

# Una nueva perspectiva del contagio financiero energético en Colombia: evidencia del análisis de ondas y dinámicas de comovimientos\*

*A New Perspective on Energy Financial Contagion in Colombia: Evidence from Wavelet Analysis and Co-Movements Dynamics*

Luis Ángel Meneses Cerón 

Universidad Cooperativa de Colombia.  
Popayán - Colombia, [luis.menesesc@campusucc.edu.co](mailto:luis.menesesc@campusucc.edu.co)

Jorge Eduardo Orozco Álvarez 

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca  
Popayán - Colombia, [jorge.orozco.a@uniautonomia.edu.co](mailto:jorge.orozco.a@uniautonomia.edu.co)

Juan Camilo Mosquera Muñoz 

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca  
Popayán - Colombia, [juan.mosquera.m@uniautonomia.edu.co](mailto:juan.mosquera.m@uniautonomia.edu.co)

Víctor Manuel Vélez Rivera 

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca  
Popayán - Colombia, [victor.velez.r@uniautonomia.edu.co](mailto:victor.velez.r@uniautonomia.edu.co)

## Cómo citar / How to cite

Meneses Cerón, L. A., Orozco Álvarez, J. E., Mosquera Muñoz, J. C., y Vélez Rivera, V. M. (2024). Una nueva perspectiva del contagio financiero energético en Colombia: evidencia del análisis de ondas y dinámicas de comovimientos. *Revista CEA*, 10(22), e2578. <https://doi.org/10.22430/24223182.2578>

Recibido: 21 de noviembre de 2022  
Aceptado: 20 de noviembre de 2023

---

\* El artículo se deriva del proyecto de investigación: *Riesgo sistémico aplicado a los mercados emergentes*, financiado por la Universidad Cooperativa de Colombia, campus Popayán, y desarrollado en convenio con el semillero de investigación en economía y finanzas de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.



## Resumen

**Objetivo:** examinar la existencia de contagio financiero energético desde los principales indicadores de desempeño energético: petróleo, gas natural y carbón sobre los precios *spot* de energía en Colombia.

**Diseño/metodología:** la metodología empleada en este estudio fue de tipo correlacional, con un enfoque cuantitativo. Se emplearon datos diarios de febrero de 2011 a diciembre de 2018, excluyendo la crisis financiera de 2008 y la pandemia por COVID-19. Los datos provienen de Refinitiv y XM. Se aplicó el análisis de ondas (*wavelets analysis*) y dinámica de comovimientos (*co-movimientos dynamics*). Además, se utilizó la correlación cruzada para el análisis de contagio financiero entre los indicadores de desempeño energético y los precios *spot* de energía.

**Resultados:** la investigación demostró que existen correlaciones significativas a largo plazo entre los indicadores de desempeño energético y los precios *spot* de energía. Además, determinó la presencia de contagio del gas natural y del petróleo Brent sobre los precios *spot* de energía durante periodos de crisis. Con respecto al carbón, no hay evidencia clara de contagio. Estos hallazgos son relevantes para comprender cómo los cambios en el mercado global de la energía pueden afectar los precios de esta a largo plazo en una economía emergente como la colombiana.

**Conclusiones:** el contagio financiero energético impacta la economía global, especialmente en mercados emergentes dependientes de energía. Este estudio resalta la necesidad de comprender y mitigar riesgos en el mercado energético, ofreciendo información clave para empresas, inversores y formuladores de políticas.

**Originalidad:** se emplearon métodos avanzados para analizar el impacto de los precios internacionales de combustibles en el mercado energético colombiano, identificando periodos de contagio y subrayando la vulnerabilidad de economías emergentes frente a cambios en el mercado global de la energía.

**Palabras clave:** Contagio financiero energético, comovimientos, análisis de ondas, precio *spot* de energía, mercado global de energía.

**Clasificación JEL:** G00, G1, G15

### Highlights

- El contagio financiero energético es un fenómeno que puede tener un impacto significativo en la economía global, particularmente en mercados emergentes, que a menudo, poseen economías menos diversificadas y altamente dependientes de exportaciones o importaciones de energía.
- El análisis de *wavelets* permite abordar el contagio financiero energético en diferentes escalas temporales, proporcionando una visión detallada y dinámica de la transmisión de volatilidad en los mercados financieros.
- Los eventos inesperados en el mercado del petróleo, como bruscas caídas de precios, pueden generar impactos significativos en las tasas de cambio. Esto repercute en las empresas con transacciones internacionales, teniendo consecuencias directas en la economía en su conjunto.
- Comprender la conexión entre el rendimiento energético y los precios *spot* de energía, proporciona datos cruciales para formuladores de políticas y participantes del mercado financiero y energético en una economía emergente como la colombiana.

## Abstract

**Purpose:** The aim of this study was to examine the existence of energy contagion from the most important energy indicators—oil, natural gas, and coal—to spot electricity prices in Colombia.

**Design/Methodology:** The methodology employed here was correlational, with a quantitative approach. Daily data from February 2011 to December 2018 were used, excluding the 2008 financial crisis and the Covid-19 pandemic. The data were sourced from Refinitiv and XM. Wavelet analysis and co-movement dynamics were applied. Additionally, cross-correlation was used to analyze financial contagion from energy indicators to spot electricity prices.

**Findings:** This study demonstrated that there are significant long-term correlations between energy indicators and spot electricity prices. It also determined the presence of energy contagion from natural gas and Brent crude oil to spot electricity prices during crisis periods. Regarding coal, there is no clear evidence of contagion. These findings are relevant for understanding how changes in the global energy market can affect electricity prices in the long term in an emerging economy like Colombia.

**Conclusions:** Energy contagion impacts the global economy, especially in energy-dependent emerging markets. This study emphasizes the need to understand and mitigate risks in the energy market, offering key information to companies, investors, and policymakers.

**Originality:** Advanced methods were employed here to analyze the impact of international fuel prices on the Colombian electricity market, identifying contagion periods and highlighting the vulnerability of emerging economies to changes in the global energy market.

**Keywords:** Energy financial contagion, co-movements, wavelet analysis, energy spot price, global energy market.

**JEL classification:** G00, G1, G15

### Highlights

- Energy contagion is a financial phenomenon that can have a significant impact on the global economy; in particular, on emerging markets that usually have less diversified economies and are highly dependent on energy exports or imports.
- Wavelet analysis can be used to study financial contagion at different time scales, providing a detailed and dynamic picture of the transmission of volatility in financial markets.
- Unexpected events in the oil market, such as sharp falls in prices, can have significant impacts on currency exchange rates. This has consequences for companies that conduct international transactions and the economy as a whole.
- Understanding the connection between energy indicators and spot electricity prices provides crucial information for policymakers and participants in the financial and energy market in an emerging economy such as Colombia.

## 1. INTRODUCCIÓN

La creciente importancia del precio del petróleo en la economía ha llevado a los estudios sobre contagio financiero a desviar su atención en analizar las correlaciones entre el desempeño energético y los mercados de valores (Wen et al., 2012). De acuerdo con Kilian y Vigfusson (2011), el contagio financiero energético es un fenómeno que puede tener un impacto significativo en la economía

mundial, y es particularmente relevante en mercados emergentes. Estos países a menudo tienen economías menos diversificadas y son altamente dependientes de las exportaciones o importaciones de energía, lo que los hace especialmente vulnerables a las fluctuaciones en los precios de los productos energéticos y a los efectos de la transmisión de volatilidad financiera.

Inicialmente, los estudios sobre contagio energético se centraron en el petróleo como indicador de desempeño energético y en la dinámica de comovimientos (*co-movements dynamics*). En esta línea, se destacan los estudios de Ghorbel y Boujelbene (2013); Pan et al. (2015); Guesmi et al. (2018); Mahadeo et al. (2019) y Zhao et al. (2021), quienes analizan el contagio del petróleo sobre los índices bursátiles de países de Europa, Norte América y Asia, así como de países emergentes. Posteriormente, los estudios abordan otros indicadores de desempeño energético como son los estudios de Li et al. (2019); Algieri y Leccadito (2017) y Hergety (2012), quienes utilizan *commodities* como etanol, carbón, cobre y otros metales como indicadores de desempeño energético para medir contagio.

Posteriormente, la literatura muestra la aplicación de análisis de ondas (*wavelet analysis*) como otro método para medir contagio del petróleo sobre mercados financieros. En esta línea, se destacan los estudios de Reboredo y Rivera-Castro (2014); Boubaker y Raza (2017); Lin et al. (2019) y Hamdi et al. (2019), quienes examinan contagio en países de Europa, Norte América, Asia y países emergentes. No obstante, se debe destacar que en la literatura actual no se han identificado estudios que aborden el análisis de la relación entre otros indicadores de desempeño energético y los mercados financieros utilizando metodologías *wavelet* combinada con técnicas de análisis dinámico. Estas brechas en la investigación señalan áreas propicias para futuros estudios que podrían ofrecer una visión más minuciosa y en constante evolución de la interacción entre los mercados de energía y los mercados financieros. En este escenario, el presente trabajo se enfoca en desarrollar una nueva perspectiva de estudio que se centra en la comprensión integral de la propagación de perturbaciones entre los indicadores de desempeño energético y los precios de *spot* de energía (Díaz et al., 2019). Este punto de vista busca vincular el análisis de los movimientos conjuntos dinámicos con el análisis *wavelet*, ofreciendo así una contribución novedosa al campo de la investigación financiera y energética.

En este contexto, el contagio financiero energético puede tener un impacto significativo en los mercados emergentes, por lo cual es importante entender los factores que contribuyen a este fenómeno. De esta forma, la presente investigación aporta a la literatura al estudiar esta nueva perspectiva de contagio energético en los países latinoamericanos utilizando como indicadores de desempeño energético los precios futuros del petróleo crudo brent y WTI (West Texas Intermediate), gas natural (GN) y carbón. En primer lugar, se identifican los periodos de calma y crisis utilizando dos métodos de algoritmos basados en reglas, uno bajo el criterio de duración del estado (Pagan y Sossounov, 2003), y el otro bajo el criterio de la magnitud de los cambios de los precios (Lunde y Timmermann, 2004). En segundo lugar, se descomponen los efectos de factores fundamentales de los precios *spot* de energía. En tercer lugar, se utilizan pruebas para medir contagio desde el enfoque de dinámica de comovimientos y análisis *wavelet*. Finalmente, se aborda una discusión sobre los resultados bajo estos dos enfoques.

Ahora bien, en el mercado energético es esencial tener en cuenta la diversidad de horizontes de negocio de los inversores, los cuales generan flujos de información dinámica en distintos marcos temporales. Esto, a su vez, contribuye a la variabilidad observada en la actividad de dicho mercado.

La comprensión precisa de la relación dinámica entre diferentes activos energéticos puede lograrse de manera efectiva al descomponer los precios del mercado en diversas escalas temporales. De ahí que, el enfoque de dinámicas de comovimientos y el análisis de *wavelet* emergen como herramientas adecuadas para desglosar los datos en múltiples escalas temporales sin imponer restricciones en la estructura de los rendimientos subyacentes (Roy et al., 2023).

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: la sección 2 proporciona una visión general de la literatura financiera relacionada. Luego, en la sección 3, se describen los datos utilizados. La sección 4 corresponde a la metodología, donde se presenta el modelamiento del precio *spot* de energía y los retornos internacionales de desempeño energético, se explican las herramientas econométricas utilizadas para medir el grado de interdependencia entre el mercado energético colombiano y los mercados internacionales de los combustibles de interés, y las estrategias para identificar las condiciones de mercado de calma y crisis. Después, en la sección 5, se exhiben los resultados. Finalmente, las conclusiones se desarrollan en la sección 6.

## 2. MARCO TEÓRICO O REFERENCIAL

La globalización ha permitido la comunicación e interdependencia entre los mercados de diferentes países (Centeno et al., 2015; Briones Pinargote, 2023), dando como resultado vínculos que han sido estudiados con la finalidad de explorar si en esta relación hay evidencia de contagio financiero. Pericoli y Sbracia (2003) revisan cinco definiciones de contagio adoptado por la literatura y las medidas correspondientes utilizadas en trabajos empíricos, y resaltan que el contagio sugiere un cambio en el mecanismo de transmisión durante las crisis. En esta misma línea, Dornbusch et al. (2000) y Kaminsky y Reinhart (2000) hacen una distinción entre dos definiciones de contagio: contagio basado en fundamentos (o contagio indirecto) y contagio puro (o directo). Calvo et al. (1996) definen contagio basado en fundamentos como la transmisión de un choque entre países y/o mercados como resultado de vínculos reales y la integración de mercados financieros en periodos de crisis y no crisis. Eichengreen et al. (1999) y Bae et al. (2003) definen contagio puro como la transmisión en exceso de un choque entre países de lo que debería esperarse después de controlar factores fundamentales. En este orden de ideas, la definición de contagio funciona bien en la medida de poder identificar la crisis financiera y la estimación del exceso de transmisión. Pericoli y Sbracia (2003) señalan que crisis financiera es una fuerte caída en el índice del mercado de valores o un aumento en la volatilidad de los precios de los activos financieros, y Samarakoon (2011) señala que un aumento en la correlación en un periodo de crisis en relación con un periodo de calma se interpreta como contagio. Sin embargo, Forbes y Rigobon (2002) argumentan que estas correlaciones están sesgadas por el aumento de la volatilidad del mercado durante los periodos de crisis, generando heteroscedasticidad. De esta forma, los autores proponen un coeficiente de correlación ajustado y define el contagio financiero como un aumento significativo en las correlaciones entre mercados después de un choque.

Los estudios de contagio provienen de Sharpe (1964) y Grubel y Fadner (1971), y existe una variedad de metodologías para evaluar la evidencia de contagio. A partir del modelo de correlación ajustado propuesto por Forbes y Rigobon, (2002), autores como Fry-McKibbin et al. (2014) proponen una prueba de contagio de correlación lineal ajustada, evaluando la significancia para un cambio en la correlación ajustada en periodos de crisis en relación con periodos de calma. Fry et al. (2010)

proponen una prueba de contagio de cosesgo evaluando las diferencias entre las correlaciones del mercado en periodo de calma y crisis en función de los cambios en el sesgo. Hay evidencia de contagio de dos maneras, cuando el comportamiento medio de un mercado afecta la volatilidad de otro y cuando la volatilidad de un mercado afecta el comportamiento medio de otro. Fry-McKibbin y Hsiao (2018) proponen una prueba de contagio de covolatilidad, evaluando las diferencias entre las correlaciones del mercado en periodo de calma y crisis en función de los cambios en la volatilidad conjunta. Hay evidencia de contagio cuando la volatilidad de un mercado afecta la volatilidad de otro.

Otros estudios más recientes sobre contagio financiero han desviado su atención en analizar las correlaciones entre el desempeño energético y los mercados de valores. Wen et al. (2012) mencionan que la creciente importancia del precio del petróleo en la economía se ha convertido como indicador de desempeño energético y aplican cópulas variables en el tiempo para analizar el efecto de contagio energético entre el precio del petróleo WTI y el índice de la Bolsa de Valores de China. Fang y Egan (2018) estudian los efectos de contagio energético entre el petróleo crudo Brent y los mercados de valores de China. Zhao et al. (2021) estudian los efectos de contagio energético y *bubbles* entre los precios de petróleo crudo (internacional y de China) y los mercados de valores de China. Otros estudios, como el de Pan et al. (2015) extienden la prueba de *model-free* de Hong et al. (2007) para analizar contagio entre el petróleo crudo (Brent y WTI) y el índice S&P 500 (USA), FTS 100 (UK) y el DAX (Alemania). Guesmi et al. (2018) prueban la existencia de contagio energético entre las fluctuaciones de los precios del petróleo y los mercados de valores de la Unión Monetaria Europea (EMU), Asia-Pacífico (AP), No Miembros de la Unión Monetaria Europea (NEMU) y Norte América (NA).

En esta misma línea de contagio energético hay estudios con aplicación a mercados emergentes. Ghorbel y Boujelbene (2013) emplean modelos de clase GARCH (Generalized AutoRegressive Conditional Heteroscedasticity) para probar la existencia de contagio energético entre la volatilidad de los precios de petróleo crudo y los mercados de valores de los BRIC (Brasil, Rusia, India y China). Mahadeo et al. (2019) analizan el efecto de contagio energético entre el petróleo crudo Brent y la tasa de cambio y del mercado de valores de Trinidad y Tobago a través de las pruebas de contagio de correlación lineal ajustada, cosesgo y covolatilidad. Además, las pruebas de contagio energético no se restringen a analizar las correlaciones entre los precios del petróleo como indicador de desempeño energético y los mercados financieros. Li et al. (2019) mencionan que el carbón ha dominado el suministro de energía en China como un sustituto del petróleo crudo y podría estar relacionado con otros mercados. Hay otros estudios que evalúan la presencia de contagio entre otros indicadores de desempeño energético y los mercados de valores. Estudios como el de Algieri y Leccadito (2017) analizan contagio entre los precios de futuro del petróleo crudo WTI, etanol como *proxy* de biocombustible, índices para metales y comida y el índice S&P 500 (US). Hergety (2012) estudia contagio entre los precios de las materias primas como petróleo, cobre y café, variables macroeconómicas y factores externos, y los mercados de valores de Brasil, México, Chile y Perú.

La literatura sobre contagio no se limita a analizar el aumento significativo en las correlaciones entre mercados después de un choque a través de pruebas de comovimientos. Hay estudios como el de Ghosh et al. (2020) y Shrestha et al. (2018) que analizan la dinámica evolutiva inherente de los mercados financieros y energéticos a través de análisis *wavelet* para estimar la correlación condicional entre los mercados en diferentes escalas de tiempo. El análisis *wavelet* es una herramienta de modelado cuantitativo que permite realizar estudios de resolución múltiple de series

temporales no estacionarias y la posibilidad de separar nuevas relaciones de series de tiempo financieras teniendo en cuenta las dimensiones de tiempo y frecuencia (Ranta, 2013). Al respecto, Ftiti y Hadhri (2019) proporcionaron evidencia sólida de que la utilización del enfoque de *wavelet* arroja resultados significativamente más robustos en contraposición a las convencionales técnicas de escala de tiempo.

Entre los estudios pioneros enfocados en examinar los efectos de contagio entre mercados financieros a través de análisis de *wavelet* se destaca el de Gallegati (2012), quien prueba existencia de contagio entre los índices de mercado de los países del G7, más Brasil y Hong Kong. Benhmad (2013) muestra las dinámicas de contagio entre el índice de S&P 500 (US) y los índices de mercado de los países del G7, sin incluir Italia, más otros países como Suiza, Australia, India, Corea del Sur, Rusia y China. Ambos estudios se enfocan en la crisis de las hipotecas de alto riesgo de 2007. Entre los estudios más recientes, están el de Cărbăușu et al. (2018), quienes investigan cómo y cuándo ocurre contagio entre diez mercados financieros del centro y este europeo, y mercados financieros del oeste europeo y Estados Unidos. Zhou et al. (2018) analizan los efectos de contagio entre los mercados financieros de los países de Asia, Europa y América. Dash y Maitra (2019), por su parte, estudian el efecto de contagio de sentimiento entre los mercados desarrollados y los mercados emergentes.

También se emplea análisis de *wavelet* para estudiar el contagio energético. Estudios como Reboredo y Rivera-Castro (2013) analizan la relación entre los precios del petróleo crudo y la tasa de cambio por dólar americano y, posteriormente, Reboredo y Rivera-Castro (2014) examinan la relación entre el petróleo crudo y los mercados financieros de Europa y Estados Unidos; ambos estudios se analizan durante la crisis financiera global. Estudios más recientes se encuentran en Boubaker y Raza (2017), quienes examinan los efectos secundarios y *shocks* entre precios de petróleo crudo y los mercados financieros de los países del BRICS durante la crisis financiera global de 2007–2009. Lin et al. (2019) examinan contagio entre el petróleo crudo Brent, el mercado de oro de Londres y los mercados financieros de China y países europeos. Hamdi et al. (2019) examinan el grado de volatilidad entre el precio del petróleo y los índices sectoriales en los países del Consejo de Cooperación del Golfo (GCC) utilizando análisis de causalidad de Granger y cuantiles no lineales basados en *wavelet* sin ruido. Con respecto a estudios de análisis de la relación entre otros indicadores de desempeño energético y mercados financieros empleando análisis de *wavelet*, se destaca el estudio de Lahmiri et al. (2017), quienes examinan la relación entre catorce mercados financieros, dos tipos de tasas de cambio y doce mercados de materias primas, durante y después de la crisis financiera. Aunque este estudio no se enfoca en el contagio energético, de forma indirecta los autores analizan contagio entre petróleo crudo, gas natural, otros metales, materias primas alimenticias y los mercados financieros de Estados Unidos, y países de Europa y Asia. En un estudio más reciente, Ghosh et al. (2020) analizan la dinámica de los comovimientos y la correlación dinámica entre el índice energético Bombay Stock Exchange (BSE), petróleo crudo y gas natural, y el índice DJIA y NIFTY a través de una modelación fractal, análisis de *wavelet* y DCC-GARCH. Sin embargo, este estudio tampoco evalúa específicamente contagio.

Otros estudios relevantes, examinan la interacción entre los precios del petróleo y los mercados financieros utilizando análisis de *wavelets*. Belhassine y Karamti (2021) se centran en la interdependencia entre mercados petroleros y bursátiles, destacando asimetrías a largo plazo y oportunidades de cobertura en India y China. Zhu et al. (2022) se enfocan en los efectos asimétricos de los precios del petróleo en los mercados BRICS con énfasis en el corto plazo y la influencia de la

volatilidad financiera. Mensi et al. (2023) abordan los comovimientos globales, respaldando la idea de «*recoupling*» durante crisis, con persistente dependencia y mayor riesgo de cartera. Estos enfoques diversos enriquecen la comprensión de cómo estos factores impactan en los mercados, siendo relevantes para inversores y formuladores de políticas en la gestión de riesgos y decisiones estratégicas financieras.

A partir de lo anterior, es claro que, actualmente, existe un creciente interés en la investigación de cómo los indicadores de rendimiento energético impactan en los mercados financieros (Boako et al., 2020) utilizando diversas metodologías. Sin embargo, se ha notado una falta de estudios que apliquen el análisis de *wavelet* para examinar el contagio energético, especialmente más allá del petróleo crudo. Además, la región latinoamericana ha sido poco explorada en este contexto y no se han realizado investigaciones sobre el contagio entre los indicadores de rendimiento energético y los precios del mercado de energía. En respuesta a esta brecha, nuestro estudio se enfoca en analizar el contagio energético en los precios de energía en Colombia, abordando el petróleo crudo Brent y WTI, el gas natural y el carbón mediante pruebas de comovimientos y análisis de *wavelet*, identificando periodos de crisis con dos estrategias empíricas de vanguardia.

### 3. METODOLOGÍA

En este estudio, los datos empleados están en frecuencia diaria desde el 23 de febrero de 2011 hasta el 31 de diciembre de 2018. La elección del período obedece a dos motivos fundamentales. En primer lugar, se excluye deliberadamente el lapso correspondiente a la gran crisis financiera de 2008, ya que este estudio se centra en otro objeto de análisis y dicha crisis ha sido exhaustivamente abordada en investigaciones previas. En segundo lugar, se prescinde del período que abarca la pandemia por COVID-19, dado que este se caracterizó por una serie de movimientos extremos en un amplio espectro de variables, englobando no solo aspectos financieros, sino también económicos, sociales y de salud, los cuales trascienden el ámbito de estudio del contagio financiero que se pretende analizar en este trabajo. Los datos provienen de las plataformas Refinitiv Financial Solutions y XM. Refinitiv se erige como una plataforma líder gracias a su exhaustiva cobertura de datos financieros en tiempo real, reconocida por su notable precisión y sus avanzadas herramientas de análisis que le otorgan una posición preferente entre los inversores con una exigente búsqueda de información precisa y potentes capacidades analíticas. Mientras tanto, XM proporciona acceso a datos esenciales relacionados la administración del mercado de energía mayorista colombiano. Esta amplia gama de información resulta sumamente atractiva para quienes buscan ejecutar operaciones en tiempo real y gestionar de manera efectiva su exposición al riesgo en los mercados financieros y energéticos.

El análisis de *wavelets* aplicado en la presente investigación es una técnica ampliamente empleada en el procesamiento de señales y análisis de datos para investigar la relación entre dos variables, particularmente cuando se trata de datos con estructuras complejas en los dominios del tiempo o la frecuencia.

Las funciones denominadas «*wavelets*», si bien guardan cierta similitud con las funciones de base empleadas en técnicas como el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) o la transformada de Fourier, están especialmente diseñadas para el análisis de señales no estacionarias con características locales en lugar de globales. Estas funciones matemáticas se

caracterizan por su capacidad de localización tanto en el dominio temporal como en el dominio de la frecuencia, lo que las convierte en herramientas idóneas para detectar cambios locales en una señal.

De manera complementaria, dentro de esta metodología se utiliza la técnica de correlación cruzada, que posibilita la identificación de patrones de relación entre dos señales en diferentes escalas temporales y frecuenciales. Este enfoque resulta particularmente relevante en el contexto de análisis propuesto, ya que el fenómeno de contagio financiero es inherentemente local, manifestándose en momentos específicos de crisis financiera y abarcando diversas escalas o frecuencias. Tal como se ha demostrado en los resultados, se observan correlaciones significativas tanto en escalas temporales pequeñas como en escalas mayores.

La Tabla 1 proporciona las definiciones de las series y las fuentes. Se tomaron series de desempeño del mercado energético colombiano, tipo de cambio, medida de actividad económica extranjera y rendimiento del mercado de energía. Además, se usaron variables para descomponer los efectos de factores fundamentales de los precios *spot* de energía. Como indicador de desempeño del mercado energético, se trabajó con tres referencias: los precios de cierre en dólares para los futuros del petróleo crudo (brent y WTI), gas natural y carbón. Como indicador de tipo de cambio se utiliza el tipo de cambio real efectivo (REER) de Colombia. Como medida de actividad económica extranjera se emplea la tasa sombra de corto plazo del mercado financiero de EE. UU. (SSR\_US). Como indicador de rendimiento del mercado de energía se utilizan los precios *spot* de energía (P\_spot) nacionales. Como variables de descomposición de efectos de factores fundamentales de los precios *spot* de energía se toma el exceso de demanda medido por la demanda total predicha para el día  $t$  sobre la capacidad instalada de las hidroeléctricas (aportes de los ríos por kw/h). Además, se sirve de un indicador que muestra si hubo El Niño en el día  $t$ . Finalmente, se asumió para los datos faltantes, debido a vacaciones u otras razones, el valor inmediatamente anterior.

Como se ha afirmado anteriormente, cuando se habla de contagio, se hace referencia a la aparición de canales de transmisión, previamente no existentes, que refuerzan la relación de un par de mercados en momentos de crisis comparado con un escenario de calma. Esto implica que se deben eliminar los canales de transmisión tradicionales, es decir, los que priman en escenarios de calma. Económicamente, esto se logra al modelar la evolución temporal de cada una de las variables de interés mediante una regresión bien especificada, y acto seguido, extraer el residuo, que es la parte no explicada por el modelo. Se espera que estos residuales, en este estudio llamados pseudoretornos, reflejen los canales no tradicionales, en caso de que existan.

Por otro lado, posteriormente se explican las herramientas econométricas utilizadas para medir el grado de interdependencia entre el mercado energético colombiano y los mercados internacionales de los combustibles de interés. Habrá evidencia en favor de la hipótesis de contagio en caso de que estas medidas de interdependencia aumenten significativamente en momentos de crisis. Por tal razón, en la sección tercera de la metodología se explica la manera en que identificamos los momentos de calma y crisis. Con todo esto, el contraste de contagio se reducirá a una gráfica que contenga una serie que refleje el grado de interdependencia a través del tiempo y que, además, indique qué momentos son de calma y cuáles de crisis. Se concluirá que existe contagio cuando, en los momentos de crisis, la serie mencionada alcance máximos locales.

## Obtención de pseudoretornos

### *Modelamiento del precio spot*

De acuerdo con XM (2020) «en condiciones normales de operación, [el precio *Spot*] corresponde al mayor precio de oferta de las unidades con despacho centralizado que han sido programadas para generar en el despacho ideal y que no presentan inflexibilidad» (párr. 1). Esto revela que los precios ofertados por cada una de las firmas despachadas son el componente principal del precio de mercado. De manera simultánea, como se muestran en Garcia y Pérez-Libreros (2019), el precio que cada firma-planta oferta está esencialmente determinado por sus costes marginales y la posición neta que tenga en el mercado de contratos. Con base en esto, aquí se propone una forma funcional que relaciona al precio *spot* observado a los factores fundamentales que determinan los costes marginales. Dado que en Colombia la matriz energética está mayoritariamente compuesta por plantas hidroeléctricas y térmicas. Se escogen los siguientes factores:

- Capacidad instalada de las firmas hidroeléctricas, aproximada mediante el aporte de los ríos en kWh hora ( $O_t$ ).
- La demanda total predicha ( $D_t$ ).
- Precio del gas: precio internacional de los futuros del gas natural en US\$/BTU ( $gas_t$ ).
- Precio del carbón: precio internacional de los futuros del carbón en US\$/Ton ( $carbon_t$ ).
- Precio del petróleo: precio internacional de los futuros del petróleo crudo en US\$/Bar ( $brent_t$ ).
- Tipo de cambio COP\$/US: tasa representativa del mercado colombiano de divisas en pesos colombianos por dólar estadounidense ( $trm_t$ ).

Por otro lado, una forma funcional que posiblemente dé cuenta de la evolución temporal del precio del mercado es la siguiente (ver ecuación 1):

$$Spot = \alpha + \beta_1 \ln D^* + \beta_2 \ln D^* \times \ln gas + \beta_3 \ln D^* \times \ln carbon + \beta_4 \ln D^* \times \ln brent + \epsilon \quad (1)$$

Donde  $D^*$  es igual a la razón entre  $D_t$  y  $O_t$  ( $\frac{D_t}{O_t}$ ). Esta forma funcional captura la característica principal de la matriz energética de Colombia. Esta matriz es hidrodominada, por lo que el factor principal que determina el precio es el exceso de la demanda frente a la capacidad instalada de las hidroeléctricas en conjunto. Cuando esta razón es baja, son los costes marginales de estas últimas los que esencialmente determinan el precio. Pero, a medida que la razón empieza a aumentar, esto es, cuanto mayor sea la demanda residual que cubran las plantas térmicas, los precios de los insumos de estas ganan relevancia. Todo lo anterior se captura al interactuar estos precios con el exceso de demanda. Por otra parte, la especificación se mejora al incluir en el modelo dos factores más:

- Una variable binaria que indique si en un momento  $t$  ocurre el fenómeno de El Niño.
- Rezagos del precio *spot*.

Como es bien conocido, el fenómeno de El Niño impacta notablemente los costes de producción de energía, pues la ocurrencia de este implica una caída discreta en la capacidad de generación de las firmas hidroeléctricas. Ciertamente, la variable  $D_t^*$ , parcialmente, captura este hecho. Sin embargo,

es posible que la ocurrencia de El Niño provoque un cambio estructural en la forma funcional del modelo. Esto se controla al incluir en el modelo la variable binaria mencionada. Por otra parte, es probable que existan componentes no observables de los costos marginales y que, además, exhiban persistencia, lo cual implica que  $\epsilon_t$  está autocorrelacionado. Esto se controla al incluir rezagos del precio en el modelo (ver ecuación 2):

$$\text{Spot}_t = \alpha + \beta_1 \ln E(D_t^* | \Gamma_{t-1}) + \beta_2 \ln E(D_t^* | \Gamma_{t-1}) \times \ln \text{gas}_{t-1} + \beta_3 \ln E(D_t^* | \Gamma_{t-1}) \times \ln \text{carbon}_{t-1} + \beta_4 \ln E(D_t^* | \Gamma_{t-1}) \times \ln \text{brent}_{t-1} + \sum_{j=1}^H \gamma_j I_j \text{Spot}_{t-j} + \epsilon_t \quad (2)$$

En esta ecuación se tiene en cuenta de manera explícita que el precio *spot* de un día *t* se determina con base en los precios ofertados por las diferentes firmas-plantas en el día anterior. En esta misma línea, cabe destacar que, al momento de ofertar un precio, las firmas observan  $E(D_t^* | \Gamma_{t-1})$ , la cual corresponde a la demanda predicha con base en el conjunto de información  $\Gamma$  disponible en  $t - 1$ .

En otra dirección, *H* representa el número máximo de rezagos a incluir en la ecuación y  $I_j$  es una variable indicadora que toma el valor de 1 cuando el rezago *j* efectivamente se incluye en el modelo. El conjunto de rezagos a incluir se escoge de tal manera que se minimice el criterio de información AIC. En específico, el procedimiento es el siguiente: i) se determina *H*; esto se hace al estimar de manera recursiva la ecuación de interés, cada vez incluyendo un rezago más, hasta que el modelo estimado produzca residuales no autocorrelacionados. En este caso en particular, *H* es igual a 40. Dado que este procedimiento produce un modelo sobreidentificado, pues muchos de los 40 rezagos no son significativos, con base en algoritmos genéticos se encuentra la combinación de estos que minimiza el AIC del modelo<sup>‡</sup>, es decir, la optimización con el algoritmo genético determina cuáles de los 40  $I_j$  toma el valor de 1 y cuáles el valor de 0. Es importante mencionar que, una vez se excluyen los rezagos redundantes, el modelo sigue generando residuales no autocorrelacionados. Una vez estimado el modelo, se extrae el término  $\epsilon_t$  para efectuar el análisis de contagio. De aquí en adelante,  $\epsilon_t$  se denomina como el pseudo retorno doméstico.

### Modelamiento de los retornos internacionales de desempeño energético

Siguiendo a Mahadeo et al. (2019), se asume que la evolución temporal de los retornos de los precios internacionales de los combustibles es explicada por sus propios rezagos y la tasa sombra de corto plazo del mercado financiero de EE. UU. (SSR) de la siguiente forma (ver ecuación 3):

$$r_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 r_{it-1} + \alpha_2 \text{SSR}_{t-1} + \omega_{it} \quad (3)$$

Donde  $r_{it}$  es el retorno internacional del combustible *i* (carbón, gas o petróleo) en el momento *t*. El término  $\omega_{it}$  (pseudo retorno internacional) es el que utiliza para efectuar el análisis de contagio.

<sup>†</sup> La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) realiza los cálculos y después suministra esta información a las diferentes plantas.

<sup>‡</sup> Aquí se utiliza evolución diferencial, un método específico dentro del conjunto de algoritmos genéticos. Ver, por ejemplo, Chakraborty (2008) para una exposición completa del método.

## Correlaciones locales

### Regresión local y correlación

De aquí en adelante,  $r_i$  y  $r_d$  representan el pseudo retorno internacional y doméstico, respectivamente, observados en los periodos  $t = 1, \dots, T$ . El objetivo es obtener una función lineal  $f_s(r_i)$ , que para un  $s$  fijo perteneciente al intervalo  $[1, T]$ , minimice la siguiente suma ponderada de residuales al cuadrado (ver ecuación 4):

$$S_s = \min_{f_s} \sum_t \theta(t-s) [f_s(r_i) - r_d]^2 \quad (4)$$

Donde  $\theta(\cdot)$  es la función de ponderación gaussiana de promedio móvil, la cual depende de la distancia, en término de periodos de tiempo, entre  $r_t$  y  $r_s$ . De esto se deduce que la función de regresión local toma la siguiente forma (ver ecuación 5):

$$\begin{aligned} f_s(r_i) &= Z_i \beta_s, & Z_i &= r_i - \bar{r}_1 \\ S_s &= \min_{\beta} \sum_t \theta [y - Z_i \beta]^2 \\ \frac{dS_s}{d\beta} &= - \sum_t 2\theta (y - z\beta) z = 0 \\ &\sum_t \theta (y - z\beta) z = 0 \\ &\sum_t (\theta y - \theta z \beta) z = 0 \\ &\sum_t \theta y z - \beta \sum_t \theta z^2 = 0 \\ \beta &= \frac{\sum \theta y z}{\sum \theta z^2} \\ \beta &= \frac{\sum \left( \theta_i^{\frac{1}{2}} y_i \right) \left( \theta_i^{\frac{1}{2}} z_i \right)}{\sum \left( \theta_i^{\frac{1}{2}} z_i \right)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Donde  $\bar{r}_1$  es el valor del retorno internacional en  $s$ . El vector de coeficientes y su matriz de varianzas y covarianzas se obtienen al utilizar la estructura del estimador de mínimos cuadrados ponderados (ver ecuación 6):

$$\begin{aligned} \widehat{\beta}_s &= \left[ \sum_t \theta(t-s) Z_{st} Z'_{st} \right]^{-1} \sum_t \theta(t-s) Z_{st} r_{sd} \\ V(\widehat{\beta}_s) &= \sigma_s^2 \left[ \sum_t \theta(t-s) Z_{st} Z'_{st} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

$\sigma_s^2$  representa la varianza local del error del modelo en una vecindad alrededor de  $r_s$ . Aplicando este procedimiento para cada momento  $s$  se obtienen  $T$  regresiones locales,  $\hat{f}_s(r_i) = Z_i\beta_s$ , y la correspondiente suma ponderada de residuales al cuadrado  $RwSS_a = \sum \theta(t-s) [Z_{st}\hat{\beta}_s - r_d]^2$ . Con base en esta suma ponderada se calcula la serie de coeficientes de determinación (ver ecuación 7):

$$R_s^2 = 1 - \frac{RwSS_s}{TwSS_s}, \quad s = 1, \dots, T$$

$$TwSS_s = \sum_t \theta(t-s)r_{st}^2 \quad (7)$$

### Correlación local mediante *wavelet*

El uso de *wavelet* permite cuantificar la fuerza de la relación entre el retorno doméstico y el internacional, para cada momento y escala de tiempo, lo que permite observar la dinámica de la relación y distinguir entre el corto, mediano y largo plazo. Particularmente, aquí se utiliza la transformación MODWT (*maximal overlap discrete wavelet transform*), una de las transformaciones más populares (Fernández-Macho, 2018). Además de ser popular, existen al menos dos hechos más que justifican esta escogencia, i) la naturaleza discreta de los datos, ii) la importante propiedad de preservación de energía (Fernández-Macho, 2018), la cual es particularmente importante para el objetivo de este documento.

Sean  $w_{1jt}$  y  $w_{2jt}$  los coeficientes a la escala  $\lambda_t$  obtenidos al aplicar la transformación MODWT a un par de retornos (el doméstico y uno internacional). La serie de correlaciones locales ( $\psi_s(\lambda_j)$ ) se obtienen de la siguiente forma (ver ecuación 8):

$$\psi_s(\lambda_j) = \text{Corr} \left( [\theta(t-s)]^{\frac{1}{2}} \omega_{1jt}, [\theta(t-s)]^{\frac{1}{2}} \hat{\omega}_{1jt} \right) \quad (8)$$

Donde  $\text{Corr}(x, y)$  representa la correlación de Pearson entre un par de variables  $x$  y  $y$ . Es decir, la correlación local *wavelet* en el momento  $s$  se obtiene al calcular la correlación de Pearson entre los coeficientes del retorno doméstico  $\omega_{1jt}$  y su valor predicho  $\hat{\omega}_{1jt}$ . Ponderando cada observación de acuerdo con  $\theta(t-s)$ .  $\hat{\omega}_{1jt}$ , se obtiene al efectuar una regresión local (como la que se describió en la sección anterior) de  $\omega_{1jt}$  en  $w_{2jt}$  (los coeficientes del retorno internacional). Aplicando este procedimiento para cada momento  $s$  se obtienen  $T$  correlaciones *wavelets* locales.

### Identificación de condiciones de calma y crisis en el mercado energético

Se utilizaron dos estrategias para identificar los periodos de calma y crisis de los indicadores de desempeño energético (petróleo, gas natural y carbón). Se utiliza algoritmos basados en reglas para identificar los periodos de auge/caída como *proxy* de periodos de calma/crisis y están expresadas como variables binarias para aplicar las pruebas de contagio, donde 0 es calma y 1 es crisis.

### Criterio de duración del estado

En este enfoque es importante determinar los puntos de inflexión en los indicadores de desempeño energético. Se utiliza el modelo desarrollado por Pagan y Sossounov (2003), quienes definen  $T_{\text{window}} = 8$  meses debido a la falta de suavización de las series, y establecen un  $t_{\text{censor}} = 6$  meses y  $t_{\text{phase}} = 4$  meses para decidir el tiempo mínimo que puede estar en cualquier fase basados en la teoría Dow.

### Criterio de la magnitud de los cambios de los precios

En este enfoque es importante determinar el cambio porcentual de un mercado de pasar de un escenario de crisis a calma  $\lambda_1$  y de calma a crisis  $\lambda_2$ . Se utiliza el modelo desarrollado por Lunde y Timmermann (2004), quienes consideran un filtro  $\lambda_1 = 20\%$  y  $\lambda_2 = 15\%$  para explicar los cambios de periodos de calma del mercado y va en contra de hallar muchos mercados de periodos crisis.

## 4. RESULTADOS

### Carbón

En la Figura 1 se presentan los momentos de calma y crisis identificados mediante los dos criterios anteriormente mencionados. Las dos técnicas producen una clasificación similar, solo difieren notoriamente casi al final del periodo de estudio. También se destaca que la crisis de mayor duración se dio a inicios del 2014 y terminó en los primeros meses.

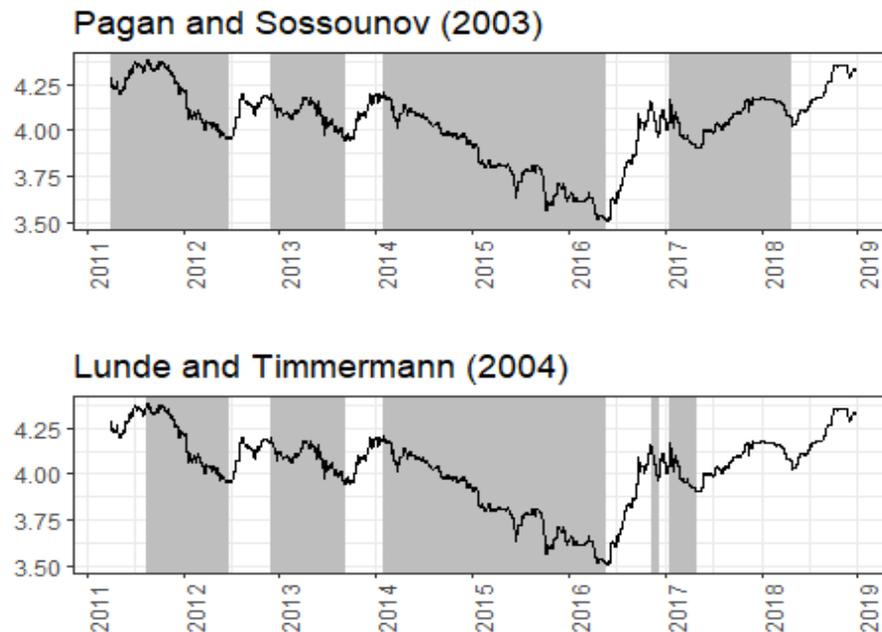
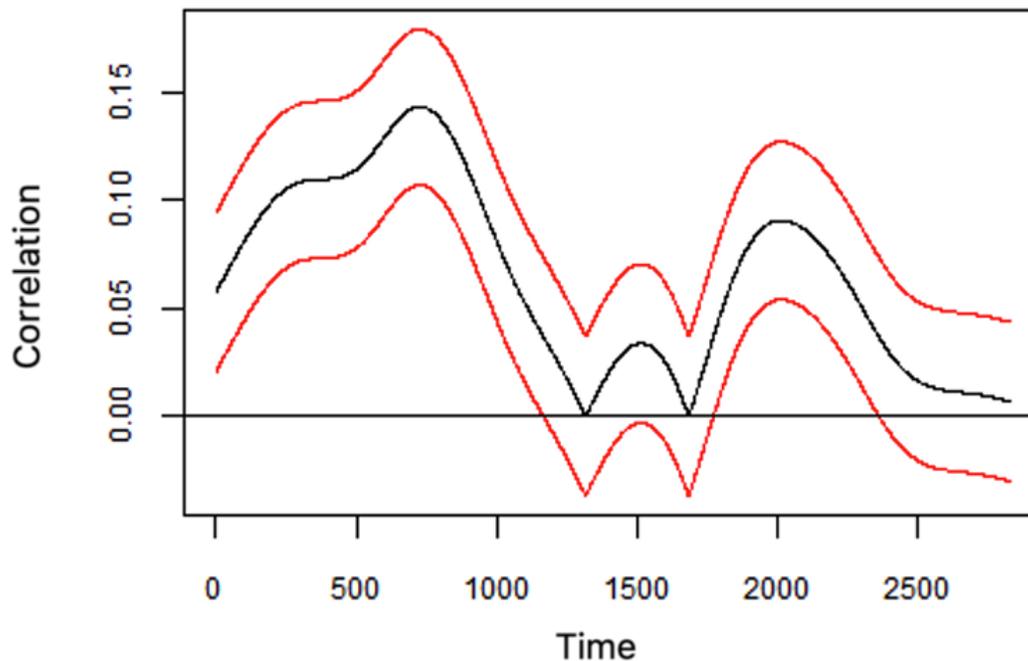


Figura 1. Momentos de calma y crisis en el mercado internacional del carbón

Figure 1. Moments of calm and crisis in the international coal market

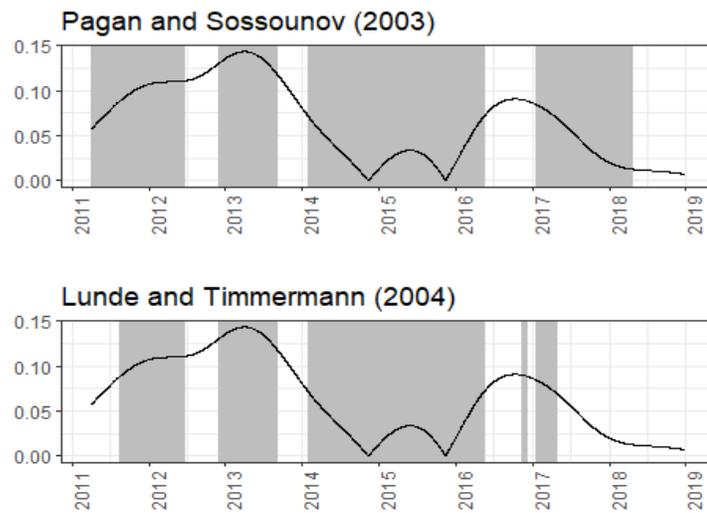
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 2 se presenta la serie de correlaciones estimadas (a través de regresiones aplicadas a los pseudoretornos del precio *spot* y carbón) junto con sus respectivos intervalos de confianza al 95%. Se puede observar que muchas de las correlaciones estimadas son significativas, lo que confirma la existencia de canales de transmisión que no son capturados por los modelos antes mencionados. Es importante hacer hincapié en esto último. Las correlaciones son estimadas con los pseudoretornos, esto es, el término de error de los modelos antes descritos, o lo que es igual, la parte de los retornos que no es explicada por los modelos. Por tanto, las correlaciones que se muestran dan cuenta de fenómenos no capturados por los modelos o canales de transmisión tradicionales. También se puede apreciar que la serie tiene tres máximos locales, aunque uno de ellos (el segundo) es no significativo (el intervalo de confianza contiene el cero).



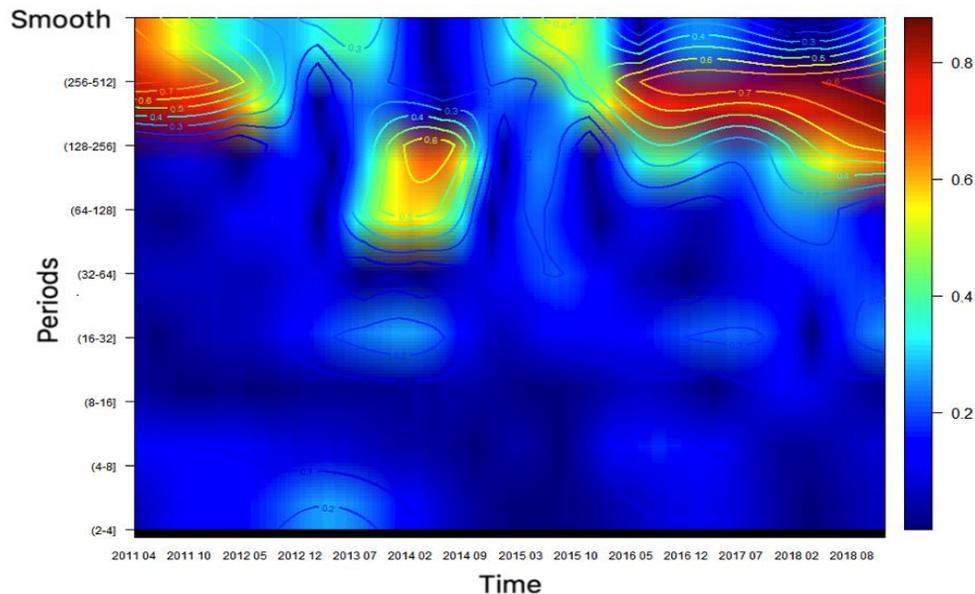
**Figura 2. Correlación local entre el carbón y el precio *spot* en momentos de calma y crisis**  
Figure 2. Local correlation between coal and spot electricity prices in moments of calm and crisis  
Fuente: elaboración propia.

La Figura 3, por su parte, presenta la misma serie de correlaciones, pero esta vez indicando los momentos de calma y crisis. Se puede apreciar que dos de los máximos locales ocurren en momentos de crisis. No obstante, el segundo no es significativo, así que no cuenta como evidencia de contagio. Por otro lado, el último máximo local ocurre en momentos de calma, por lo que no se encuentra evidencia concluyente de contagio. En esta ocasión, se deberá afirmar que solo se encontró evidencia de contagio durante la crisis del 2013.



**Figura 3. Correlación local entre el carbón y el precio *spot* en momentos de calma y crisis**  
Figure 3. Local correlation between coal and spot electricity prices in moments of calm and crisis  
Fuente: elaboración propia.

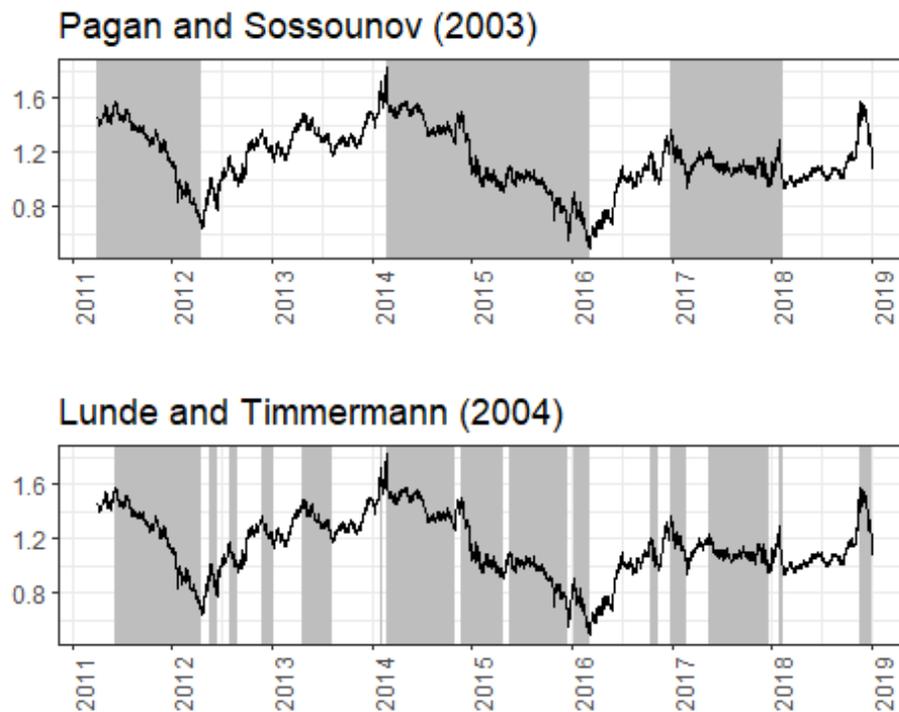
Finalmente, en la Figura 4 se presenta el mapa de correlaciones estimadas mediante *wavelets*. En este caso, además de observar la variación en el tiempo (eje x), se puede apreciar la correlación para diferentes periodos o escalas (eje y). Se puede notar que las altas correlaciones se encuentran en los altos periodos, lo que es reflejo de la existencia de una relación de mediano y largo plazo entre los retornos de interés. También se puede apreciar que los dos primeros contornos de altas correlaciones coinciden aproximadamente con las dos primeras crisis, lo que aporta evidencia en favor de la hipótesis de contagios para estos periodos de tiempo en específico.



**Figura 4. Correlación local *wavelet* entre el carbón y el precio *spot* en momentos de calma y crisis**  
Figure 4. Local wavelet correlation between coal and spot electricity prices in moments of calm and crisis  
Fuente: elaboración propia.

## Gas

En la Figura 5 se presentan los momentos de calma y crisis identificados mediante los dos métodos antes mencionados. Los dos métodos producen una clasificación similar, solo difieren en que el segundo identifica pequeños periodos de crisis entre el 2012 y 2014, y casi al final del periodo de estudio. También se destaca que la crisis de mayor duración, de nueva cuenta, se dio a inicios del 2014 y terminó en los primeros meses del 2016.



**Figura 5. Momentos de calma y crisis en el mercado internacional del gas**

Figure 5. Moments of calm and crisis in the international gas market

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6 se presenta la serie de correlaciones estimadas (a través de regresiones aplicadas a los pseudoretornos del precio *spot* y el gas) junto con sus respectivos intervalos de confianza al 95%. Se evidencia que la gran mayoría de las correlaciones estimadas carecen de significancia estadística, lo que sugiere que, en la mayoría de los períodos de tiempo considerados en el análisis de la muestra, los modelos previamente mencionados capturan adecuadamente los canales de transmisión relevantes (ver figura 7). Este hallazgo respalda la robustez de los modelos utilizados al encontrar relaciones significativas explicadas entre las variables analizadas en el período de estudio. No obstante, hay que mencionar que el segundo pico es significativo, y este ocurre precisamente en medio de una crisis. De modo que, en este caso, se debe afirmar que solo se encuentra evidencia de contagio durante la crisis que inició en el año 2014.

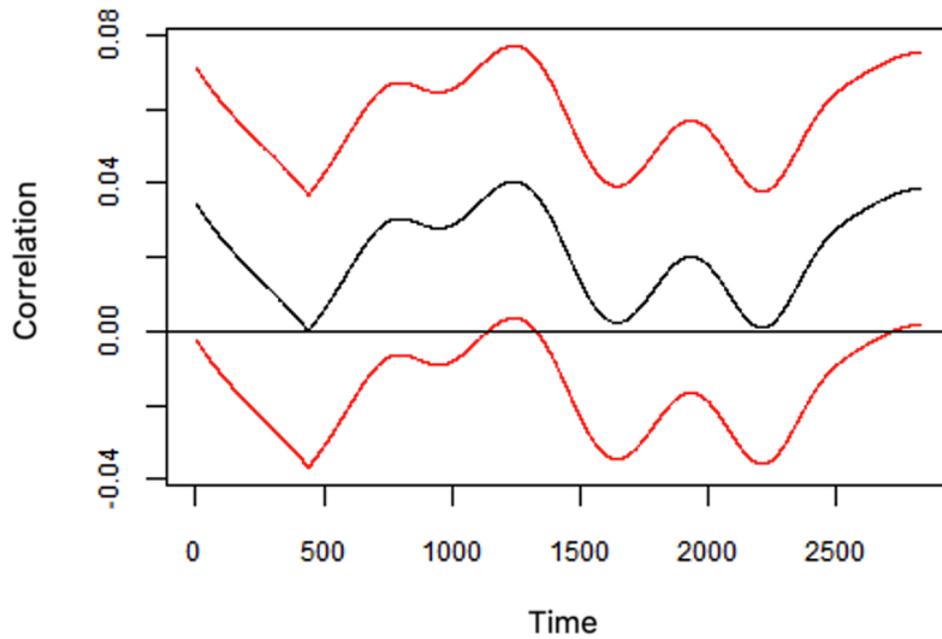


Figura 6. Correlación local entre el gas y el precio *spot* en momentos de calma y crisis  
Figure 6. Local correlation between gas and spot electricity prices in moments of calm and crisis  
Fuente: elaboración propia.

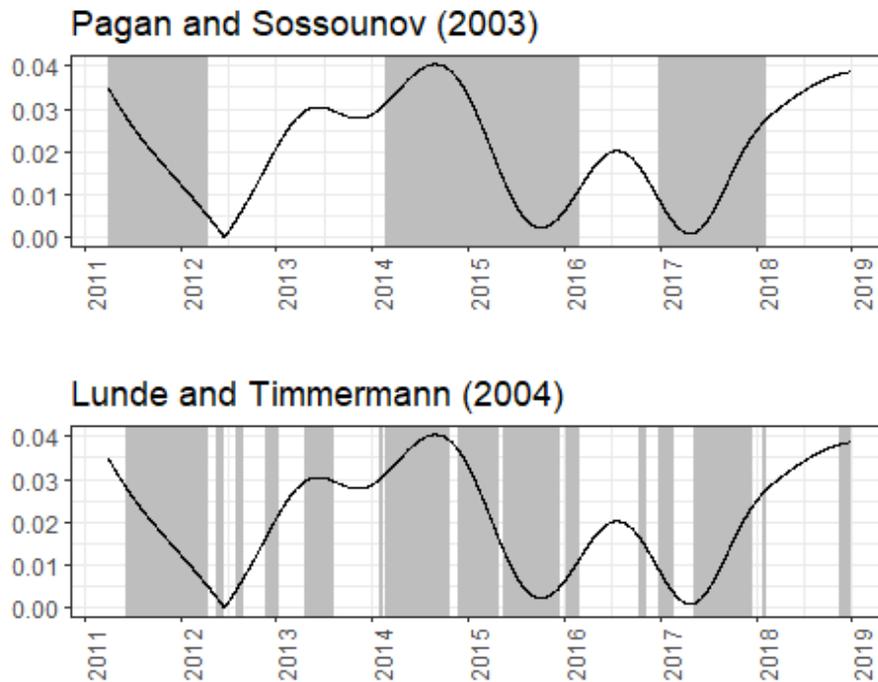
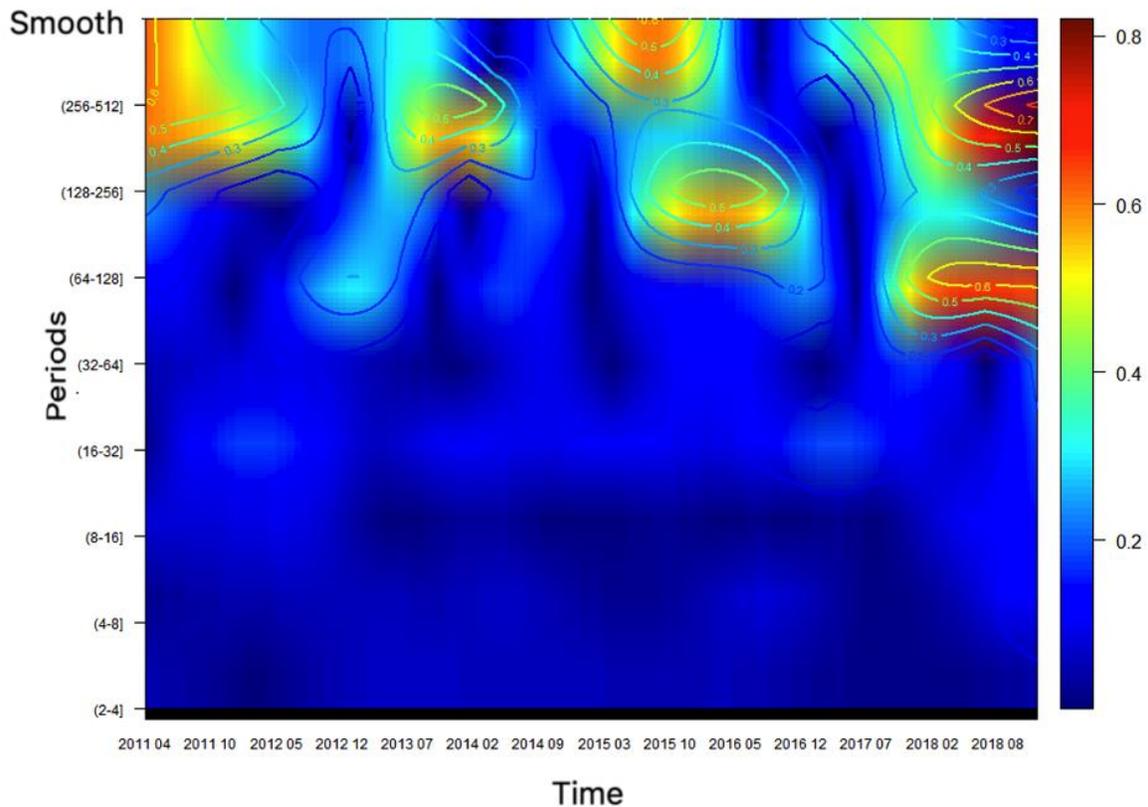


Figura 7. Correlación local entre el gas y el precio *spot* en momentos de calma y crisis  
Figure 7. Local correlation between gas and spot electricity prices in moments of calm and crisis  
Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 8 se presenta el mapa de correlaciones estimadas mediante *wavelets*. De nueva cuenta, se encuentra evidencia de que las relaciones más fuertes entre los retornos de interés se dan en el mediano y largo plazo. También se puede apreciar que algunas de las altas correlaciones se dan en momentos de crisis, por lo que se encuentra evidencia (aunque débil) de contagio.



**Figura 8. Correlación local *wavelet* entre el gas y el precio *spot* en momentos de calma y crisis**  
Figure 8. Local wavelet correlation between gas and spot electricity prices in moments of calm and crisis  
Fuente: elaboración propia.

## Brent

La Figura 9 contiene los momentos de calma y crisis para el brent. En este caso, los dos métodos se diferencian un poco más, aunque, mediante ambos se puede concluir que la crisis más fuerte empezó en el 2013.

En la Figura 10 se presenta la serie de correlaciones. Se puede apreciar que existen varios picos, todos significativos. Incluso, al final del periodo de análisis, la correlación aumentó significativamente. Ahora, en la Figura 11 se puede apreciar que cada uno de estos picos ocurrió durante un periodo de crisis, por lo que, para el caso del brent, se encuentra evidencia concluyente en favor de la hipótesis de contagio. A una conclusión similar se llega utilizando la Figura 12, donde se presentan las correlaciones calculadas mediante *wavelets*, pues los dos primeros contornos de altas correlaciones se dan en momentos de crisis, sobre todo cuando estos últimos se calculan mediante el método de Pagan y Sossounov (2003).

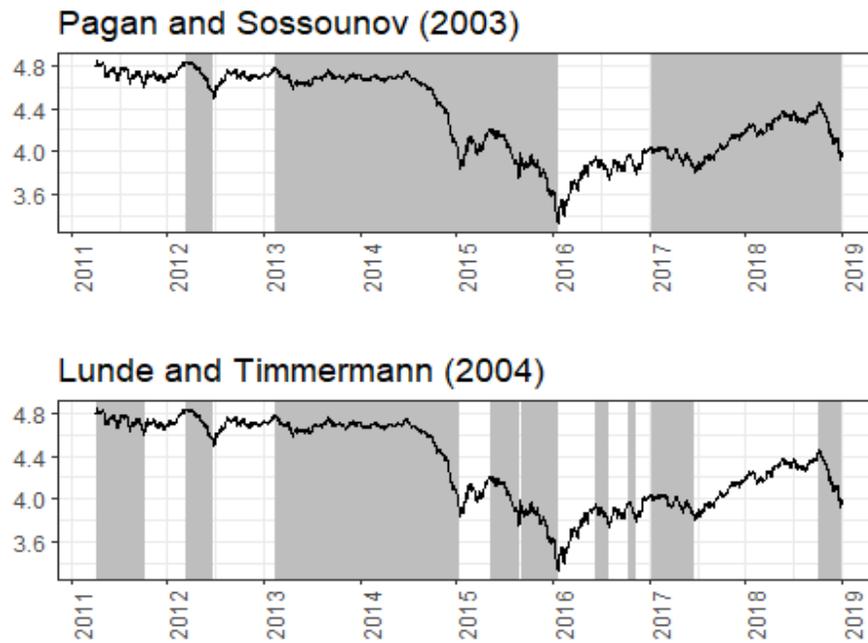


Figura 9. Momentos de calma y crisis en el mercado internacional del petróleo

Figure 9. Moments of calm and crisis in the international oil market

Fuente: elaboración propia.

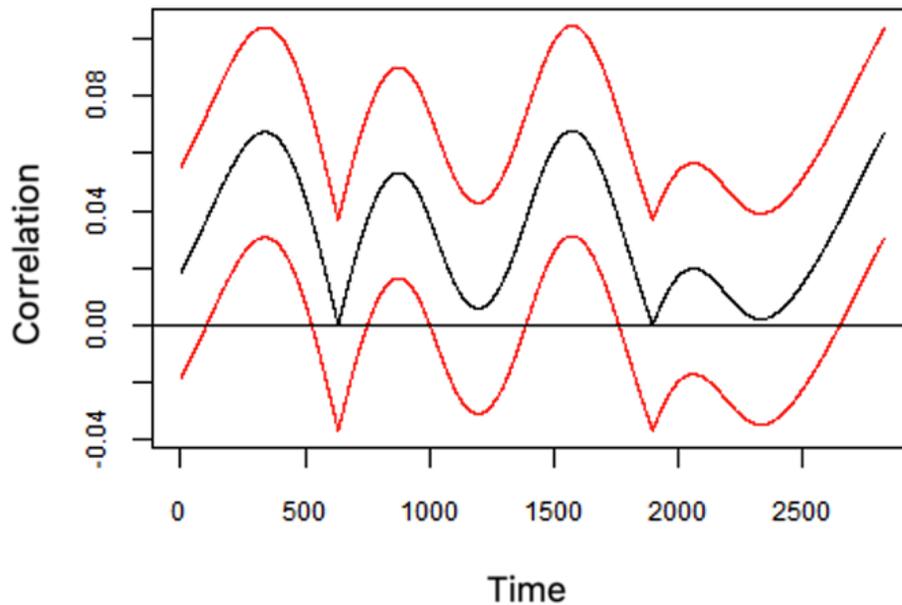
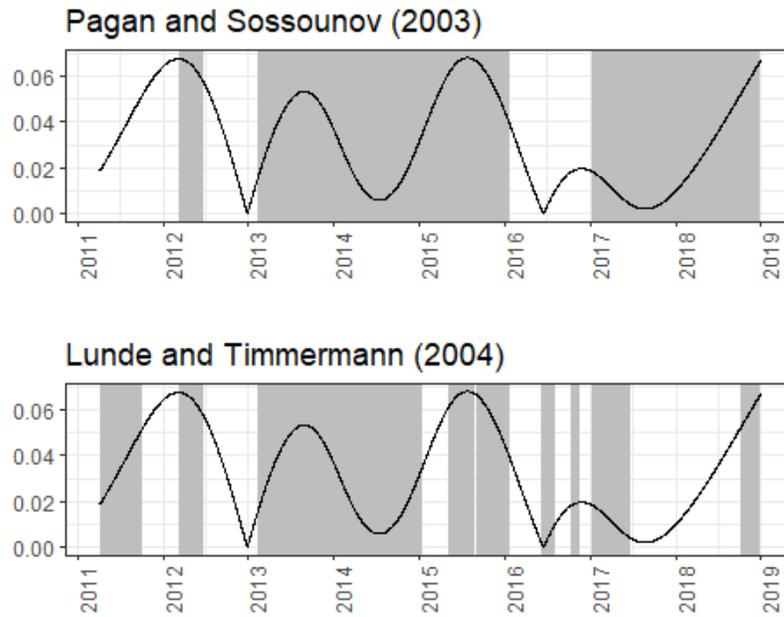


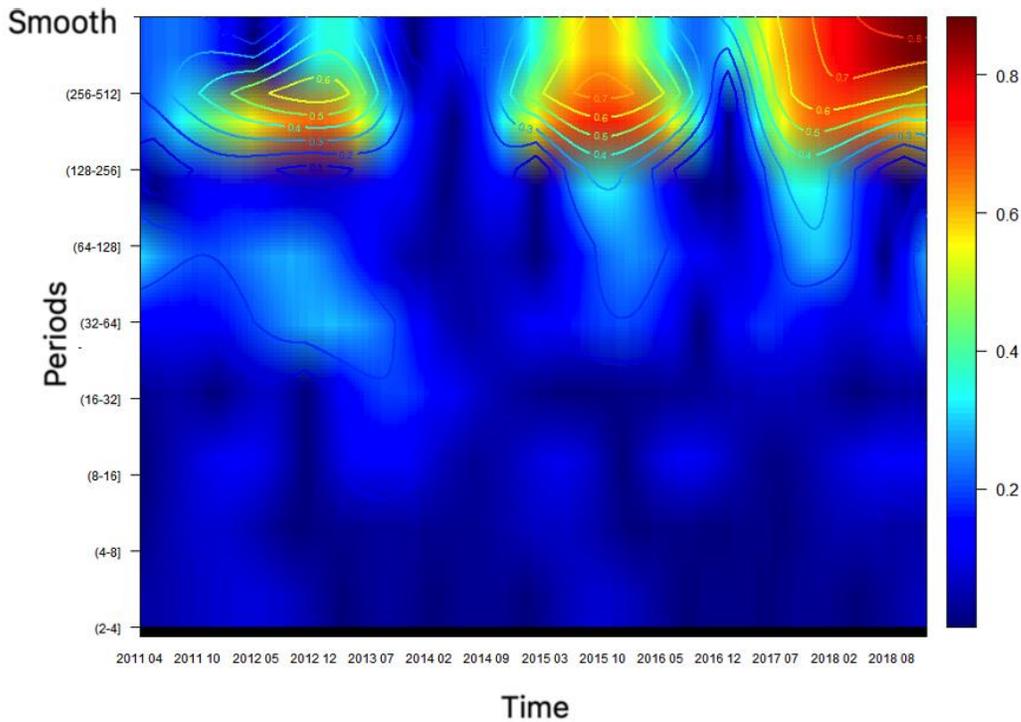
Figura 10. Correlación local entre el Brent y el precio *spot* en momentos de calma y crisis

Figure 10. Local correlation between Brent crude oil and spot electricity prices in moments of calm and crisis

Fuente: elaboración propia.



**Figura 11. Correlación local entre el Brent y el precio *spot* en momentos de calma y crisis**  
Figure 11. Local correlation between Brent crude oil and spot electricity prices in moments of calm and crisis  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 12. Correlación local *wavelet* entre el petróleo y el precio *spot* en momentos de calma y crisis**  
Figure 12. Local wavelet correlation between oil and spot electricity prices in moments of calm and crisis  
Fuente: elaboración propia.

## 5. DISCUSIÓN

En contraste con métodos más convencionales presentes en la literatura, como el uso de cópulas (Uribe, 2011) o coeficientes de correlación (Mahadeo et al., 2019), que tienden a analizar relaciones de manera más general, la técnica de *wavelets* aplicada en este estudio permitió abordar simultáneamente el problema del contagio financiero energético en su dimensión local y en diferentes escalas, lo que resultó especialmente apropiado para comprender la multifacética naturaleza de la transmisión de volatilidad en los mercados financieros objeto de estudio.

Los resultados de la investigación, empleando análisis de *wavelet* para estudiar el contagio energético, coinciden con los resultados de Reboredo y Rivera-Castro (2013), quienes analizaron la relación entre los precios del petróleo crudo y la tasa de cambio por dólares americanos, encontrando que antes de la crisis no hubo relación significativa entre los precios del petróleo y las tasas de cambio. Sin embargo, durante la crisis financiera se detectó una correlación negativa entre ambos, sin efectos de liderazgo o rezago previos a la crisis. Posteriormente, durante la crisis, los precios del petróleo comenzaron a influir en las tasas de cambio y viceversa. Esto podría significar que eventos inesperados en el mercado del petróleo, como caídas drásticas en los precios, quizás desencadenen movimientos significativos en las tasas de cambio, lo que a su vez afectaría a las economías y a las empresas que dependen de transacciones internacionales.

Adicionalmente, los hallazgos de la investigación están en consonancia con investigaciones previas, como el estudio de Hergety (2012) y el de Boubaker y Raza (2017), que examinaron los efectos secundarios y las interrupciones en los precios del petróleo crudo y los mercados financieros de los países del BRICS durante la crisis financiera global de 2007-2009. Estos estudios subrayaron la idea de que las naciones de América Latina tienen monedas altamente correlacionadas con los productos básicos y, como resultado, muestran una mayor vulnerabilidad a las influencias externas en sus mercados de divisas. Desde una perspectiva financiera, esto sugiere que los inversores y las instituciones financieras que operan en América Latina deben estar especialmente atentos a los cambios en los precios de los productos básicos y a los eventos económicos globales, ya que estos factores pueden tener un impacto significativo en los mercados de divisas y, en última instancia, en sus estrategias de inversión y gestión de riesgos.

El principal aporte de la investigación radica en demostrar que existe una relación significativa y a largo plazo entre el desempeño energético y los precios *spot* de energía, así como una presencia de contagio del gas natural y del petróleo Brent sobre los precios *spot* de energía en tiempos de crisis. Sin embargo, no hay evidencia clara de contagio en el caso del carbón. Estos resultados son relevantes para comprender cómo los cambios en el mercado de la energía, y en la economía en general, pueden afectar los precios de la energía a largo plazo en un país emergente. Igualmente, el presente estudio consolida un acervo teórico, empírico e informativo más amplio al renglón industrial de la economía, incentivando objetivamente la formulación de políticas financieras y económicas, tanto en el sector energético del país, como también en el mercado de capitales.

## 6. CONCLUSIONES

El contagio financiero energético es un fenómeno con impacto significativo en la economía global, y es particularmente relevante en los mercados emergentes que a menudo poseen economías menos diversificadas y son altamente dependientes de las exportaciones o importaciones de energía, lo que los hace especialmente vulnerables a las fluctuaciones en los precios de los productos energéticos y a los efectos de transmisión de volatilidad financiera. En ese sentido, este tipo de estudios consolidan el acervo informativo para que compañías, inversionistas, diseñadores de política económica y otros agentes del mercado desarrollen estrategias y acciones que permitan mitigar los riesgos y fortalecer la capacidad de respuesta ante situaciones de crisis relacionadas con el mercado internacional de la energía.

Este documento se enfocó en analizar el efecto de los precios internacionales de los combustibles fósiles en el precio del mercado energético colombiano. Se tomaron series de desempeño del mercado energético, tipo de cambio, medida de actividad económica extranjera y rendimiento del mercado de energía. Se emplearon métodos econométricos de vanguardia como el análisis de ondas (*wavelet analysis*) y el análisis de pseudoretornos que reflejan los canales no tradicionales de contagio. Asimismo, se presentaron pruebas de contagio utilizando diferentes métodos de determinación de los períodos de estabilidad y perturbación. En efecto, se identificó que los métodos de Pagan y Sossounov, así como los de Lunde y Timmermann, permiten establecer de manera más efectiva los períodos de crisis y arrojan resultados más consistentes del contagio entre el mercado mundial del petróleo Brent y los mercados de acciones y de divisas en Colombia.

Los resultados, de forma general, muestran que hay correlaciones significativas a largo plazo entre los indicadores de desempeño energético y los precios *spot* de energía durante periodos de crisis. Hay presencia de contagio del petróleo Brent y del gas natural sobre los precios *spot* de energía; con respecto al petróleo Brent, hay evidencia concluyente de contagio bajo los dos enfoques, mientras que, para el gas natural, se observa evidencia de contagio solo en la crisis del desplome de los precios del petróleo (2014-2015) y el Brexit en el 2016. En relación con el carbón, no se identifica un claro contagio bajo ningún enfoque analizado en el estudio. Sin embargo, se observan correlaciones significativas a largo plazo a través del enfoque de análisis de *wavelet*. Estos hallazgos poseen relevancia en el contexto de comprender de manera holística cómo los cambios en el mercado global de la energía y en la economía en general pueden incidir en los precios de la energía a largo plazo en economías emergentes. Esto es de especial interés debido a la mayor susceptibilidad de dichos mercados en términos de estabilidad macroeconómica y calidad de vida de sus poblaciones.

Para futuras investigaciones, se recomienda expandir la base de datos para que contenga más periodos de tiempo y, de esta manera, se incluyan otras crisis importantes como la del 2008 o 2019. De igual forma, es pertinente consolidar la investigación en el campo de mercados latinoamericanos, donde existen varias economías que dependen principalmente de mercados de materias primas energéticas. Adicional a esto, la eficacia del ejercicio de análisis econométrico del contagio depende de manera importante de la identificación de los momentos de estabilidad y perturbación, por esta razón, en el futuro cercano, es clave incluir más métodos de identificación de este tipo, para corroborar la robustez de los resultados.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no presentan conflictos de interés financiero, profesional o personal que pueda influir de forma inapropiada en los resultados obtenidos o las interpretaciones propuestas.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Para el desarrollo de este proyecto, todos los autores han realizado una contribución significativa, especificada a continuación:

**Luis Ángel Meneses Cerón:** formulación del proyecto de investigación, construcción del marco teórico y revisión de literatura, diseño metodológico, identificación de resultados y de la discusión; asimismo, fungió como revisor de la redacción del manuscrito en general.

**Jorge Eduardo Orozco Álvarez:** formulación del proyecto de investigación, recolección de información y diseño del modelo propuesto, así como la redacción de los resultados y las conclusiones.

**Juan Camilo Mosquera Muñoz:** revisión bibliográfica, construcción del marco teórico, estructuración de la base de datos, diseño metodológico, análisis estadístico y econométrico y redacción general del manuscrito.

**Víctor Manuel Vélez Rivera:** revisión bibliográfica, construcción del marco teórico, estructuración de la base de datos, diseño metodológico, análisis estadístico y econométrico y redacción general del manuscrito.

## REFERENCIAS

- Algieri, B., y Leccadito, A. (2017). Assessing contagion risk from energy and non-energy commodity markets. *Energy Economics*, 62, 312-322. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.01.006>
- Bae, K.-H., Karolyi, G. A., y Stulz, R. M. (2003). A new approach to measuring financial contagion. *The Review of Financial Studies*, 16(3), 717-763. <https://doi.org/10.1093/rfs/hhg012>
- Benhmad, F. (2013). Bull or bear markets: A wavelet dynamic correlation perspective. *Economic Modelling*, 32, 576-591. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2013.02.031>
- Belhassine, O., y Karamti, C. (2021). Volatility spillovers and hedging effectiveness between oil and stock markets: Evidence from a wavelet-based and structural breaks analysis. *Energy Economics*, 102, issue C, S0140988321003959, <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:eneeco:v:102:y:2021:i:c:s0140988321003959>.
- Boako, G., Alagidede, I. P., Sjo, B., y Uddin, G. S. (2020). Commodities price cycles and their interdependence with equity markets. *Energy Economics*, 91, 104884. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104884>

- Boubaker, H., y Raza, S. A. (2017). A wavelet analysis of mean and volatility spillovers between oil and BRICS stock markets. *Energy Economics*, 64, 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.01.026>
- Briones Pinargote, C. J. (2023). Competitividad internacional del sector atunero: una aplicación al sector ecuatoriano. *Interciencia*, 48(4), 184-196. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8946148>
- Calvo, G. A., Leiderman, L., y Reinhart, C. M. (1996). Inflows of Capital to Developing Countries in the 1990s. *Journal of Economic Perspectives*, 10(2), 123-139. <https://doi.org/10.1257/jep.10.2.123>
- Cărăușu, D. N., Filip, B. F., Cigu, E., y Toderașcu, C. (2018). Contagion of Capital Markets in CEE Countries: Evidence from Wavelet Analysis. *Emerging Markets Finance and Trade*, 54(3), 618-641. <https://doi.org/10.1080/1540496X.2017.1410129>
- Centeno, M. A., Nag, M., Patterson, T. S., Shaver, A., y Windawi, A. J. (2015). The emergence of global systemic risk. *Annual Review of Sociology*, 41, 65-85. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-073014-112317>
- Chakraborty, U. K. (2008). *Advances Differential Evolution*. Springer.
- Dash, S. R., y Maitra, D. (2019). The relationship between emerging and developed market sentiment: A wavelet-based time-frequency analysis. *Journal of Behavioral and Experimental Finance*, 22, 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.jbef.2019.02.006>
- Díaz, G., Coto, J., y Gómez-Aleixandre, J. (2019). Prediction and explanation of the formation of the Spanish day-ahead electricity price through machine learning regression. *Applied Energy*, 239, 610-625. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.213>
- Dornbusch, R., Park, Y. C., y Claessens, S. (2000). Contagion: Understanding How It Spreads. *The World Bank Research Observer*, 15(2), 177-197. <https://doi.org/10.1093/wbro/15.2.177>
- Eichengreen, B., Rose, A. K., y Wyplosz, C. (1999). Contagious Currency Crises. *National Bureau of Economic Research*, 29-56. <https://doi.org/10.3386/w5681>
- Fang, S., y Egan, P. (2018). Measuring contagion effects between crude oil and Chinese stock market sectors. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 68, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.qref.2017.11.010>
- Fernández-Macho, J. (2018). Time-localized wavelet multiple regression and correlation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 492, 1226-1238. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.11.050>
- Ftiti, Z., y Hadhri, S. (2019). Can economic policy uncertainty, oil prices, and investor sentiment predict Islamic stock returns? A multi-scale perspective. *Pacific-Basin Finance Journal*, 53, issue C, 40-55, <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:pacfin:v:53:y:2019:i:c:p:40-55>

- Forbes, K. J., y Rigobon, R. (2002). No contagion, only interdependence: Measuring stock market comovements. *The Journal of Finance*, 57(5), 2223-2261. <https://doi.org/10.1111/0022-1082.00494>
- Fry, R., Martin, V. L., y Tang, C. (2010). A new class of tests of contagion with applications. *Journal of Business y Economic Statistics*, 28(3), 423-437. <https://doi.org/10.1198/jbes.2010.06060>
- Fry-McKibbin, R., Hsiao, C.-L., y Tang, C. (2014). Contagion and global financial crises: lessons from nine crisis episodes. *Open Economies Review*, 25(3), 521-570. <https://doi.org/10.1007/s11079-013-9289-1>
- Fry-McKibbin, R., y Hsiao, C. Y-L. (2018). Extremal dependence tests for contagion. *Econometric Reviews*, 37(6), 626-649. <https://doi.org/10.1080/07474938.2015.1122270>
- Gallegati, M. (2012). A wavelet-based approach to test for financial market contagion. *Computational Statistics y Data Analysis*, 56(11), 3491-3497. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2010.11.003>
- García, J., y Pérez-Libreros, A. F. (2019). El precio spot de la electricidad y la inclusión de energía renovable no convencional: evidencia para Colombia. *SSRN*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3443910>
- Ghorbel, A., y Boujelbene, Y. (2013). Contagion effect of the oil shock and US financial crisis on the GCC and BRIC countries. *International Journal of Energy Sector Management*, 7(4), 430-447. <https://doi.org/10.1108/IJESM-04-2012-0002>
- Ghosh, I., Sanyal, M. K., y Jana, R. K. (2020). Co-movement and Dynamic Correlation of Financial and Energy Markets: An Integrated Framework of Nonlinear Dynamics, Wavelet Analysis and DCC-GARCH. *Computational Economics*, 57, 503–527. <https://doi.org/10.1007/s10614-019-09965-0>
- Grubel, H. G., y Fadner, K. (1971). The interdependence of international equity markets. *The Journal of Finance*, 26(1), 89-94. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1971.tb00591.x>
- Guesmi, K., Abid, I., Creti, A., y Chevallier, J. (2018). Oil Price Risk and Financial Contagion. *The Energy Journal*, 39(2). <https://doi.org/10.5547/01956574.39.SI2.kgue>
- Hamdi, B., Aloui, M., Alqahtani, F., y Tiwari, A. (2019). Relationship between the oil price volatility and sectoral stock markets in oil-exporting economies: Evidence from wavelet nonlinear denoised based quantile and Granger-causality analysis. *Energy Economics*, 80, 536-552. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.12.021>
- Hergety, S. W. (2012). Exchange market pressure, commodity prices, and contagion in Latin America. *The Journal of International Trade & Economic Development*, 23(1), 56-77. <https://doi.org/10.1080/09638199.2012.679292>

- Hong, Y., Tu, J., y Zhou, G. (2007). Asymmetries in Stock Returns: Statistical Tests and Economic Evaluation. *The Review of Financial Studies*, 20(5), 1547-1581. <https://doi.org/10.1093/rfs/hhl037>
- Kaminsky, G. L., y Reinhart, C. M. (2000). On crises, contagion, and confusion. *Journal of International Economics*, 51(1), 145-168. [https://doi.org/10.1016/S0022-1996\(99\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1996(99)00040-9)
- Kilian, L., y Vigfusson, R.J. (2011). Are the responses of the U.S. economy asymmetric in energy price increases and decreases? *Quantitative Economics*, 2, 419-453. <https://doi.org/10.3982/QE99>
- Lahmiri, S., Uddin, G. S., y Bekiros, S. (2017). Clustering of short and long-term co-movements in international financial and commodity markets in wavelet domain. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 486, 947-955. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.06.012>
- Li, J., Xie, C., y Long, H. (2019). The roles of inter-fuel substitution and inter-market contagion in driving energy prices: Evidences from China's coal market. *Energy Economics*, 84, 104525. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104525>
- Lin, L., Kuang, Y., Jiang, Y., y Su, X. (2019). Assessing risk contagion among the Brent crude oil market, London gold market and stock markets: Evidence based on a new wavelet decomposition approach. *The North American Journal of Economics and Finance*, 50, 101035. <https://doi.org/10.1016/j.najef.2019.101035>
- Lunde, A., y Timmermann, A. (2004). Duration dependence in stock prices: An analysis of bull and bear markets. *Journal of Business & Economic Statistics*, 22(3), 253-273. <https://doi.org/10.1198/073500104000000136>
- Mahadeo, S. M. R., Heinlein, R., y Legrenzi, G. D. (2019). Energy contagion analysis: A new perspective with application to a small petroleum economy. *Energy Economics*, 80, 890-903. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.02.007>
- Mensi, W., Ur Rehman, M., Al-Yahyaee, K. H., y Vo, X. V. (2023). Frequency dependence between oil futures and international stock markets and the role of gold, bonds, and uncertainty indices: Evidence from partial and multivariate wavelet approaches. *Resources Policy*, 80, 103161. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103161>
- Pagan, A. R., y Sossounov, K. A. (2003). A simple framework for analysing bull and bear markets. *Journal Applied Econometrics*, 18(1), 511-532. <https://doi.org/10.1002/jae.664>
- Pan, Z., Zheng, X., y Gong, Y. (2015). A model-free test for contagion between crude oil and stock markets. *Economics Letters*, 130, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2015.02.023>
- Pericoli, M., y Sbracia, M. (2003). A Primer on Financial Contagion. *Journal of Economic Surveys*, 17(4), 571-608. <https://doi.org/10.1111/1467-6419.00205>

- Ranta, M. (2013). Contagion among major world markets: a wavelet approach. *International Journal of Managerial Finance*, 9(2), 133-149. <http://dx.doi.org/10.1108/17439131311307556>
- Reboredo, J. C., y Rivera-Castro, M. A. (2013). A wavelet decomposition approach to crude oil price and exchange rate dependence. *Economic Modelling*, 32, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2012.12.028>
- Reboredo, J. C., y Rivera-Castro, M. A. (2014). Wavelet-based evidence of the impact of oil prices on stock returns. *International Review of Economics & Finance*, 29, 145-176. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2013.05.014>
- Roy, A., Anchal, S., y Soudeep, D. (2023). A wavelet-based methodology to compare the impact of pandemic versus Russia–Ukraine conflict on crude oil sector and its interconnectedness with other energy and non-energy markets. *Energy Economics*, 124, 106830. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106830>
- Samarakoon, L. P. (2011). Stock market interdependence, contagion, and the U.S. financial crisis: The case of emerging and frontier markets. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 21(5), 724-742. <https://doi.org/10.1016/j.intfin.2011.05.001>
- Sharpe, W. F. (1964). Capital asset prices: a theory of market equilibrium under conditions of risk. *The Journal of Finance*, 19(3), 425-442. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1964.tb02865.x>
- Shrestha, K., Subramaniam, R., Peranginangin, Y., y Philip, S. S. S. (2018). Quantile hedge ratio for energy markets. *Energy Economics*, 71, 253-272. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.02.020>
- Uribe, J. (2011). Contagio financiero: una metodología para su evaluación mediante coeficientes de dependencia asintótica. *Lecturas de Economía*, (75), 29-57. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-25962011000200003&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-25962011000200003&lng=en&tlng=es)
- Wen, X., Wei, Y., y Huang, D. (2012). Measuring contagion between energy market and stock market during financial crisis: A copula approach. *Energy Economics*, 34(5), 1435-1446. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.06.021>
- XM. (2020). *Transacciones*. Precio de bolsa y escasez. <https://www.xm.com.co/transacciones/cargo-por-confiabilidad/precio-de-bolsa-y-escasez>
- Zhao, Z., Wen, H., y Li, K. (2021). Identifying bubbles and the contagion effect between oil and stock markets: New evidence from China. *Economic Modelling* 94, 780-788. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2020.02.018>
- Zhou, Z., Lin, L., y Li, S. (2018). International stock market contagion: A CEEMDAN wavelet analysis. *Economic Modelling*, 72, 333-352. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2018.02.010>

Zhu, H., Wu, H., Ren, Y., y Yu, D. (2022). Time-frequency effect of investor sentiment, economic policy uncertainty, and crude oil on international stock markets: evidence from wavelet quantile analysis. *Applied Economics*, 54(53), 6116-6146. <https://doi.org/10.1080/00036846.2022.2057912>