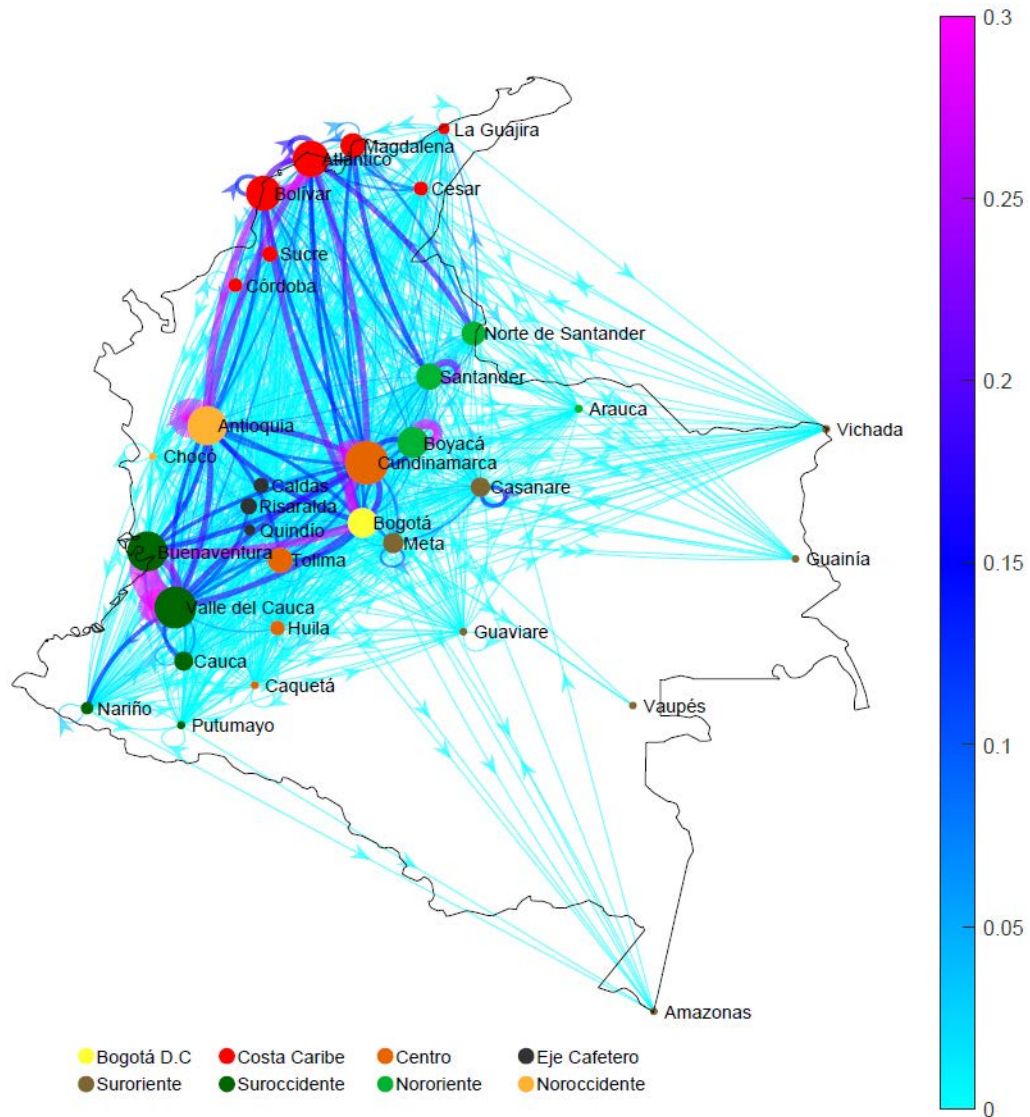


Figura 1A: Red de Comercio Departamental (RCD). Los nodos corresponden a los departamentos, el tamaño de cada nodo corresponde a su contribución porcentual en el envío de carga transportada en el ámbito nacional, su ubicación corresponde a la posición geográfica de los departamentos y su color está determinado por la región a la cual pertenece (Costa Caribe, Centro, Eje Cafetero, Nororiente, Suroriente, Suroccidente Noroccidente y Bogotá D.C). Las conexiones representan el envío de carga transportada por departamento y la flecha indica la dirección, el grosor de cada línea denota un mayor volumen, al igual que la intensidad del color (guiados por la barra lateral). Fuente: Cálculo de los autores.

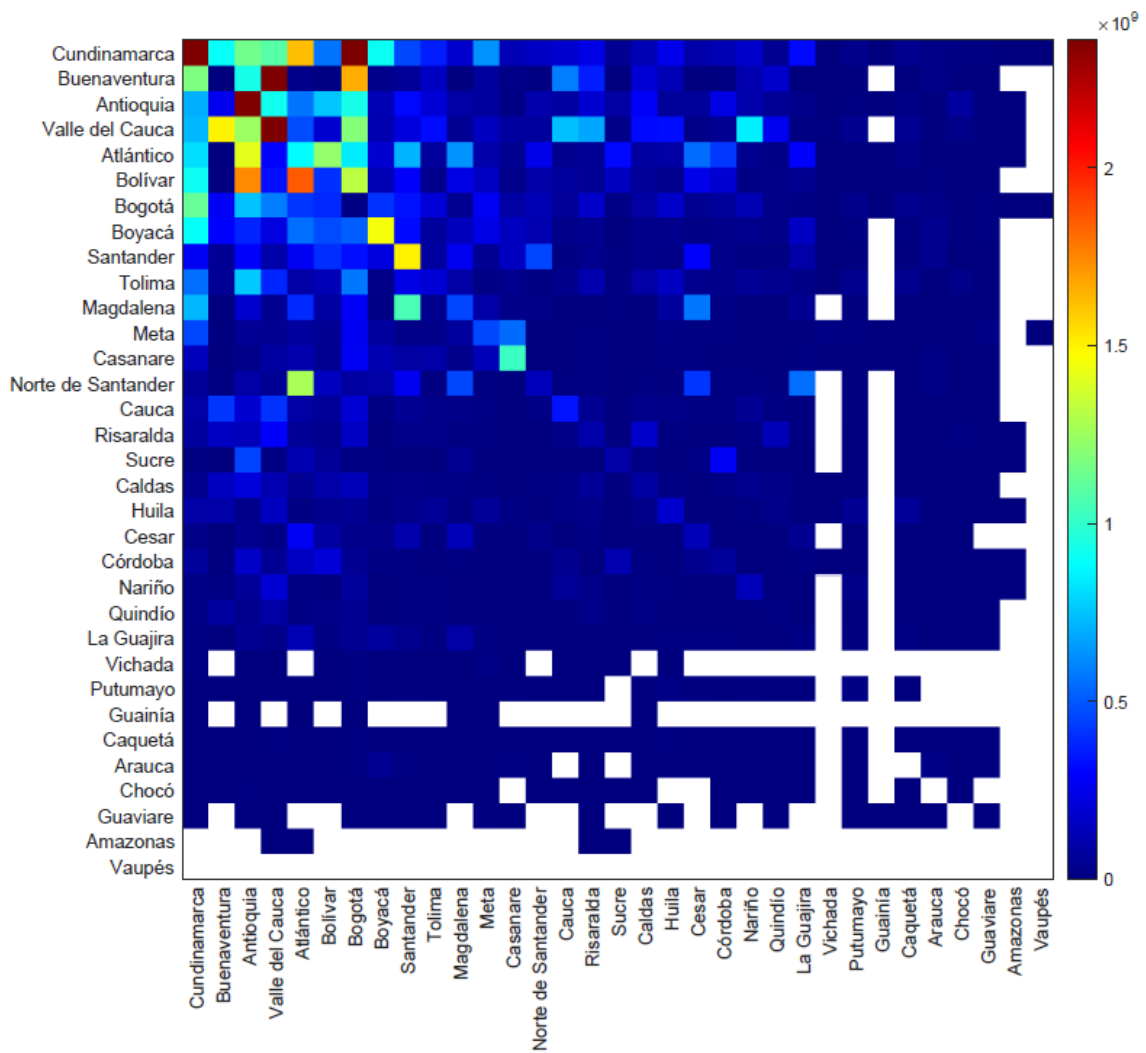


Figura 2A: Matriz de adyacencia y matriz ponderada (2018), mapa de calor. Fuente: Cálculo de los autores.