

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

**THE STRUCTURE BEHIND THE COLOMBIAN EXCHANGE MARKET:
A NETWORK ANALYSIS APPROACH**

**APROXIMAÇÃO À ESTRUTURA DO MERCADO CAMBIAL COLOMBIANO
DESDE A ANÁLISE DE REDES**

Recibido: 28/06/14

Aprobado: 27/07/14

Jhonatan Pérez

Profesional Especializado del Departamento de Seguimiento a la Infraestructura Financiera (DSIF), Subgerencia de Sistemas de Pago y Operación Bancaria (SGS-POB), Banco de la República (BR); Colombia. Ingeniero Industrial. Correo electrónico: jperezvi@banrep.gov.co / jhonatanpv@hotmail.com

Carlos León

Jefe de Investigación y Desarrollo, Departamento de Seguimiento a la Infraestructura Financiera (DSIF), Subgerencia de Sistemas de Pago y Operación Bancaria (SGSPOB), Banco de la República (BR), Colombia. Candidato a PhD. Correo electrónico: cleonrin@banrep.gov.co / carlosleonr@hotmail.com

Ricardo Mariño

Profesional Experto, DSIF-SGSPOB-BR; Colombia. Magíster.
Correo electrónico: jmarinma@banrep.gov.co / jmarinma@yahoo.com

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

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 cambiario colombiano. En particular, es posible establecer que este puede ser catalogado como una red de estructura jerárquica donde un reducido (amplio) grupo de intermediarios posee una gran (pequeña) porción tanto del número de transacciones como del monto negociado. Dichos resultados sugieren que ambos mercados: i) son robustos (frágiles) ante la extracción aleatoria (determinística) de participantes y; ii) la mejor manera de “inmunizar” (i.e. intensidad de la regulación, supervisión y seguimiento) el mercado es enfocándose en los participantes centrales.

Palabras clave

Árboles de cobertura mínima, análisis de redes, centralidad, distribución Pareto

Adicionalmente, se resalta el papel que tiene la infraestructura financiera del país como generador de información estandarizada, la cual puede ser considerada como insumo en la toma de decisiones de entidades involucradas en las funciones de la regulación, supervisión y seguimiento de los mercados financieros.

Clasificación JEL: D85, G2, E42

THE STRUCTURE BEHIND THE COLOMBIAN EXCHANGE MARKET: A NETWORK ANALYSIS APPROACH

Abstract

Based on metrics applied for the analysis of complex networks and trade information, this paper aims to characterize both spot and derivatives markets for the Colombian case. Results evidence that the aforementioned markets can be categorized as networks with a hierarchical structure: a small group (central-participants) concentrated a huge portion of transactions, whereas a big group of them (peripheral-participants) has just a few transactions. These suggest that first, both markets are robust to the random, but deterministic, removal of participants; second, they are fragile to the deterministic extraction of central-participants; and, third, the best way to “immunize” (i.e. the intensity of regulation, supervision and monitoring activities) optimally those markets is to focus on central-participants. Additionally, the paper highlights the role of the financial infrastructure as a source of standardized and reliable market data. This valuable information can be considered as an input in decision-making processes by entities involved in regulation, supervision and control of the financial markets.

Key words

Minimum Spanning Tree, Network Analysis, Centrality, Pareto Distribution.

APROXIMAÇÃO À ESTRUTURA DO MERCADO CAMBIAL COLOMBIANO DESDE A ANÁLISE DE REDES

Resumo

Com base nas métricas próprias utilizadas para a análise de redes complexas e informação transaccional, este trabalho permite realizar uma caracterização do mercado cambial colombiano. Em particular, é possível estabelecer que este pode ser catalogado como uma rede de estrutura hierárquica onde um reduzido (amplo) grupo de intermediários possui uma grande (pequena) porção tanto do número de transações como do montante negociado. Ditos resultados sugerem que ambos mercados: i) são robustos (frágeis) ante a extração aleatória (determinística) de participantes e; ii) a melhor maneira de “imunizar” (i.e. intensidade da regulação, supervisão e seguimento) o mercado é enfocando-se nos participantes centrais. Adicionalmente, ressalta-se o papel que tem a infraestrutura financeira do país como gerador de informação padronizadas a qual pode ser considerada como insumo na tomada de decisões de entidades envolvidas nas funções da regulação, supervisão e seguimento dos mercados financeiros.

Palavras chave

Árvores de cobertura mínima, análise de redes, centralidade, distribuição Pareto

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 *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 valor¹ o en el exterior, según el caso.

La utilización de la información procedente de las infraestructuras financieras (e.g. cámaras de compensación) ha tomado gran importancia recientemente para las autoridades financieras, especialmente en mercados como el cambiario, que tiene 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. Esta iniciativa se enmarca en los antecedentes de la crisis financiera de 2008, en donde quedó evidenciado que la opacidad del mercado OTC, especialmente con instrumentos financieros derivados, resultó en una incertidumbre generalizada sobre la exposición crediticia de los participantes.

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).

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

1 El sistema de pagos de alto valor es una plataforma electrónica donde las entidades participantes acuden para realizar transferencias de dinero.

es una característica relevante entonces es un caso de red dirigida. En lo que respecta a su representación, esta puede ser gráfica (i.e. grafo) o numérica (i.e. matriz de adyacencia).

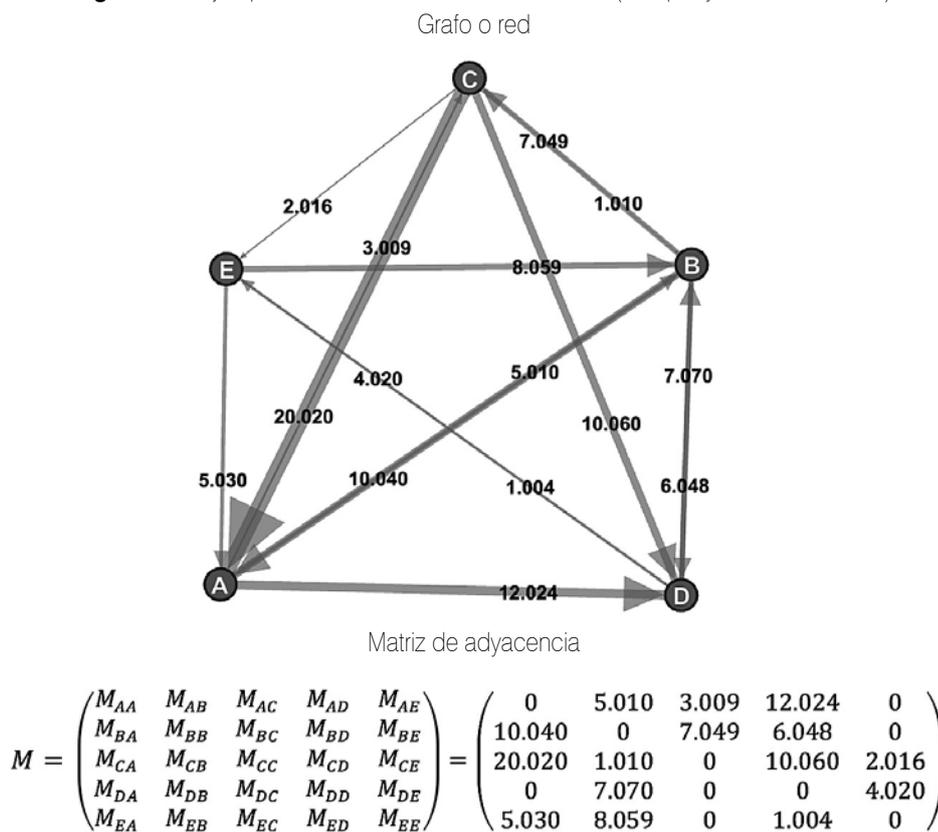
Las transacciones generadas entre instituciones financieras en desarrollo de las actividades de intermediación de activos financieros son un ejemplo de una red ponderada y dirigida. El Diagrama 1 representa las relaciones de intercambio de activos financieros entre los participantes A, B, C, D y E. En 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).

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 (siguiente página) presenta un resumen de las métricas comúnmente emplea-

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



Fuente: Banco de la República (2013)

Tabla 1. Principales métricas de centralidad

Métrica	Descripción	Formulación	Ventajas	Desventajas
Centralidad de grado (<i>degree centrality</i>)		Redes no dirigidas		
		$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i$		
Centralidad de grado ponderada (<i>Strength centrality</i>)		Redes no dirigidas		
		$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i$		
Centralidad de eigenvector		Redes no dirigidas		
		$C_i = \lambda_1^{-1} \sum_{j=1}^N M_{(i,j)} C_j$		
	El cálculo de la centralidad de eigenvector permite capturar la centralidad en función de la centralidad de los nodos adyacentes	<p>donde,</p> <p>$\mathbf{1}_i$ = eigenvector principal de $\mathbf{K}_{(i,j)}$ = 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)

das, su descripción, formulación matemática, así como sus ventajas y desventajas.

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*, *Page Rank centrality* y *hub/authority centrality* superan las limitaciones de la centralidad eigenvector y, por tanto, son más apropiadas. Para el caso en cuestión, con base en León y Pérez (2014) se utilizará esta última alternativa, 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).

La estimación de la centralidad de autoridad y centralidad de distribución se realiza calculando la centralidad de eigenvector sobre dos versiones modificadas (\mathbf{A} y \mathbf{H}) de la matriz de adyacencia \mathbf{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).

$$\mathbf{A} = \mathbf{M}^t \mathbf{M} \quad \mathbf{H} = \mathbf{M} \mathbf{M}^t \quad [\text{\$1}]$$

Diagrama 2. Centralidad de autoridad y distribución



Fuente: León y Pérez (2013)

De acuerdo con Bjelland et al. (2008), $\mathbf{A} = \mathbf{M}^t \mathbf{M}$ envía la ponderación de las conexiones en contra de la dirección de las mismas, mientras que $\mathbf{H} = \mathbf{M} \mathbf{M}^t$ envía la ponderación en el mismo sentido de las conexiones. De este modo, el eigenvector principal de \mathbf{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 \mathbf{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 o (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 estos (ver Diagrama 3).

En términos prácticos, si se cuenta con una red dirigida completa (i.e. todos los nodos están conectados entre sí) compuesta por 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 conjunto. De acuerdo con la literatura relacionada (Kim et al., 2005; Kim y Jeong, 2004; Onnela et al., 2003; Mantegna, 1999), existe una alta correlación de 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.

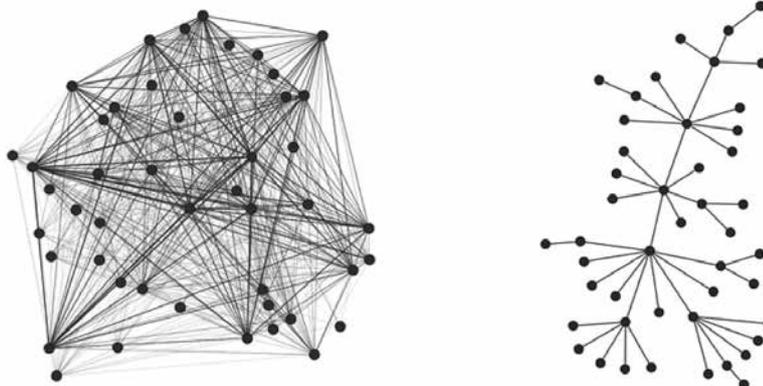
El árbol de cobertura mínima que resulta de la red contiene aquellas conexiones que son más informativas para cada uno de los participantes del sistema y, por ende, para el sistema en su conjunto. En ese sentido, tal como lo señalan Braunstein et al. (2007) y Wu et al. (2006), esta metodología permite 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 (Marsh et al., 2003) utilidad para identificar instituciones financieras centrales y periféricas.

Caracterización de la estructura de red a través de la distribución de probabilidad

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

Diagrama 3. Representación de redes

Grafo estándar Grafo MST



Fuente: Cálculos de los autores

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.

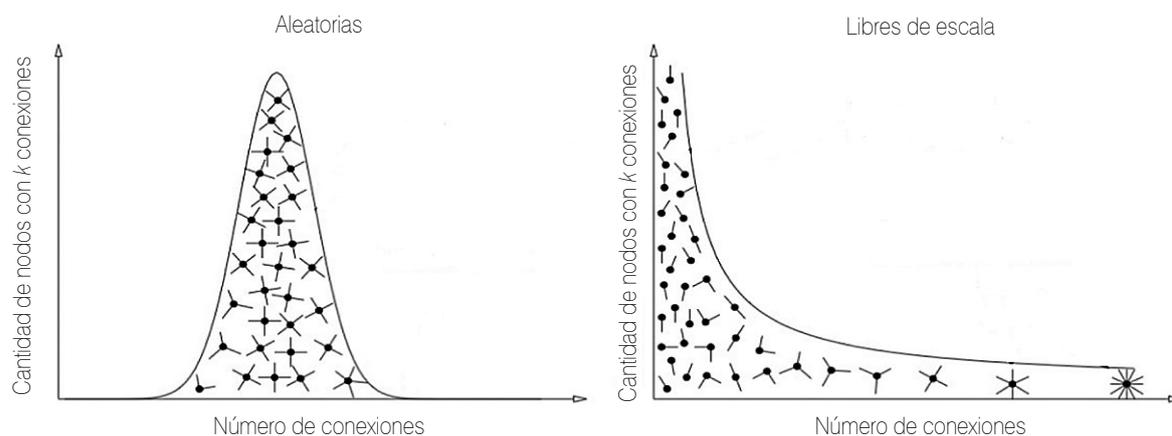
Según Newman (2010 & 2008), el tipo más común de redes en la vida real es aquel que se aproxima al tipo libre de escala, donde existe una significativa concentración de las conexiones en un número reducido de nodos. La distribución más utilizada para caracterizar este caso es la *power-law*

o Pareto. De acuerdo con Newman (2010), según la forma funcional de la distribución *power-law* [§2], el exponente determina si p_k , que es la probabilidad de ocurrencia de un número de conexiones o *degree(k)*, varía como función de la potencia de k , donde C es una constante sin importancia.

$$p_k = Ck^{-\gamma} \text{ [§2]}$$

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

Diagrama 4. Distribución característica de las redes



Fuente: Barabási (2003).

- 2 Según Craig y von Peter (2010), 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.

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 que la caracterización de centro-periferia típica de estas redes explica la existencia de largos periodos de aparente robustez de los mercados financieros, donde los nodos periféricos –sistémicamente no importantes- son objeto de choques aleatorios, y de cortos pero severos episodios de choques sistémicos, en los que las instituciones sistémicamente importantes pueden amenazar la estabilidad financiera; de ahí la caracterización de Haldane de la red financiera internacional como robusta, pero frágil.

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 *nextday*, 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 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.

Resultados

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

Tabla 2. Convenciones para la interpretación de los resultados

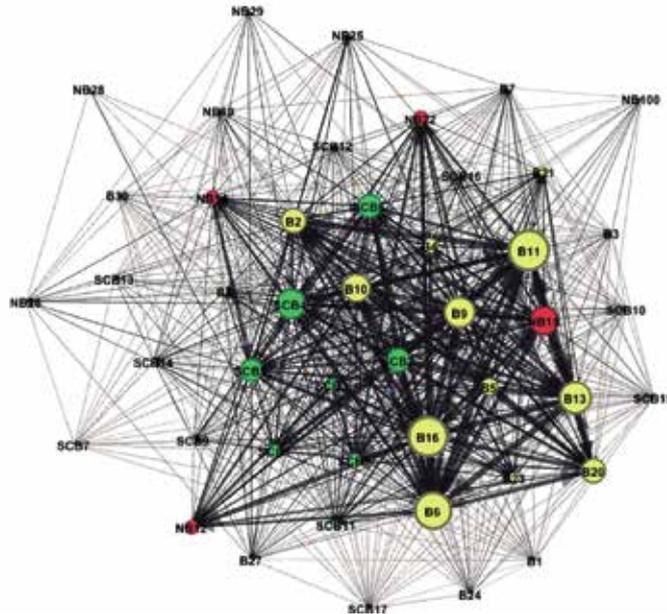
Tipo	Grafo estándar	MST
Caracterización de Nodos	 B	Bancos
	 NB	Establecimientos de crédito distintos de bancos (e.g. corp. Financieras, comp. de financiamiento)
	 AGE	Agentes del Exterior (e.g. Chase, BoA, Barclays)
	 SCB	Sociedades comisionistas de bolsa
Tamaño del nodo	Centralidad ponderada (<i>strengthcentrality</i>)	Promedio simple centralidad de autoridad y distribución
Flecha (origen)	Comprador	
Flecha (destino)	Vendedor	
Intensidad (grosor)	Valor operación (USD)	

Fuente: Diseño de los autores

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%, 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)



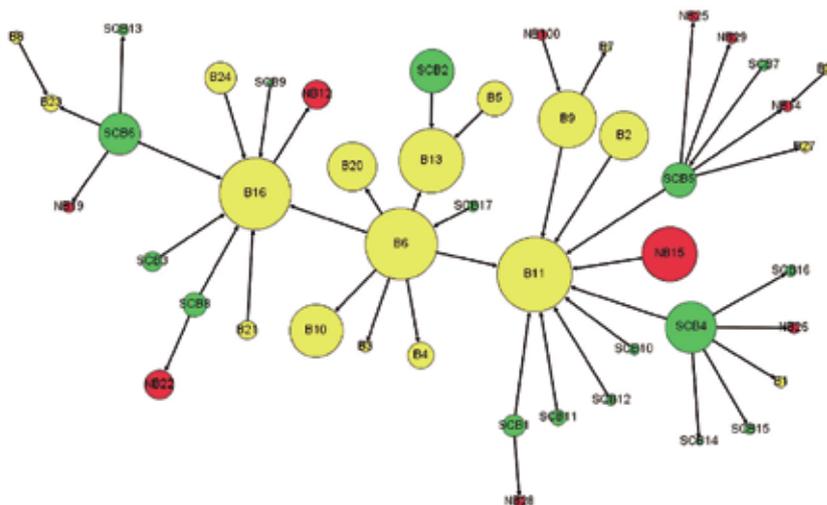
Fuente: cálculos propios

El diámetro de los nodos denota el valor asociado a la centralidad ponderada por monto, mientras que la cercanía de las entidades ubicadas al centro del grafo denota el mayor volumen de las transacciones entre estas. 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.

Al aplicar la metodología de árboles de cobertura mínima (Minimal Spanning tree- MST), 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 cuestión. 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. (Gráfico 2)

Es importante resaltar que las relaciones que más predominan en el nodo B6 son aquellas que mantiene con otros

Gráfico 2. Grafo MST mercado spot peso/dólar


Fuente: cálculos de los autores

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 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 estos al interior del grafo MST (i.e su 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.

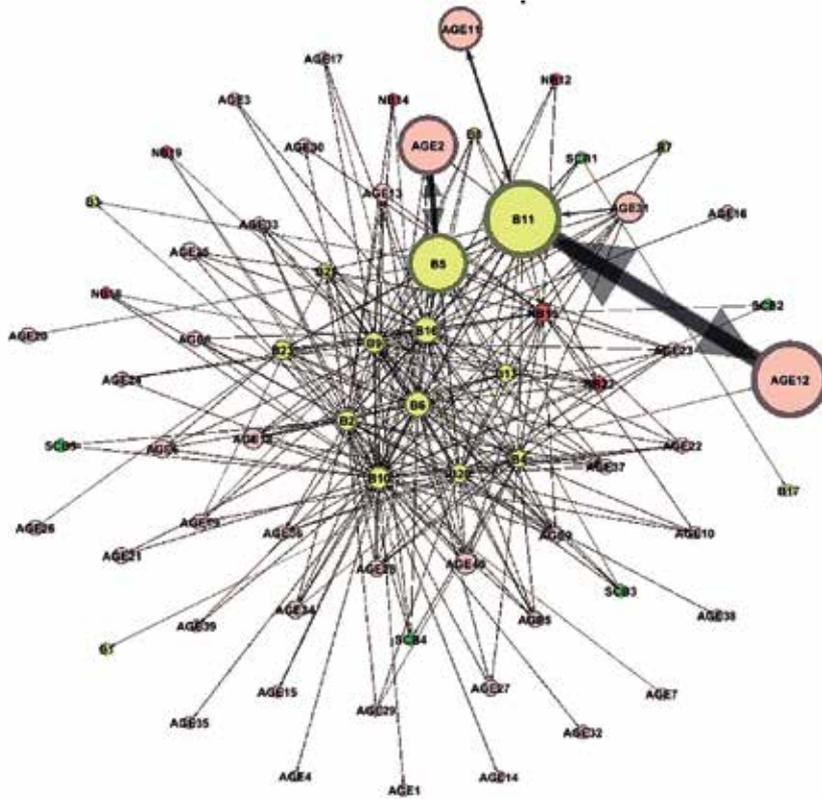
Mercado de derivados

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.

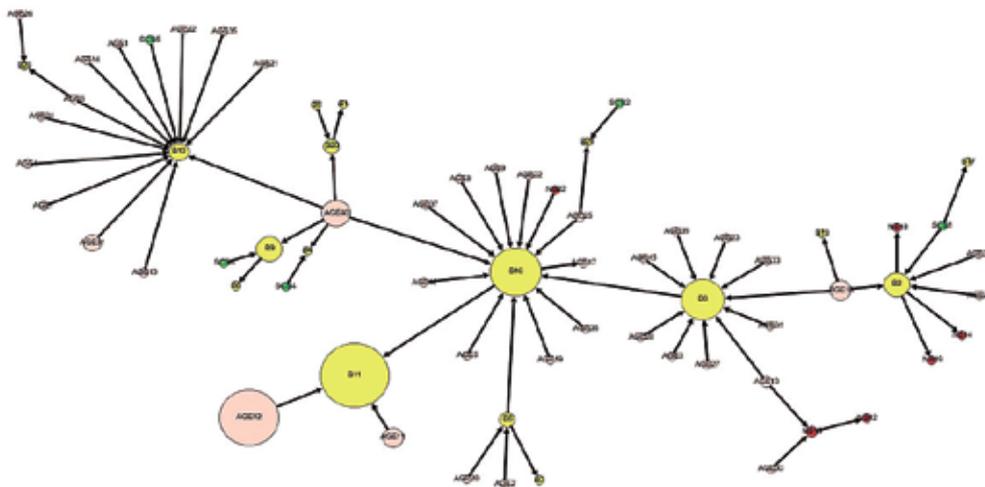
La revisión del grafo MST del mercado *forward* peso/dólar (ver Gráfico 4) permite notar la importancia que tienen los nodos B16, B6, B2 y B10. Entre otros, se observa que cada

Gráfico 3. Grafo mercado forward peso/dólar



Fuente: cálculos de los autores

Gráfico 4. Grafo MST mercado forward peso/dólar



Fuente: cálculos de los autores

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.

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 evidencia 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 no-

dos B10 y B16, de los cuales se constituye en una especie de conector o "puente".

Estadísticas básicas de las redes analizadas

Como complemento al análisis topológico anterior, la Tabla 3 presenta algunas estadísticas básicas de las redes objeto de estudio. Con fines comparativos también se muestran estadísticas asociadas a la red que resulta de agregar ambos mercados (*spot* + *forward*). 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.

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

Tabla 3. Estadísticas de las redes analizadas

Estadísticas básicas	Spot	forward	Agregado (spot + forward)
Contribución al valor de las transacciones (<i>promedio diario</i>)	40%	60%	100%
Número de participantes	46	68	88
Grado promedio por nodo (<i>averagedegree</i>)	31	8	19
Densidad (<i>conexiones observadas / conexiones posibles</i>)	69%	10%	22%
Exponente de la distribución <i>power-law</i> de los montos negociados	2,7	2,1	2,1
Exponente de la distribución <i>power-law</i> del número de conexiones	2,5	2,4	2,0

Fuente: cálculo de los autores

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

el indicador de densidad, donde el mercado *forward* posee solo el 10% del total de conexiones posibles, mientras que el mercado *spot* el 69%.

Al estimar el exponente asociado en cada una de las redes³ 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 valor de montos transados. Estos mismos resultados se obtuvieron al analizar la distribución de la red por número de conexiones.

En otras palabras, los resultados anteriores permiten caracterizar el mercado cambiario *spot* y *forward* peso/dólar como una estructura de centro y periferia, con pocos participantes centrales y muchos periféricos. Esto es particularmente importante en la medida de 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 enfocar esfuerzos en temas de seguimiento a entidades así como labores de regulación prudencial y supervisión, concentrándose en los participantes catalogados como centrales.

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. 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, que constan de centros y periferias bien definidos cuyas distribuciones (i.e. valor y número de conexiones) son de tipo *power-law*, por lo que esta red puede ser convenientemente descrita como robusta ante choques aleatorios, pero frágil ante ataques determinísticos. Estos resultados son consistentes con lo encontrado por Haldane (2009) para la red financiera internacional, así como León y Berdsen (2014), León y Pérez (2014b) y Cepeda (2008) para el caso colombiano.

De este análisis se pueden destacar los siguientes hallazgos: (i) los bancos son los participantes más centrales de la red, en especial en el mercado *forward* donde 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 y; (iii) 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* sirven de intermediario a ciertas entidades (i.e. corporaciones financieras y compañías de financiamiento) ante los bancos 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.

Referencias

- Banco de la República (2013). *Reporte de Sistemas de Pago*. Banco de la República. Recuperado: <http://www.banrep.gov.co/publicaciones-buscador/2041>
- Barabási, A. L. (2003). *Linked*. New York: Plume.
- Barabási, A. L. (2014). *Network Science book*. In-press.
- Barndorff-nielsen, O. E. & Cox, D.R. (1996). Prediction and asymptotics. *Bernoulli*, vol. 2, no 4, p. 319-340.
- Bjelland, J.; Canright, G. & Engo-Mønsen, K. (2008). Web link analysis: estimating document's importance from its context. *Teletronikk*, No.1.
- Bonanno, G.; Caldarelli, G.; Lillo, F. & Mantegna, R.N. (2003). Topology of correlation-based minimal spanning trees in real and model markets. *Physical Review E*, No.68.
- Braunstein, L.A.; Wu, Z.; Chen, Y.; Buldyrev, S.V.; Kalisky, T.; Sreenivasan, S.; Cohen, R.; López, E.; Havlin, S. & Stanley, E. (2007). Optimal path and minimal spanning trees in random weighted networks. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol.17, No.7.
- Cárdenas, M (2009). *Introducción a la economía colombiana (2ed)*. Bogotá: Alfaomega. 2009.
- Cepeda, F.H. (2008). 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.
- Clauset, A.; Shalizi, C.R. & Newman, M.E.J. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, No.4, Vol.51.
- Craig, B.; von Peter, G. (2010). Interbank tiering and money center banks. Bank for International Settlements (BIS), Working Paper series, No.322.
- Gilmore, C.G.; Lucey, B.M. & Boscia, M.W. (2010). Comovements in government bond markets: a minimum spanning tree analysis. *Physica A*, No.389.
- Haldane, A.G. (2009). Rethinking the financial network. *Speech delivered at the Financial Student Association (Amsterdam, Netherlands)*. April.
- Hawkesby, C.; Marsh, I.W. & Stevens, I. (2005). Comovements in the prices of securities issued by large complex financial institutions. *Working Paper No.256*. Bank of England.
- Kim, D.H. y Jeong, H. (2004). Scale-free spanning trees of complex networks. *Journal of the Korean Physical Society*, Vol.44, No.3.
- Kim, D.H.; Son, S.W.; Ahn, Y.-Y.; Kim, P.J.; Eom, Y.-H. & Jeong, H. (2005). Underlying scale-free trees in complex networks. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, No.157.
- Kleinberg, J.M. (1998). Authoritative sources in a hyperlinked environment. *Proceedings of the ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*.
- León, C. & Berndsen, R. (2014). Rethinking financial stability: Challenges arising from financial networks' modular scale-free architecture. *Journal of Financial Stability*, Vol. 15 (2014).
- León, C. & Pérez, J. (2014). Assessing financial market infrastructures' systemic importance with authority and hub centrality. *Journal of Financial Market Infrastructures*, Vol.2, No.3, pp.67-87.
- León, C. & Pérez, J. (2014b). Caracterización y comparación del mercado OTC de valores en Colombia, *Revista*

de Economía Institucional-Universidad Externado de Colombia, Vol. 16 No 31. (2014).

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