

Aproximación a la estructura del
mercado cambiario colombiano
desde el análisis de redes

Por: Jhonatan Pérez, Carlos León,
Ricardo Mariño

Núm. 867
2015

Borradores de ECONOMÍA



tá - Colombia - Bogotá - Col



APROXIMACIÓN A LA ESTRUCTURA DEL MERCADO CAMBIARIO COLOMBIANO DESDE EL ANÁLISIS DE REDES[♣]

Jhonatan Pérez[♠]

Carlos León[♣]

Ricardo Mariño^{*}

Resumen

Con base en las métricas propias utilizadas para el análisis de redes complejas e información transaccional, este trabajo permite realizar una caracterización del mercado *spot* peso/dólar y *forward* peso/dólar colombiano. En particular, es posible establecer que estos pueden ser catalogados como redes de estructura jerárquica donde un reducido grupo de Intermediarios del Mercado Cambiario centrales (periféricas) poseen una gran (pequeña) porción tanto del número de transacciones como del monto promedio negociado. Dichos resultados sugieren que ambos mercados: (i) son robustos ante la extracción aleatoria de participantes; (ii) son frágiles ante la extracción determinística de participantes centrales; y (iii) la mejor manera de “inmunizar” (i.e. la intensidad de la regulación, supervisión y seguimiento) de manera óptima los mercados es enfocarse en los participantes centrales. Adicionalmente, este trabajo resalta el papel que tiene la infraestructura financiera del país como generador de información estandarizada y confiable de mercado, la cual puede ser considerada como insumo en la toma de decisiones que involucran a las entidades involucradas en las funciones de la regulación, supervisión y seguimiento de los mercados financieros.

Palabras claves: *Minimal spanning tree*, análisis de redes, centralidad, *power-law*

Clasificación JEL: D85, G2, E42.

[♣] El análisis, opiniones y conclusiones de este artículo son responsabilidad exclusiva de los autores y su contenido no compromete al Banco de la República, ni a su Junta Directiva. Los resultados no deben ser utilizados para hacer tipo alguno de inferencia sobre las instituciones analizadas. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias de Clara Lía Machado, Hernando Vargas, Pamela Cardozo, Joaquín Bernal, Freddy Cepeda y Fabio Ortega, así como la asistencia técnica de Santiago Hernández. Durante la realización del trabajo los autores hacían parte de la Subgerencia de Sistemas de Pago y Operación Bancaria.

[♠] Profesional Especializado, Departamento de Seguimiento a la Infraestructura Financiera (DSIF), Subgerencia Monetaria y de Inversiones Internacionales (SGMII), Banco de la República (BR); jperezvi@banrep.gov.co / jhonatanpv@hotmail.com

[♣] Jefe de Investigación y Desarrollo, DSIF-SGMII -BR; cleonrin@banrep.gov.co / carlosleonr@hotmail.com

^{*} Profesional Experto, DSIF-SGMII -BR; jmarinma@banrep.gov.co / jmarinma@yahoo.com

Tabla de contenido

1. Introducción	3
2. Metodología de análisis de redes.....	4
3. Los datos	10
4. Resultados	11
5. Comentarios finales.....	21
6. Bibliografía	23

1. Introducción

Si bien existen diferentes clasificaciones de los mercados financieros, de acuerdo con Cárdenas (2009) estos se agrupan en tres. El primero corresponde al mercado monetario o *money market*, donde se presta y toma prestado dinero a corto plazo (i.e. menor a un año); el segundo de ellos es el mercado de capitales, donde se asignan y se distribuyen recursos producto del ahorro, y se transforman en inversión de largo plazo. El tercero involucra el mercado cambiario, en el que la oferta y demanda de divisas se encuentran.

Respecto a este último, el mercado local de divisas se puede dividir en mercado de contado y mercado de derivados. El primero corresponde a las compraventas de divisas que se realizan a través de las plataformas electrónicas (e.g. SET-FX, GFI y *Tradition*) y se cumplen generalmente el mismo día de la negociación a través de la Cámara de Compensación de Divisas de Colombia (CCDC). El segundo corresponde a contratos *forward*, opciones y *swaps*, cuyo cumplimiento se lleva a cabo en su mayoría de forma bilateral, ya sea en el sistema de pagos de alto valor o en el exterior, según el caso.

La utilización de la información procedente de las infraestructuras financieras (e.g. cámaras de compensación, depósitos de valores etc.) ha tomado gran importancia recientemente para las autoridades financieras, especialmente, en mercados como el cambiario, que tienen vocación *over the counter* (sobre el mostrador). De ahí que iniciativas recientes de organismos multilaterales como el BIS (Banco de Pagos Internacionales) e IOSCO (Organización Internacional de Comisiones de Valores), entre otros, relacionadas con la creación de nuevas infraestructuras centralizadoras de información del mercado (*trade repositories*), se constituyan en un avance importante hacia la transparencia de los mercados financieros.

Debido al carácter centralizado de la compensación y liquidación de operaciones del mercado de contado peso/dólar, la CCDC puede ser considerada, en términos prácticos, como la principal fuente de información del mercado. Respecto al mercado de derivados, aunque no existe una compensación centralizada para la mayoría de operaciones, el Banco de la República, en desarrollo de sus facultades como autoridad cambiaria, recibe por parte de los intermediarios cambiarios la información de tales operaciones.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene como finalidad realizar una caracterización del mercado cambiario colombiano. Para ello, se utilizan metodologías y métricas derivadas del análisis de redes complejas, las cuales permiten, entre otros, determinar la estructura del mercado, identificar y caracterizar los agentes a su interior, las principales relaciones entre ellos, así como establecer comparaciones entre los diferentes mercados (i.e. contado y derivados).

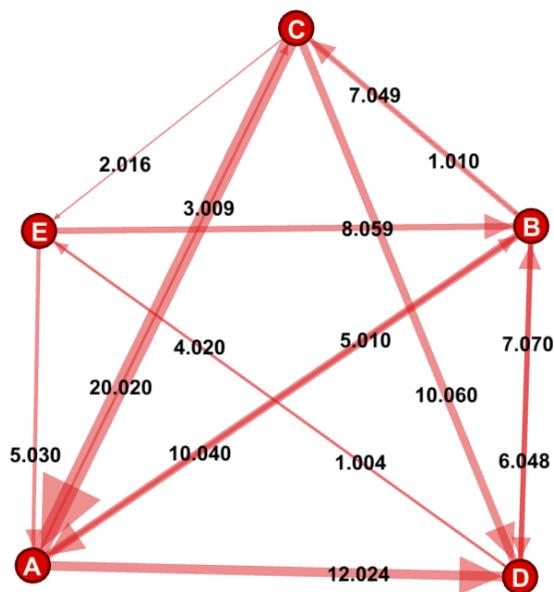
Este documento está compuesto por cinco secciones, incluida esta introducción. En la segunda sección se describen las nociones más importantes sobre teoría de redes, así como las métricas empleadas. En las secciones tres y cuatro se presentan los resultados tanto por mercado como a nivel agregado. Finalmente, en la sección cinco se presentan los comentarios finales.

2. Metodología de análisis de redes

De manera general, una red puede ser definida como una representación estructural abstracta de un sistema, la cual captura las relaciones entre los participantes. Si existen diferencias (i.e. intensidades) en las relaciones, es decir, unas son más importantes que otras, se dice que la red es ponderada. Adicionalmente, si el sentido de la relación es una característica relevante para el análisis, en este caso se considera dirigida. En lo que respecta a su representación, esta puede ser gráfica (i.e. grafo) o numérica (i.e. matriz de adyacencia).

Las transacciones generadas entre instituciones financieras en desarrollo de las actividades de intermediación de activos financieros son un ejemplo de una red ponderada y dirigida. El Diagrama 1 representa las relaciones de intercambio de activos financieros entre los participantes A, B, C, D y E. En el caso del grafo (parte superior), las instituciones se representan a través de nodos, mientras que las relaciones se representan a través de flechas (i.e. aristas). El grosor de las flechas indica el valor del pago realizado con motivo del intercambio (e.g. divisas, títulos valores etc.) y el sentido indica el originador y el receptor del mismo. En la matriz de adyacencia (M), por su parte, la representación del intercambio del activo está dado por M_{ij} , donde el i -ésimo elemento corresponde a la entidad originadora (i.e. vendedor) mientras el j -ésimo a la receptora (i.e. comprador).

Diagrama 1
Ejemplo de red de mercados financieros (compra y venta de activos)
Grafo o red



Matriz de adyacencia

$$M = \begin{pmatrix} M_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & M_{AD} & M_{AE} \\ M_{BA} & M_{BB} & M_{BC} & M_{BD} & M_{BE} \\ M_{CA} & M_{CB} & M_{CC} & M_{CD} & M_{CE} \\ M_{DA} & M_{DB} & M_{DC} & M_{DD} & M_{DE} \\ M_{EA} & M_{EB} & M_{EC} & M_{ED} & M_{EE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 5.010 & 3.009 & 12.024 & 0 \\ 10.040 & 0 & 7.049 & 6.048 & 0 \\ 20.020 & 1.010 & 0 & 10.060 & 2.016 \\ 0 & 7.070 & 0 & 0 & 4.020 \\ 5.030 & 8.059 & 0 & 1.004 & 0 \end{pmatrix}$$

Fuente: Banco de la República (2013)

2.1. Caracterización de los nodos de la red

Uno de los temas de estudio más recurrentes en el análisis de redes es el de cuantificar la importancia o *centralidad* de los nodos que la conforman. La Tabla 1 presenta un resumen de las métricas comúnmente empleadas, su descripción, formulación matemática, así como sus ventajas y desventajas.

Tabla 1: Principales métricas de centralidad

Métrica	Descripción	Formulación	Ventajas	Desventajas
Centralidad de grado (<i>degree centrality</i>)	Calcula el número de aristas asociados al nodo	<p>Redes no dirigidas</p> $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i$ <p>k_i= número de aristas del nodo i</p> <p>Redes dirigidas</p> $\sum_{i=1}^N k_i = \sum_{i=1}^N k_i^{in} + \sum_{i=1}^N k_i^{out}$	Simple e intuitivo	No captura el efecto de intensidad (e.g. monto transferido) de las relaciones
Centralidad de grado ponderada (<i>Strength centrality</i>)	Calcula el valor de la intensidad asociado a cada nodo	<p>Redes no dirigidas</p> $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_i$ <p>w_i= valor de la intensidad del nodo i</p> <p>Redes dirigidas</p> $\sum_{i=1}^N w_i = \sum_{i=1}^N w_i^{in} + \sum_{i=1}^N w_i^{out}$	Permite asignar una ponderación a las relaciones entre nodos	Es una medida individual (i.e. local) que no incorpora la importancia de los nodos a los que se está conectado (i.e. adyacentes)
Centralidad de eigenvector	El cálculo de la centralidad de eigenvector permite capturar la centralidad en función de la centralidad de los nodos adyacentes	$C_i = \lambda_1^{-1} \sum_{j=1}^N M_{(i,j)} C_j$ <p>donde,</p> <p>λ_1= eigenvector principal de M</p> <p>$M_{(i,j)}$= elementos de la matriz de adyacencia</p>	La centralidad resulta (i) de tener muchas conexiones; (ii) conexiones con nodos centrales; o (iii) ambas	Cuando las redes son dirigidas y/o acíclicas el algoritmo de resolución puede arrojar resultados inconsistentes

Fuente: Diseño de los autores, Con base en Newman (2010)

Si bien existen diferentes métricas asociadas, el uso de una u otra difiere principalmente de las características propias de la red. En el caso particular de las redes financieras, las cuales son ponderadas y dirigidas, la tabla anterior permite determinar que la centralidad de grado ponderada puede ser un indicador adecuado de la importancia de cada nodo al interior de la red; no obstante, ya que este indicador resulta en una medida de importancia local, persiste la dificultad de incorporar la centralidad de los nodos vecinos. En este sentido, con base en Newman (2010), es posible señalar

que otras métricas más avanzadas como *Katz centrality*, *PageRank centrality* y *hub/authority centrality* superan las limitaciones de la centralidad de eigenvector y, por tanto, son más apropiadas. Para el caso en cuestión, con base en León y Pérez (2014), se utilizará *hub/authority centrality*, la cual se describe brevemente a continuación.

Kleinberg (1998) desarrolló un algoritmo que permite cuantificar la importancia de un nodo a partir de la capacidad de recepción y distribución de conexiones que este tenga. Así, un nodo autoridad central (*authority*) será aquel que reciba conexiones de los mayores distribuidores centrales, y así mismo, un nodo distribuidor central (*hub*) será aquel que apunte a las mayores autoridades centrales (ver Diagrama 2).

Diagrama 2
Centralidad de autoridad y distribución



Fuente: León y Pérez (2014)

La estimación de la centralidad de autoridad y centralidad de distribución se realiza calculando la centralidad de eigenvector sobre dos versiones modificadas (\mathcal{A} y \mathcal{H}) de la matriz de adyacencia M . Esta modificación, en la cual una matriz de adyacencia asimétrica se multiplica por su traspuesta, no solo resulta en una matriz simétrica, sino que considera las adyacencias de segundo orden de cada nodo, ya sea de entrada (autoridades) o de salida (distribuidores).

$$\mathcal{A} = M^T M \qquad \mathcal{H} = M M^T \qquad [\S 1]$$

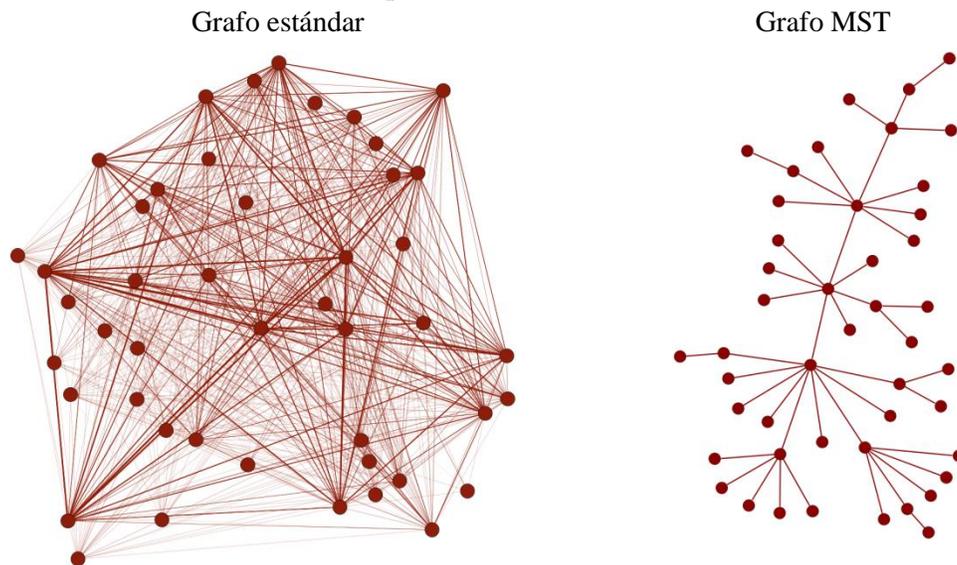
De acuerdo con Bjelland et al. (2008), $\mathcal{A} = M^T M$ envía la ponderación de las conexiones en contra de la dirección de las mismas, mientras que $\mathcal{H} = M M^T$ envía la ponderación en el mismo sentido de las conexiones. De este modo, el eigenvector principal de \mathcal{A} estima la centralidad de autoridad (i.e. como receptor de conexiones) de un nodo como el promedio ponderado de la centralidad de distribución (i.e. como originador de conexiones) de los nodos con que se encuentra conectado, mientras que el eigenvector principal de \mathcal{H} estima la centralidad de distribución de un nodo como el promedio ponderado de la centralidad de autoridad de los nodos con que se encuentra conectado. Así, un nodo tendrá una alta centralidad de autoridad en la medida que esté conectado con nodos con alta centralidad de distribución, y viceversa.

Bajo el contexto de la actividad de los mercados financieros, dado que las redes resultantes entre instituciones financieras están dadas por la compra y venta de activos financieros, aplicar la métrica

antes descrita resulta en que (i) un vendedor central será aquel que entregue activos financieros a un comprador central y (ii) un comprador central será aquel que adquiera activos financieros de un vendedor central.

En la medida que aumenta tanto el número de conexiones así como la cantidad de nodos, aumenta la complejidad para construir el grafo. Aunque existen diversas herramientas informáticas de visualización que permiten construir redes complejas, no siempre los resultados pueden ser intuitivos o fáciles de interpretar. Por esta razón, se caracterizará el mercado cambiario a través de los árboles de cobertura mínima (*Minimal Spanning Tree-MST*). Esta metodología, originaria de la Física, consigue extraer un grafo que contiene aquellas conexiones que dominan el sistema en su conjunto (i.e. son las más relevantes), por lo que es comúnmente utilizada para filtrar la información contenida en sistemas complejos, así como para describir la jerarquía implícita en éstos (ver Diagrama 3).

Diagrama 3
Representación de redes



Fuente: Cálculos de los autores.

En términos prácticos, si se cuenta con una red dirigida completa (i.e. todos los nodos están conectados entre sí) compuesta por N participantes, la metodología de MST consigue reducir un sistema de $N(N - 1)$ conexiones potenciales en uno de $(N - 1)$ conexiones, donde las conexiones resultantes consiguen maximizar la importancia de las conexiones de la red en su conjunto¹. De acuerdo con la literatura relacionada (Kim et al., 2005; Kim y Jeong, 2004; Onnela et al., 2003; Mantegna, 1999), existe una alta correlación entre las principales estadísticas del sistema completo y del sistema resultante, donde el árbol de cobertura mínima tiene la capacidad de proveer una gran cantidad de información.

¹ En la práctica, en este caso se maximiza la importancia de las conexiones al minimizar la distancia entre nodos, la cual se calculó como $1 - w_{ij}$, donde w_{ij} es la contribución de la conexión ponderada que va de i hacia j en el total de conexiones ponderadas de la red.

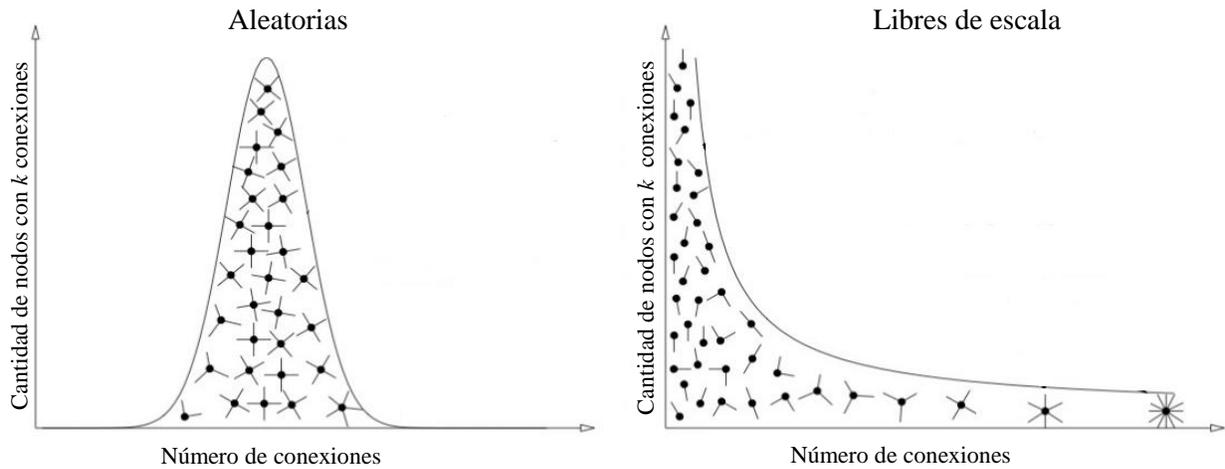
El árbol de cobertura mínima que resulta de la red contiene aquellas conexiones que son más informativas para cada uno de los participantes del sistema y, por ende, para el sistema en su conjunto. En ese sentido, tal como lo señalan Braunstein et al. (2007) y Wu et al. (2006), esta metodología permite observar el “esqueleto” que subyace tras el sistema completo, e identificar los participantes y conexiones que –por su centralidad- constituyen “la columna vertebral” de dicho “esqueleto”. De este modo, la utilización del mencionado árbol permite diferenciar los nodos y conexiones que conforman “super-autopistas” de aquellos que constituyen “caminos” (Wu et al., 2006), lo cual, a su vez, sustenta su documentada (ver Marsh et al., 2003) utilidad para identificar instituciones financieras centrales y periféricas.

2.2. Caracterización de la estructura de red a través de la distribución de probabilidad de las conexiones

La literatura destaca la existencia de dos tipos de red característicos: (i) redes aleatorias y (ii) redes libres de escala (*scale-free*). El primer tipo corresponde a aquellas redes en que la distribución de las conexiones sigue una distribución similar a la de Poisson, donde las conexiones tienden a distribuirse de manera “democrática” u homogénea entre los participantes (Diagrama 4, izquierda). El segundo tipo se caracteriza por la existencia de una estructura jerárquica, donde existe una significativa concentración de un gran número de conexiones en un reducido número de participantes, que se explica por la existencia de vínculos preferenciales (i.e. no al azar) entre los participantes, lo que resulta en una distribución de dichas conexiones con un sesgo positivo significativo (Diagrama, 4 derecha)².

² Según Craig y von Peter (2014), se conoce como libre de escala o *scale-free* porque, a diferencia de las redes aleatorias, estas no tienen una escala o patrón esperado de distribución de las conexiones entre los nodos. Por ejemplo, en una red aleatoria dirigida de n participantes, construida con una probabilidad de conexiones fija e independiente (τ), es de esperar que todos los nodos tengan un número de conexiones que converge hacia $\tau(n - 1)$, donde la distribución de dichas conexiones converge a una distribución Poisson cuando n es suficientemente grande. En una red libre de escala se sabe que la probabilidad de encontrar nodos poco (muy) conectados es alta (baja), pero se desconoce la escala de dicha distribución.

Diagrama 4
Distribución característica de las redes



Fuente: Barabási (2003).

Según Newman (2010 & 2008), el tipo más común de redes en la vida real es aquel que se aproxima al tipo libre de escala, donde existe una significativa concentración de las conexiones en un número reducido de nodos. La distribución más utilizada para caracterizar este caso es la *power-law* o Pareto. De acuerdo con Newman (2010), según la forma funcional de la distribución *power-law* [§2], el exponente γ determina si p_k , que es la probabilidad de ocurrencia de un número de conexiones o *degree* (κ), varía como función de la potencia de κ , donde C es una constante sin importancia.

$$p_k = Ck^{-\gamma} \quad [§2]$$

En cuanto al valor del exponente γ , valores ubicados en el intervalo [2,3] son considerados en la literatura como los que mejor caracterizan la distribución *power-law* de la redes de la vida real. De acuerdo con Barabási (2014), es importante señalar que valores de γ por debajo del límite inferior no corresponden a distribuciones propias de una red, mientras que valores significativamente por encima del límite superior son distribuciones donde las propiedades típicas de la red corresponden a las de tipo aleatoria.

La presencia de este tipo de distribución tiene implicaciones importantes para el análisis de las redes, ya que sugiere que (i) existe una estructura de centro y periferia en el sistema, con pocos (muchos) participantes centrales (periféricos); (ii) el sistema es robusto ante la extracción aleatoria de participantes; (iii) el sistema es frágil ante la extracción determinística de participantes centrales; y (iv) la mejor manera de “inmunizar” el sistema es enfocarse en los participantes centrales.

En el caso particular de las redes financieras, Haldane (2009) resalta la caracterización de centro-periferia típica de estas redes. Explica que dicha caracterización se relaciona con la existencia de largos periodos de aparente robustez de los mercados financieros, donde los nodos periféricos –de baja centralidad– son objeto de choques aleatorios, y de cortos pero severos episodios de choques sistémicos, en los que las instituciones sistémicamente importantes (i.e. centrales) pueden amenazar

la estabilidad financiera. De ahí la caracterización de Haldane (2009) de la red financiera internacional como robusta, pero frágil.

3. Los datos

Como se mencionó, el mercado cambiario colombiano se puede clasificar según el tipo de operación en mercado de contado y mercado de derivados. Respecto al mercado de contado, de forma general es posible identificar operaciones *spot*, donde la fecha de negociación coincide con la de cumplimiento (i.e. $t+0$), y transacciones denominadas *next day*, donde la fecha de cumplimiento se encuentra entre uno y tres días después de la fecha de la negociación (i.e. $t+1$, $t+2$ o $t+3$). En el mercado de derivados, por su parte, los intermediarios realizan principalmente operaciones *forward* con entrega (i.e. *delivery*) y de liquidación financiera (*non-delivery*), así como contratos de opciones y *swaps*. En ambos mercados, la principal divisa negociada son dólares de los Estados Unidos.

En consecuencia, la base de datos utilizada para realizar la caracterización del mercado de contado corresponde a las operaciones negociadas por los Intermediarios del Mercado Cambiario (IMC) a través de las plataformas SET-FX, GFI y *Tradition*. De acuerdo con la CCDC, entidad que realiza la liquidación de estas operaciones, durante el año 2012 se negociaron cerca USD 1.000 millones promedio diario. Es importante mencionar que la información extraída de esta infraestructura representa la totalidad del mercado intermediado ya que, por disposiciones legales, las operaciones del mercado de contado se deben liquidar a través de los sistemas de compensación y liquidación de divisas autorizados (e.g. CCDC).

Respecto al mercado de derivados, si bien la Cámara de Riesgo Central de Contraparte de Colombia (CRCC) presta servicios de compensación y liquidación centralizada de estas operaciones, su participación de mercado no es lo suficientemente representativa como para realizar una caracterización de todo el mercado de derivados. Por esta razón, se utilizará como fuente de información alternativa los reportes de operaciones de derivados enviados por los IMC al Banco de la República durante 2012. Para efectos del presente trabajo se utilizará la información correspondiente a transacciones entre IMC así como de estos con bancos del exterior que intermedian divisas de manera profesional (e.g. UBS, BoA, Chase, etc.).

Debido a que más del 95% del mercado de derivados se concentra en la realización de operaciones *forward* peso/dólar (i.e. USD 1.450 millones promedio diario), la caracterización del mercado de derivados no incluye otros tipos de operaciones (e.g. opciones y *swaps*). Por último, teniendo en cuenta la limitada participación de las operaciones de derivados que involucran divisas distintas a dólares de los Estados Unidos (i.e. 5% restante), estas tampoco se incluyeron en el análisis. En ambos casos (contado y derivados), no se incluyeron las operaciones que realizan los IMC con otros residentes (empresas del sector real, personas naturales, otros vigilados etc.).

4. Resultados

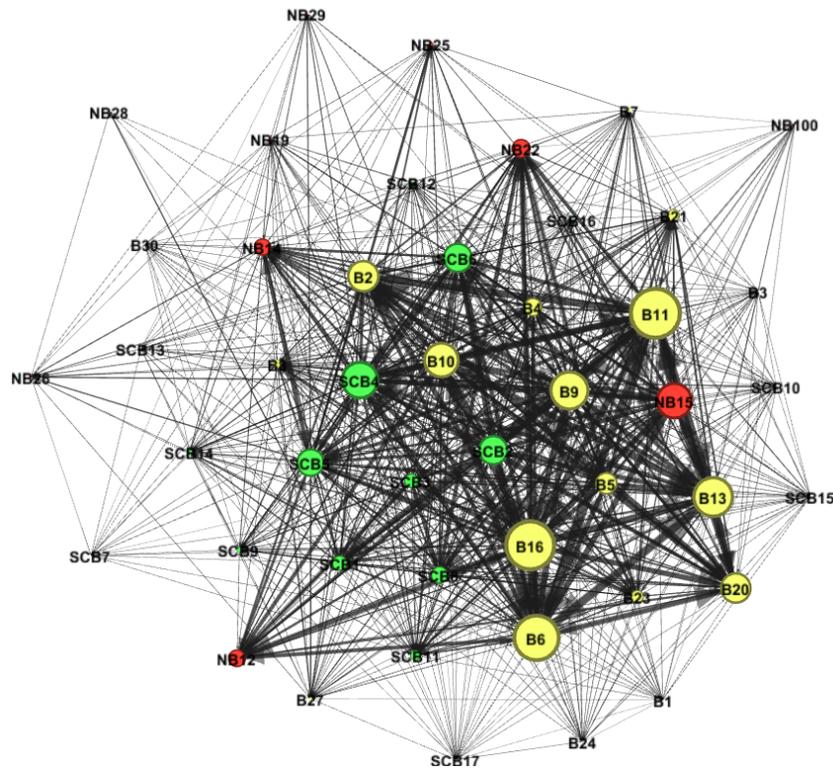
Para el análisis gráfico de los resultados es necesario tener en cuenta las siguientes convenciones y especificaciones:

- i. Cada nodo corresponde a un intermediario cambiario. Los establecimientos de crédito se agrupan como B y NB, donde la primera letra se encuentra asociada a bancos, mientras que la segunda corresponde a establecimientos de crédito distintos de bancos (e.g. corporaciones financieras, compañías de financiamiento etc.). Las sociedades comisionistas de bolsa se encuentran agrupadas como SCB, mientras que los bancos del exterior con AGE. Adicionalmente, a cada uno de los nodos analizados se le asignó un color: amarillo (B), rojo (NB), verde (SCB) y rosado (AGE).
- ii. El grosor de las líneas (i.e. ponderación) indica el valor de mercado en dólares de las operaciones realizadas entre los intermediarios que componen la red.
- iii. En el grafo MST el diámetro (i.e. tamaño) de cada nodo indica el promedio simple de la centralidad de autoridad (i.e. centralidad de comprador) y centralidad de distribución (i.e. centralidad de vendedor), mientras que para el grafo estándar corresponde a la centralidad de grado ponderada por monto (i.e. *strength centrality*).
- iv. Tanto en el grafo estándar como en el MST el origen (destino) de la flecha indica la posición vendedora (compradora) de dólares del intermediario cambiario.

4.1. Mercado de contado

El Gráfico 1 muestra el grafo del mercado de contado peso/dólar. A primera vista la red de intermediarios cambiarios analizada no es completa (i.e. no todos los nodos se conectan entre sí). Los nodos se encuentran diferenciados según el tipo de entidad, así los bancos (B) representan el 41% del total de participantes, seguido se encuentran las sociedades comisionistas de bolsa (SCB) con un 37% y el 22% restante está conformado por intermediarios del mercado cambiario diferentes de bancos (NB). En su conjunto el mercado de contado está conformado por 46 IMC.

Gráfico 1
Grafo del mercado de contado peso/dólar (2012)



Fuente: Cálculos de los autores.

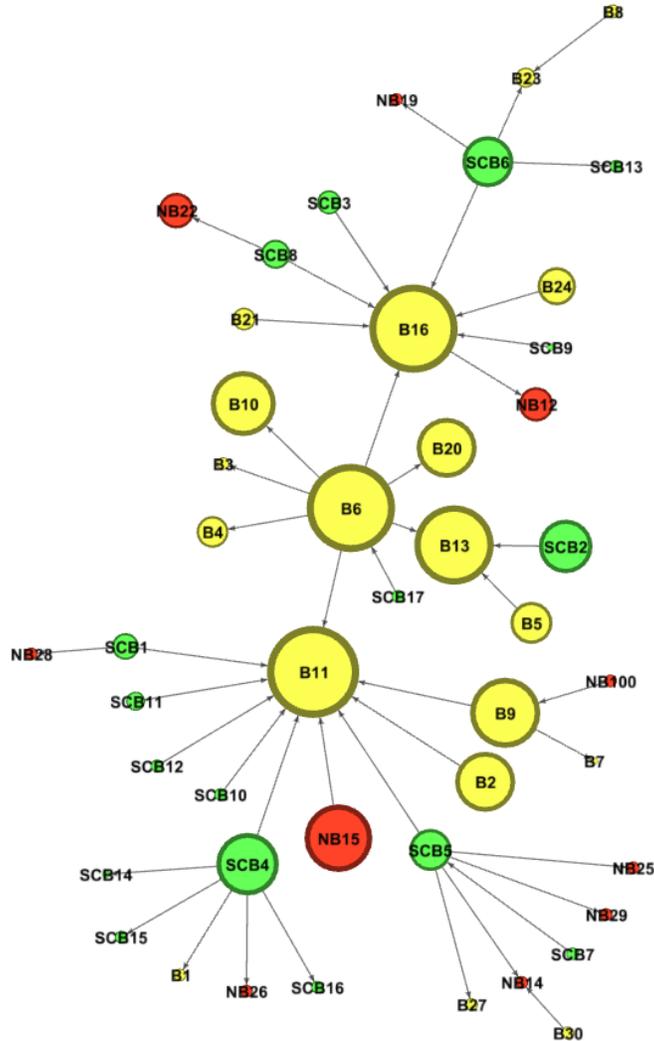
El diámetro de los nodos denota el valor asociado a la centralidad de grado ponderada por monto, mientras que la cercanía de las entidades ubicadas al centro del grafo denota el mayor volumen de las transacciones entre éstas. Al parecer, es posible identificar un grupo de entidades centrales lideradas por B11, B16, B6 y B13, las cuales se caracterizan por presentar métricas asociadas al volumen de compras y ventas de divisas (i.e. diámetro del nodo), valor de la transacción (i.e. grosor de la línea) e interacciones desde, al interior y hacia fuera de ellas (i.e. cercanía al centro del grafo), relativamente mayores que las del resto.

Dado que el número de participantes y de conexiones dificulta el análisis del grafo del mercado *spot* peso/dólar, se utilizó la metodología de árboles de cobertura mínima (*minimal spanning tree - MST*) para caracterizar de mejor manera la topología que domina la red. Como se mencionó, esta metodología consigue extraer un grafo que contiene aquellas conexiones que dominan el sistema en su conjunto (i.e. son las más relevantes), por lo que son comúnmente utilizadas para filtrar la información contenida en sistemas complejos.

El Gráfico 2 presenta el grafo MST del mercado *spot* peso/dólar durante el año 2012. En línea con lo encontrado en el grafo estándar, se observa que la estructura de la red es altamente segmentada, en la que existen grupos o clústeres bien definidos, donde se destacan aquellos liderados por los nodos B11, B16 y B6. De acuerdo con la literatura sobre MST (Gilmore et al., 2010; Hawkesby et

al., 2005), debido a su carácter central, estos nodos poseen una mayor importancia en la transmisión de choques a través del sistema en cuestión³.

Gráfico 2
Grafo MST mercado *spot* peso/dólar



Fuente: Cálculos de los autores.

³ Es importante resaltar que el número de conexiones en un grafo MST tiene una mayor significancia que en un grafo estándar. Mientras que en el grafo estándar es posible encontrar nodos con un alto número de conexiones de poca relevancia (i.e. baja ponderación), en el grafo MST la existencia de múltiples conexiones en un solo nodo solo es posible si para otros nodos esta es la más importante de sus conexiones; es decir, gracias a que el grafo MST solo conserva las conexiones más relevantes para cada nodo, concentrar conexiones es un indicador inequívoco y significativo de centralidad e importancia sistémica. Por lo anterior, tal como lo resaltan Bonanno et al. (2003), la distribución de frecuencia del número de conexiones del MST permite caracterizar cuantitativamente su estructura.

Es importante resaltar que las relaciones que más predominan en el nodo B6 son aquellas que mantiene con otros bancos locales, mientras que los nodos B16 y B11 mantienen relaciones predominantes mucho más heterogéneas. Llama especial atención que en el clúster liderado por este último nodo, seis de las nueve conexiones directas son con sociedades comisionistas de bolsa. Adicionalmente, dos de estas comisionistas (i.e. SCB4 y SCB5) tienen una función particular de intermediarios frente a un grupo de entidades de menor importancia relativa, en su mayoría compañías de financiamiento.

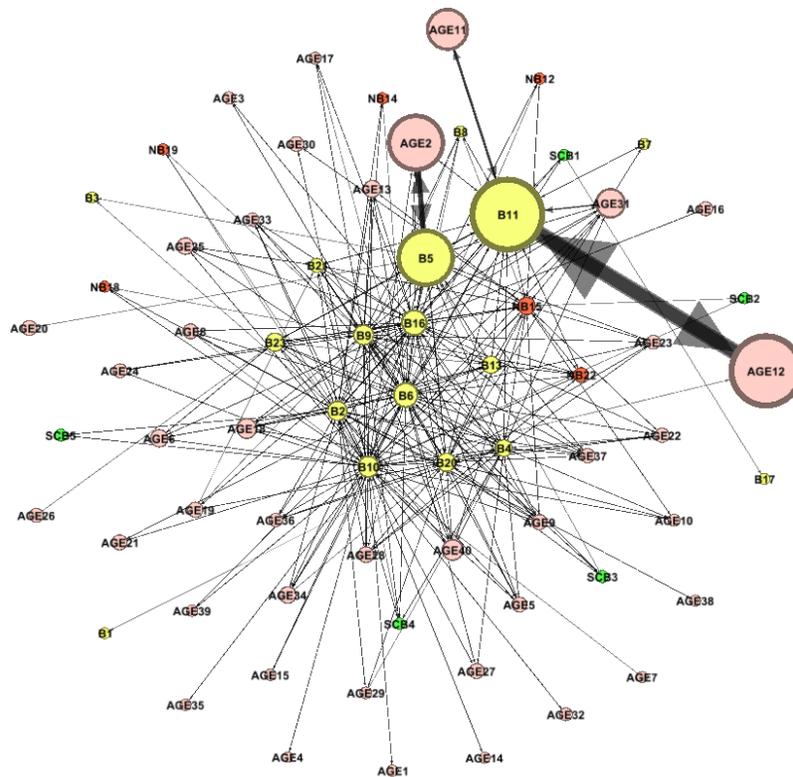
Por lo anterior, en el sentido expuesto por Braunstein et al. (2007) y Wu et al. (2006), dado que el diámetro de cada uno de estos tres nodos –el cual representa el promedio de la centralidad de autoridad y distribución estimada sobre la red completa– coincide con la importancia de éstos al interior del grafo MST (i.e. posición y número de conexiones), se puede afirmar que estas entidades y sus interconexiones constituyen la “columna vertebral” o “super-autopista” del mercado spot peso/dólar. Adicionalmente, en el sentido de Markose et al. (2012), estos nodos de mayor diámetro pueden ser catalogados como “super-propagadores” (*super-spreaders*) en la red en cuestión.

4.2. Mercado de Derivados

El Gráfico 3 muestra el grafo del mercado *forward* peso/dólar. De los 68 nodos que conforman la red, el 58% (i.e. 40 nodos) corresponde a bancos del exterior (AGE), en su mayoría de Estados Unidos y Europa; en segundo lugar se encuentran los nodos (B) con un 25% (i.e. 17 nodos); y el 17% restante (i.e. 11 nodos) se distribuye entre (SCB) y (NB).

A primera vista, la ubicación de los nodos B6, B16, B13, B20, B9, B10 y B2 parece indicar que son los más centrales a la red. Aunque el diámetro de B11 indica una actividad importante en la negociación de contratos *forward*, el hecho que no aparezca hacia el centro sugiere que su actividad está altamente concentrada. Al analizar las principales contrapartes, (i.e. AGE11 y AGE12) se identificó que corresponden a la respectiva casa matriz y una filial del exterior. La misma situación se presenta entre los nodos B5 y AGE2.

Gráfico 3
Grafo mercado *forward* peso/dólar



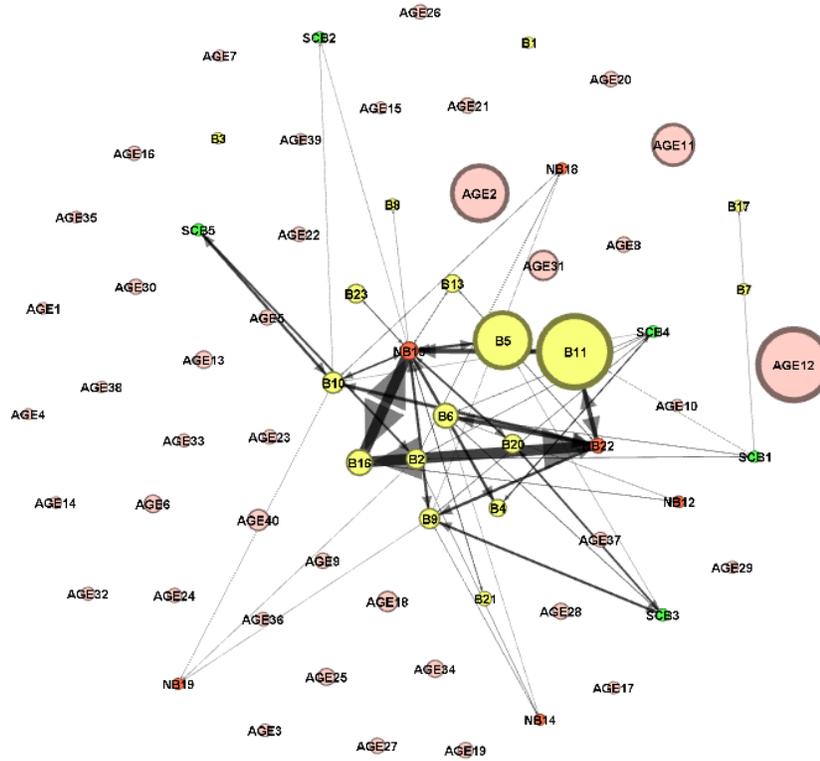
Fuente: Cálculos de los autores.

Otro aspecto que llama la atención es la actividad intragrupo (e.g. SCB-SCB) e intergrupos (e.g. SCB-AGE, SCB-NB, SCB-B) que presentan las comisionistas de bolsa. El Gráfico 4 muestra que en el primer caso el vínculo es inexistente (i.e. no existen relaciones directas entre dos comisionistas) mientras que en el segundo, sólo existen relaciones con los establecimientos de crédito (e.g. principalmente bancos). Lo anterior evidencia el importante papel de intermediarios que desempeñan los bancos al interior de la red, ya que conectan indirectamente a sociedades comisionistas de bolsa con bancos del exterior⁴.

⁴ En este caso, el grosor de las flechas indica la importancia relativa de las conexiones entre las aristas resultantes de los grupos comparados.

Gráfico 4

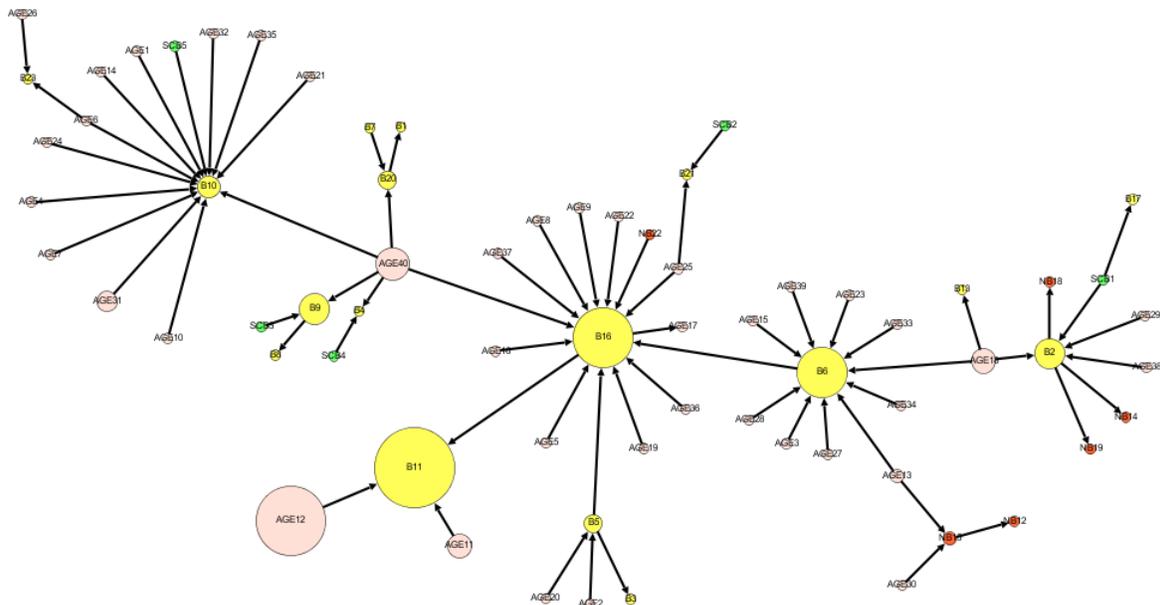
Vínculos de las sociedades comisionistas de bolsa para el mercado *forward* peso/dólar



Fuente: Cálculos de los autores.

La revisión del grafo MST del mercado *forward* peso/dólar (ver Gráfico 5) permite notar la importancia que tienen los nodos B16, B6, B2 y B10. Entre otros, se observa que cada uno de estos nodos tiene un grupo de bancos del exterior con los cuales mantiene una relación activa que predomina frente a las demás. Aunque el nodo B11 tiene un diámetro mayor que cualquiera de los nodos centrales, su ubicación hacia un extremo reduce su importancia en la red; no obstante, se confirma la relación relevante que mantiene con los nodos AG12 y AG11 (encontrada en el grafo anterior), que, como se mencionó, corresponden a la matriz y una filial del exterior.

Gráfico 5
Grafo MST mercado *forward* peso/dólar



Fuente: Cálculos de los autores.

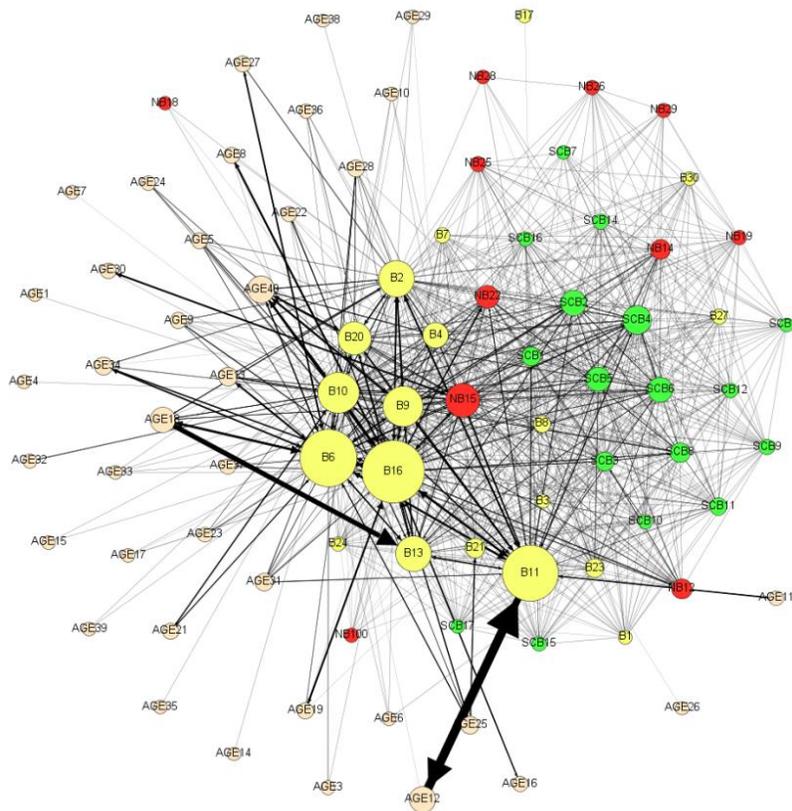
En la mayoría de los casos, la dirección de las flechas tiene como destino uno de los nodos centrales, lo cual confirma la importancia de estos al interior de la red como receptores de operaciones (i.e. compradores de USD). En particular, los nodos B16, B6, B2 y B10 concentran 15, 11, 7 y 13 conexiones respectivamente. Es importante destacar que, en conjunto, estos nodos poseen cerca del 70% del total de conexiones disponibles en el grafo MST.

De forma general, cada nodo central parece tener un comportamiento similar, donde mantiene una relación cercana con un grupo de bancos del exterior cuya relación dominante es el cierre de contratos *forward* de venta con el nodo central. Así mismo, se confirma lo encontrado en el Gráfico 4 en el sentido que cada una de las sociedades comisionistas de bolsa participantes está asociada a un banco. Por último, llama la atención el nodo AGE40, que parece tener una relación estrecha con los nodos B10 y B16, de los cuales se constituye en una especie de conector o “puente”.

4.3. Mercado *spot* y *forward* peso/dólar

Con base en las convenciones y especificaciones antes utilizadas, el Gráfico 6 representa la red resultante de agregar la red del mercado *spot* y *forward* peso/dólar. En este caso, de los 88 nodos que conforman la red, el 45,5% (i.e. 40 nodos) corresponde a bancos del exterior, seguido de los bancos locales y sociedades comisionistas de bolsa con 22,7% y 19,3% (i.e. 20 y 17 nodos), respectivamente. En último lugar se encuentran los establecimientos de crédito distintos de bancos con el 12,5% (i.e. 11 nodos).

Gráfico 6
Grafo mercado *spot* y *forward* peso/dólar



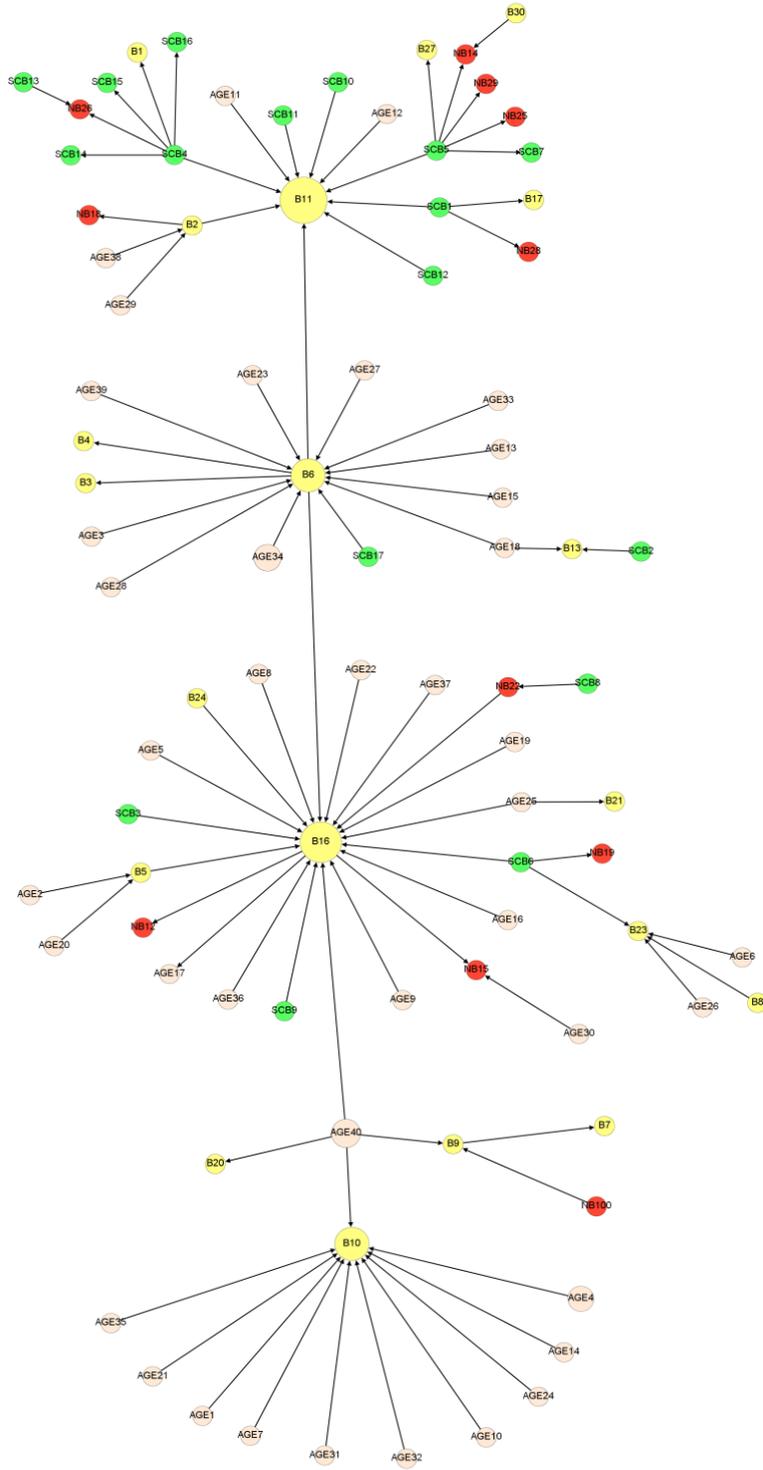
Fuente: Cálculos de los autores

Como es de esperar, el grafo conjunto guarda algún grado de semejanza con los grafos que representa cada parte del mercado *spot* y *forward* peso/dólar. Por ejemplo, (i) la red no es completa; (ii) se mantiene la importancia de los bancos como entidades centrales; (iii) existe una fuerte relación entre los bancos locales y los del extranjero y; (iv) las interacciones entre B11 con su casa matriz son particularmente sobresalientes.

Dada la complejidad de la red, el Gráfico 7 (página siguiente) presenta el respectivo grafo MST, donde se confirma la centralidad que poseen los nodos B11, B6, B16 y B10, los cuales atraviesan – de arriba a abajo– el grafo. En particular, B16 concentra 20 conexiones directas de las 87 presentes, mientras que B6, B10 y B11 concentran 15, 11 y 10, respectivamente. Llama la atención que en el mercado conjunto el papel de B11 como nodo central al interior de la red aumenta notablemente. Así mismo se destaca que las relaciones que más predominan en este nodo son las que mantiene con sociedades comisionistas de bolsa y establecimientos de crédito distintos de bancos.

Igual que en los otros grafos MST, el diámetro (i.e. centralidad de autoridad y distribución) de los nodos más conectados corrobora su importancia al interior de la red; en consecuencia, ambas aproximaciones coinciden en que estas entidades y sus interconexiones pueden ser consideradas como “la columna vertebral” o “súper-autopista” del mercado.

Gráfico 7
 Grafo MST mercado *spot* y *forward* peso/dólar



Fuente: Cálculos de los autores

4.4. Estadísticas básicas de las redes analizadas

Como complemento al análisis topológico anterior, la Tabla 2 presenta algunas estadísticas básicas de las redes objeto de estudio. En cuanto a la contribución del valor de las transacciones, la base de datos utilizada muestra que el mercado *spot* representa cerca del 40% del monto negociado, mientras que el 60% restante corresponde al mercado *forward*. El número de participantes muestra que entre los dos mercados existe una diferencia de 22 entidades, donde gran parte de este valor corresponde a la presencia de los bancos del exterior.

Tabla 2
Estadísticas de las redes analizadas

Estadísticas básicas	<i>Spot</i>	<i>forward</i>	Agregado (<i>spot</i> + <i>forward</i>)
Contribución al valor de las transacciones (<i>promedio diario</i>)	40%	60%	100%
Número de participantes	46	68	88
Grado promedio por nodo (<i>average degree</i>)	31	8	19
Densidad (<i>conexiones observadas / conexiones posibles</i>)	69%	10%	22%
Exponente γ de la distribución <i>power-law</i> de los montos negociados	2,7	2,1	2,1
Exponente γ de la distribución <i>power-law</i> del número de conexiones	2,5	2,4	1,9

Fuente: Cálculos de los autores

Aunque en el mercado *forward* existe un mayor número de participantes, el grado promedio por nodo indica que el número de conexiones entre sus participantes es mucho menor que las existentes en el mercado *spot*, tal y como se evidenció en el análisis gráfico. Lo anterior se confirma con el indicador de densidad, donde el mercado *forward* posee sólo el 10% del total de conexiones posibles, mientras que el mercado *spot* el 69%.

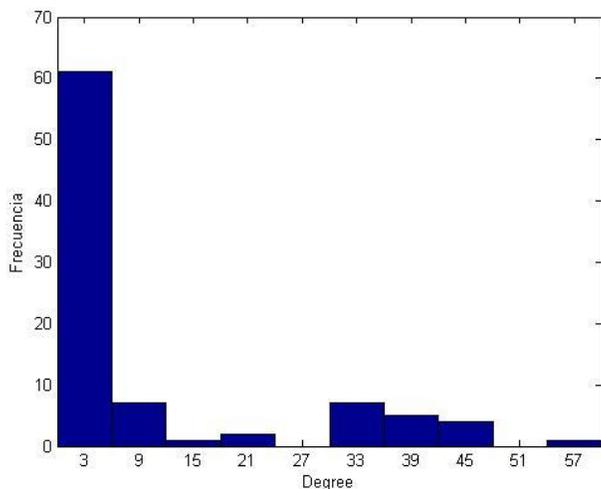
Al estimar el exponente γ asociado a cada una de las redes⁵ se encontró que en el caso de la red ponderada la distribución de los montos negociados se asemeja a una distribución tipo *power-law* con valores dentro del intervalo [2,3], lo cual, de acuerdo con la literatura relacionada, indica la existencia de un gran número de participantes con un número reducido de montos transados, así como un pequeño grupo de participantes que concentra un alto volumen de transacciones.

Resultados similares se obtuvieron al analizar la distribución de la red por número de conexiones. Aunque el exponente del grafo conjunto está ligeramente por debajo del límite inferior, el Gráfico 8 permite observar que cerca de 60 entidades poseen tres o menos conexiones, mientras que poco menos de veinte entidades poseen conexiones dentro del intervalo [33- 45] e incluso una entidad posee cerca de 57 conexiones. Lo anterior permite inferir que incluso el mercado conjunto también posee las características de las distribuciones tipo *power-law*, donde un reducido grupo de

⁵ Con base en Clauset et al. (2009) y Barndorff-Nielsen y Cox (1996), la estimación del exponente fue realizada por máxima verosimilitud.

participantes posee un alto número de conexiones, mientras que un grupo relativamente grande de entidades concentran un reducido número de conexiones.

Gráfico 8
Distribución del número de conexiones de la red agregada (*spot* y *forward*)



Fuente: Cálculos los autores

En otras palabras, los resultados anteriores permiten caracterizar el mercado cambiario *spot* y *forward* peso/dólar como una estructura que se asemeja a la de centro y periferia, con pocos participantes centrales y muchos periféricos. Esto es particularmente importante en la medida que la red en su conjunto es frágil ante la extracción determinística de participantes centrales y al mismo tiempo es robusta frente a una extracción aleatoria de los mismos. Adicionalmente, los mismos sugieren que la mejor manera de enfocar los esfuerzos en temas de seguimiento a entidades, así como en labores de regulación prudencial y supervisión, consiste en concentrarse en los participantes catalogados como centrales.

5. Comentarios finales

La caracterización del mercado cambiario a través del análisis de redes permitió identificar la mayor importancia de unas pocas entidades y sus interconexiones al interior de dicho mercado, las cuales conforman la “columna vertebral” o “super-autopista” de este mercado en el sentido expuesto por Braunstein et al. (2007) y Wu et al. (2006). La importancia de estas entidades se verificó a través de (i) el análisis gráfico de su rol en la estructura jerárquica más sencilla que mejor caracteriza al mercado en su conjunto (i.e. *minimal spanning tree* – MST) y (ii) su centralidad como vendedor-comprador (i.e. centralidad de autoridad y distribución).

La caracterización del mercado cambiario también permitió encontrar que es una estructura jerárquica (i.e. no aleatoria), muy similar a aquellas documentadas en la literatura sobre redes financieras y de la vida diaria (i.e. internet, redes sociales), donde se destaca la concentración del número y valor de las conexiones en los participantes que ocupan posiciones de importancia al

interior del sistema por su centralidad. El resultado de la caracterización permitió determinar que los mercados analizados son redes poco densas (en especial en el mercado *forward* y agregado), que constan de centros y periferias, cuyas distribuciones (i.e. valor y número de conexiones) son de tipo *power-law*, por lo que estas redes puede ser convenientemente descritas como robustas ante choques aleatorios, pero frágiles ante ataques determinísticos. Estos resultados son consistentes con lo encontrado por Haldane (2009) para la red financiera internacional, así como León y Berndsen (2014), León y Pérez (2014b) y Cepeda (2008) para el caso colombiano.

Con fines comparativos se realizó la misma caracterización para las redes que conforman el mercado cambiario (i.e. contado y derivados). Al identificar la “columna vertebral” o “super-autopista” de cada mercado se verificó que algunos IMC cumplen un papel significativo en ambas redes, mientras que otros lo hacen solo en alguna de ellas.

De esta comparación se pueden destacar los siguientes hallazgos: (i) los bancos son los participantes más centrales de la red, en especial en el mercado *forward*, en la que un pequeño grupo de bancos lideran la red tanto en número de conexiones como montos negociados; (ii) existe un vínculo fuerte entre los bancos del exterior y los nodos caracterizados como centrales, donde predominan el cierre de operaciones *forward* de venta de los primeros hacia los segundos; (iii) existen dos bancos locales que mantienen una fuerte relación de intercambio con sus matrices y filiales del exterior y, (iv) existen diferencias estructurales en la dinámica de negociación de las sociedades comisionistas según el tipo de mercado. Se observa que mientras en el mercado *spot* las sociedades comisionistas de bolsa sirven de intermediario a ciertas entidades (i.e. corporaciones financieras y compañías de financiamiento) ante los bancos comerciales considerados como centrales, en el mercado *forward* su actividad de intermediación se reduce significativamente, al punto de mantener vínculos relevantes únicamente con algunos de los bancos considerados como centrales.

La metodología aplicada en esta investigación, así como los resultados descritos, son de especial relevancia ya que contribuyen no solo a comprender y cuantificar el papel desempeñado por las instituciones financieras en desarrollo de sus actividades de intercambio de activos, sino también, a determinar criterios técnicos adicionales que podrían, entre otros, servir para focalizar los esfuerzos en materia de regulación, supervisión y seguimiento sobre aquellas entidades consideradas como centrales al interior de los diferentes mercados. Así mismo, este trabajo permite reconocer el destacado papel que cumple la infraestructura financiera como medio para obtener información centralizada, con un alto nivel de detalle y estandarización acerca de la actividad de los mercados.

Por último este trabajo no incluyó las operaciones que realizan los IMC con otros residentes (e.g. sector real, otros vigilados, personas naturales etc.). La extensión de la metodología empleada en este tipo de participantes puede brindar nuevas perspectivas sobre la caracterización del mercado de divisas.

6. Bibliografía

- Banco de la República, *Reporte de Sistemas de Pago*, Banco de la República, 2013.
- Barabási, A. L., *Linked*, plume, 2003.
- Barabási, A. L., *Network science*, in-press, 2014
- Barndorff-Nielsen, O. E. y Cox, D.R., “Prediction and asymptotics”. *Bernoulli*, 1996, vol. 2, no 4, p. 319-340.
- Bjelland, J.; Canright, G.; Engo-Mønsen, K., “Web link analysis: estimating document’s importance from its context”, *Teletronikk*, No.1, 2008.
- Bonanno, G.; Caldarelli, G.; Lillo, F.; Mantegna, R.N., “Topology of correlation-based minimal spanning trees in real and model markets”, *Physical Review E*, No.68, 2003.
- Braunstein, L.A.; Wu, Z.; Chen, Y.; Buldyrev, S.V.; Kalisky, T.; Sreenivasan, S.; Cohen, R.; López, E.; Havlin, S.; Stanley, E., “Optimal path and minimal spanning trees in random weighted networks”, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol.17, No.7, 2007.
- Cárdenas, M; *Introducción a la economía colombiana*, Alfaomega. 2009.
- Cepeda, F.H., “La topología de redes como herramienta de seguimiento en el Sistema de Pagos de Alto Valor en Colombia”, *Borradores de Economía*, No.513, Banco de la República, 2008.
- Clauset, A.; Shalizi, C.R.; Newman, M.E.J., “Power-law distributions in empirical data”, *SIAM Review*, No.4, Vol.51, 2009.
- Craig, B. y von Peter, G., “Interbank tiering and money center banks”, *Journal of Financial Intermediation*, No. 23, 2014.
- Gilmore, C.G.; Lucey, B.M.; Boscia, M.W., “Comovements in government bond markets: a minimum spanning tree analysis”, *Physica A*, No.389, 2010.
- Haldane, A.G., “Rethinking the financial network”, *Speech delivered at the Financial Student Association (Amsterdam, Netherlands)*, April, 2009.
- Hawkesby, C.; Marsh, I.W.; Stevens, I., “Comovements in the prices of securities issued by large complex financial institutions”, *Working Paper*, No.256, Bank of England, 2005.
- Kim, D.-H. y Jeong, H., “Scale-free spanning trees of complex networks”, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol.44, No.3, 2004.
- Kim, D.-H.; Son, S.W.; Ahn, Y.-Y.; Kim, P.J.; Eom, Y.-H.; Jeong, H., “Underlying scale-free trees in complex networks”, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, No.157, 2005.
- Kleinberg, J.M., “Authoritative sources in a hyperlinked environment”, *Proceedings of the ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 1998.
- León, C. y Berndsen, R., “Rethinking financial stability: Challenges arising from financial networks’ modular scale-free architecture”, *Journal of Financial Stability*, Vol.15, 2014.
- León C. y Pérez J., “Assessing financial markets infrastructures’ systemic importance with authority and hub centrality”, *Journal of Financial Markets Infrastructures (Risk series)*. Vol 2, No 3, 2014.
- León, C. y Pérez, J., “El mercado OTC de valores en Colombia: caracterización y comparación con base en el análisis de redes complejas”, *Revista Economía Institucional*, Universidad Externado de Colombia, Vol. 16, No 31, 2014b.

- Mantegna, R.N., "Hierarchical structure in financial markets", *The European Physical Journal B*, No.11, 1999.
- Markose, S.; Giansante, S.; Shaghghi, A.R., "'Too interconnected to fail' financial network of US CDS market: topological fragility and systemic risk", *Journal of Economic Behavior & Organization*, No.83, 2012.
- Marsh, I.W.; Stevens, I.; Hawkesby, C., "Large complex financial institutions: common influences on asset price behaviour?", *Financial Stability Review*, Bank of England, December, 2003.
- Newman, M.E.J., "The physics of networks", *Physics Today*, No.33, 2008.
- Newman, M.E.J., *Networks*, Oxford University Press, 2010.
- Onnela, J.-P.; Chakraborti, A.; Kaski, K.; Kertész, J.; Kanto, A., "Dynamics of market correlations: Taxonomy and portfolio analysis", *Physical Review E*, No.68, 2003.
- Wu, Z.; Braunstein, L.A.; Havlin, S.; Stanley, H.E., "Transport in weighted networks: partition into superhighways and roads", *Physical Review Letters*, No.96, 2006.



Este documento puede ser
consultado en
[http://www.banrep.gov.co/
publicaciones/pub_borra.htm](http://www.banrep.gov.co/publicaciones/pub_borra.htm)

