

Problemas del
DESARROLLO

REVISTA
LATINOAMERICANA
DE ECONOMÍA

Problemas del desarrollo

ISSN: 0301-7036

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de
Investigaciones Económicas

Jesús Gutiérrez, Raúl de
Mercados de futuros y físicos de petróleo: transmisión de media y volatilidad
Problemas del desarrollo, vol. 49, núm. 192, 2018, Enero-Marzo, pp. 9-35
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11857345002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEH
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

MERCADOS DE FUTUROS Y FÍSICOS DE PETRÓLEO: TRANSMISIÓN DE MEDIA Y VOLATILIDAD

Raúl de Jesús Gutiérrez¹

Fecha de recepción: 16 de enero de 2017. Fecha de aceptación: 10 de junio de 2017.

RESUMEN

Este trabajo propone el modelo VEC-EGARCH bivariado con correlaciones constantes para analizar el proceso de transmisión de la media y volatilidad entre mercados de futuros de crudo y mercados físicos del petróleo mexicano. Los resultados revelan la existencia de patrones de transmisión de información de rendimientos bilaterales con efectos más fuertes de los mercados de futuros hacia los mercados físicos. En tanto que la evidencia de efectos de transmisión de volatilidad bilateral, sólo existe entre los mercados de futuros y el mercado físico del petróleo Olmeca. Los hallazgos empíricos son relevantes para las autoridades gubernamentales y consumidores porque coadyuvan en el diseño de estrategias de cobertura cruzada, que mitigan la exposición al riesgo de precios en el petróleo mexicano.

Palabras clave: México, petróleo, mercados de futuros, mercados físicos, volatilidad, modelo VEC-EGARCH bivariado.

Clasificación JEL: C32, G14, Q11, Q41.

THE PHYSICAL OIL AND OIL FUTURES MARKETS: TRANSMISSION OF THE MEAN AND VOLATILITY

Abstract

This paper sets out to use the bivariate VEC-EGARCH model with constant correlations to analyze the process by which the mean and volatility are transmitted between the crude futures markets and physical oil markets in Mexico. The results point to the existence of bilateral performance information transmission patterns with stronger effects from the futures markets to the physical markets, while the evidence for the effects of bilateral volatility transmission only exists between the oil futures and physical oil markets in Olmeca. The empirical findings are relevant to governmental authorities and consumers because they aid in designing cross-hedging strategies that mitigate exposure to the price risk in Mexican oil.

Key Words: Mexico, oil, futures markets, physical market, volatility, bivariate VEC-EGARCH model.

¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Correo electrónico: rjg2005mx@yahoo.com.mx.

MARCHÉ À TERME ET MARCHÉ AU COMPTANT DU PÉTROLE : TRANSMISSION DE LA MOYENNE ET VOLATILITÉ

Résumé

Ce travail présente le modèle bivarié VEC-EGARCH avec des corrélations constantes afin d'analyser le processus de transmission de la moyenne et de la volatilité entre les marchés à terme de l'hydrocarbure et les marchés au comptant du pétrole mexicain. Les résultats montrent l'existence de schémas de transmission de l'information sur les rendements bilatéraux et les effets des marchés à terme sur les marchés au comptant du pétrole, alors que la transmission bilatérale de la volatilité ne se présente que dans les marchés du pétrole « olmeca ». On souligne l'importance des constatations empiriques pour les autorités gouvernementales comme pour les consommateurs parce qu'elles contribuent à la conception de stratégies de couverture croisée qui atténuent le risque lié aux prix du pétrole mexicain.

Mots clés: Mexique, pétrole, marché à terme, marché au comptant, volatilité, modèle bivarié VEC-EGARCH.

MERCADO DE FUTUROS E FÍSICOS DE PETRÓLEO: TRANSMISSÃO DE MÉDIA E VOLATILIDADE

Resumo

Este artigo propõe o modelo VEC-EGARCH bivariado com correlações constantes para analisar o processo de transmissão da média e volatilidade entre os mercados de futuros de petróleo e os mercados físicos do petróleo mexicano. Os resultados revelam a existência de padrões de transmissão de informação de rendimentos bilaterais com efeitos mais fortes dos mercados de futuros em relação aos mercados físicos. Embora haja evidência dos efeitos da transmissão da volatilidade bilateral, ela só existe entre os mercados de futuros e o mercado de petróleo físico Olmeca. Os resultados empíricos são relevantes para as autoridades governamentais e os consumidores porque contribuem no desenho de estratégias de cobertura cruzada, que atenuam a exposição ao risco de preços no petróleo mexicano.

Palavras-chave: México, petróleo, mercados de futuros, mercados físicos, volatilidade, modelo VEC-EGARCH bivariado.

石油期货和实体市场之间均值和波动的传导

劳尔·德·赫苏斯·古铁雷斯

摘要

本文提出具有常熟相关性的二元VEC-EGARCH模型，分析墨西哥石油期货市场与实体市场之间均值和波动的传导过程。结果表明，二者之间存在着收益信息的互递模式，其中期货市场对实体市场的影响较强。此外，双边波动传导效应只存在于期货市场和奥尔梅卡实体市场之间。上述实证结果对政府当局和消费者有着重大的意义，因为这一发现有助于制定交叉覆盖策略以减少墨西哥石油价格波动的风险。

关键词：墨西哥，石油，期货市场，实体市场，波动，二元VEC-EGARCH模型

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el petróleo ha sido la principal fuente de energía para el crecimiento de la economía global, los ciclos comerciales regionales y sociedad moderna; su uso cotidiano desempeña un papel esencial en la producción industrial, transporte y creación de energía eléctrica y productos refinados. En consecuencia, el mercado físico del petróleo de referencia internacional ha experimentado un rápido crecimiento en su liquidez a tal grado de consolidarse en un mercado financiero sofisticado.

Sin embargo, con la aceleración del proceso de globalización y la evolución de la integración de los mercados de energía fósil, su estructura no-lineal y compleja ha mostrado altos niveles de volatilidad² como resultado de las tendencias ascendentes y descendentes simultáneas e irregulares en los precios del petróleo. La presencia de grandes fluctuaciones y alta volatilidad en los precios del petróleo se ha intensificado con el paso del tiempo en respuesta a choques informacionales de la misma magnitud, derivado de la expansión de las transacciones con futuros y el marcado proceso de la integración entre los mercados globales del petróleo.

Este fenómeno característico documentado ampliamente en la literatura, se ha notado más en los mercados de materias primas de energía que en los agrícolas y mineros, y en algunos mercados accionarios y cambiarios (Kroner *et al.*, 1995; Plourde y Watkins, 1998; Reigner, 2007; Cheng y Hung, 2011). Otro importante factor que ha transformado a los mercados de energía fósil en plataformas de negociación más complejas y volátiles, se refiere a la acelerada titulación o forma de comercialización del petróleo a través de mercados de futuros. Desde que los inversionistas institucionales y especuladores han mostrado interés en el petróleo como alternativa de inversión para los propósitos de la diversificación de los portafolios³ y cobertura de la exposición al riesgo (Geman y Kharoubi, 2008; Brooks y Prokopczuk, 2013).

Los mercados de futuros fueron creados principalmente para proporcionar protección contra cambios inesperados en los precios de los activos subya-

² En este contexto, la volatilidad se define como la variación de los precios en los mercados del petróleo, la cual es medida con modelos de heteroscedasticidad condicional autorregresiva cuando dicha volatilidad cambia a lo largo del tiempo.

³ Atraídos por la fuerte alza en los precios del petróleo y la correlación negativa entre los mercados de energía y accionarios. Los inversionistas institucionales como fondos de pensiones y fondos de inversión de riesgo moderado y alto (*hedge funds*) han incorporado contratos de futuros de petróleo en sus portafolios como mecanismo para la diversificación del riesgo.

centes relacionados o reducir la exposición al riesgo de los inversionistas y participantes. Otra de sus características importantes es la naturaleza de la información de los precios de los futuros en la formación de precios. Este proceso consiste en la capacidad del mercado de futuros para asimilar rápidamente el flujo de información, la cual será reflejada inmediatamente en el precio del activo subyacente para su predicción futura. Asimismo, la función de la formación de precios mantiene la relación de equilibrio a largo plazo entre los precios de contado y futuros en un mercado, y en el caso de que se presenten desviaciones temporales en el equilibrio los precios futuros en uno o ambos mercados tendrán que ajustarse a través del mecanismo de corrección de error.

En el caso del petróleo, los futuros generalmente son negociados en mercados internacionales como las bolsas de Nueva York (NYMEX) y Londres⁴ (IPE). Estas plataformas de negociación juegan un papel clave en la fijación de los precios de los petróleos WTI y Brent, así como en las fricciones del mercado, en términos de costos de transacción, regulación y liquidez. En consecuencia, el proceso de la formación de precios en el mercado físico del petróleo no sólo se verá afectado por su propia información, sino también por la información generada en los mercados de futuros del petróleo de referencia internacional. Estudios sobre efectos de transmisión de información han documentado que la dinámica de la volatilidad depende del arribo de nueva información al mercado. De esta manera, la información del mercado de futuros se puede agregar en el proceso de la volatilidad del mercado físico del petróleo (Zhong *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2008; Han *et al.*, 2013).

Por otra parte, los patrones de transmisión de volatilidad ocurren en el momento que un mercado de futuros experimenta cambios en su volatilidad y su impacto desfasado genera por ende volatilidad en otro mercado, esto es, choques inesperados que desestabilizan los precios del petróleo. Desde que los mercados físicos del petróleo de diferente calidad y grado de densidad han alcanzado un alto grado de integración, el interés por entender y analizar la magnitud de los efectos de la transmisión de información sobre rendimientos y volatilidades a través del tiempo y mercados ha aumentado en la literatura económica-financiera. En la actualidad, el estudio de los mecanismos de transmisión de volatilidad entre mercados tiene importantes consecuencias para los productores, consumidores, diseñadores de la política energética e

⁴ Debido a las propiedades de alta densidad y bajo contenido de azufre del petróleo, es importante resaltar que en estas bolsas se comercializan contratos de futuros sobre petróleo de referencia internacional como el West Texas Intermediate de Estados Unidos (WTI) y el Brent de Mar del Norte de Londres.

inversionistas, puesto que es la base para el desarrollo de modelos de valuación de activos y productos derivados, la predicción de precios futuros y el diseño de estrategias de coberturas.

El objetivo del presente trabajo es identificar los patrones de flujos de información entre los mercados físicos y de futuros del petróleo a través del mecanismo de transmisión de la media y volatilidad. El estudio pretende contestar las siguientes cuestiones: ¿El mecanismo de transmisión de la media y volatilidad nos permita entender mejor cómo los mercados físicos y de futuros intercambian los flujos de información? ¿La volatilidad de un mercado internacional altamente líquido podría incrementar la volatilidad de un mercado menos líquido?

El estudio también contribuye a la literatura de la siguiente forma: los estudios sobre transmisión de información de la media y volatilidad entre mercados de futuros sobre petróleo de referencia internacional y mercados físicos de petróleo de baja calidad, es todavía muy escasa, por lo que se usaron datos diarios sobre el precios del petróleo Maya, Istmo, Olmeca, así como los precios de los futuros del petróleo WTI y Brent durante el periodo del 3 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2015. Otra contribución podría ser que el estudio propone un modelo VEC-EGARCH bivariado, debido a que las ventajas de aplicar el modelo se refieren a que es una nueva forma de analizar la transmisión de choques informacionales⁵ a través de los primeros y segundos momentos condicionales. Asimismo, el modelo permite capturar los efectos asimétricos en la volatilidad, que omiten generalmente los modelos GARCH-BEKK.

De igual forma, los resultados empíricos revelan la existencia de efectos bilaterales de transmisión de información de la media entre los mercados físicos y de futuros del petróleo. Asimismo, evidencia de efectos de transmisión de volatilidad bilaterales entre los mercados de futuros y el mercado físico del petróleo del Olmeca. Aunque con efectos más fuertes que van del mercado WTI hacia el Olmeca y del mercado Olmeca hacia el Brent. En este sentido, los mercados de futuros del petróleo tienen efectos desestabilizantes sobre los mercados físicos del petróleo mexicano, los cuales pueden ser aprovechados por las autoridades gubernamentales y los consumidores para crear óptimas estrategias de cobertura cruzada que coadyuven en la reducción de la exposición al riesgo de precios del petróleo mexicano.

⁵ Un choque informacional es un evento que puede afectar de manera importante a los precios o a la volatilidad en los mercados de energía.

El resto del trabajo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se discute la literatura relacionada; mientras que en la sección 3 se explica la metodología utilizada en el trabajo; la sección 4 describe y proporciona un análisis de los datos; la sección 5 presenta la evidencia empírica, y finalmente, se presentan las conclusiones a las que se llegaron.

2. LITERATURA REVISADA

Hasta el momento la mayoría de la literatura que estudia los patrones de la transmisión de volatilidad, se ha restringido a los mercados accionarios y cambiarios. Sin embargo, con el acelerado proceso de globalización y la evolución del grado de integración entre los mercados físicos del petróleo, los académicos, inversionistas institucionales y diseñadores de la política energética han renovado su interés por entender los efectos de la transmisión de información sobre los rendimientos y las volatilidades a través de los mercados.

En este sentido, Lin y Tamvakis (2001) estimaron modelos ARCH y GARCH estándar utilizando los contratos de futuros del petróleo WTI y Brent con el vencimiento más próximo. Sus hallazgos revelan evidencia concluyente de efectos de transmisión de información cuando los mercados operan simultáneamente y los precios en el mercado de Londres son afectados por los precios de cierre del mercado de Nueva York.

Ewing *et al.* (2002) analizaron los patrones de transmisión de la volatilidad entre mercados del petróleo y gas natural del 1 de abril de 1996 al 29 de octubre de 1999 a través una parametrización BEKK para el modelo GARCH (1,1) multivariado. Los resultados demostraron que existen vestigios de transmisión de volatilidad directa e indirectamente de un mercado al otro. En un estudio para cinco mercados de energía nacionales e internacionales de Estados Unidos de América, Hammoudeh *et al.* (2003) evidencian que la transmisión de volatilidad suele ser más frecuente y significativa, entre los mercados físicos y de futuros utilizando los contratos con vencimientos a uno y tres meses, con el modelo GARCH, a diferencia de la transmisión de la media a través del modelo VEC.

Utilizando datos de frecuencia alta, Lin y Tamvakis (2004) refuerzan sus previos resultados al confirmar que la bolsa de Nueva York es el principal fijador de precios en los futuros de petróleo ligero y dulce, y su efecto dominante repercute en los contratos negociados en la bolsa de Londres.

Bajo un modelo GARCH-BEKK estructural, Spargoli y Zagaglia (2007) analizaron las correlaciones entre los mercados de futuros sobre petróleo ligero

y dulce en el periodo del 26 de abril de 1993 al 26 de abril de 2007. Los resultados del estudio destacan la rápida reacción de la bolsa de Nueva York a la llegada de nueva información al mercado en comparación con la bolsa Intercontinental de Europa (ICE).

De la misma manera, Chang *et al.* (2009) estudiaron las relaciones de las volatilidades y correlaciones condicionales entre los rendimientos de los precios de contado, *forward* y futuros para los principales marcadores del petróleo (WTI, Brent y Dubái). Los hallazgos evidencian transmisión de volatilidad y efectos de asimetría en la volatilidad condicional para cada uno de los mercados analizados.

En un estudio que incluye a el petróleo Tapis de Malasia, Chang *et al.* (2010) encontraron evidencia sobre la transmisión de volatilidad del mercado de futuros del Brent hacia sus propios mercados físico y *forward*, del mercado físico Brent hacia el mercado físico WTI y del mercado de futuros del WTI hacia el mercado físico Brent. Además, la presencia de efectos de transmisión de volatilidad de los mercados del petróleo WTI y Brent hacia los mercados físicos, *forward* y de futuros de los petróleos Dubái y Tapis. Este hallazgo reafirma a los mercados de petróleo ligero y dulce como los principales marcadores internacionales para la fijación del precio crudo de baja calidad.

Kang *et al.* (2011) analizaron los efectos de los cambios estructurales en la volatilidad, y los incorpora en una estructura GARCH-BEKK a fin de entender mejor el intercambio de información y transmisión de la volatilidad en los mercados físicos del WTI y Brent. Los resultados revelan que la relajación de los cambios estructurales puede alterar la dirección del flujo de información y el mecanismo de transmisión de volatilidad entre los mercados de petróleo de referencia internacional.

Por medio de la estimación de un modelo VAR-GARCH-BEKK, Jin *et al.* (2012) encuentran evidencia empírica de cómo la volatilidad es transmitida a través de los principales mercados de futuros del petróleo WTI, Brent y Dubái en el periodo de julio de 2005 a febrero de 2011. Además, los hallazgos muestran importantes patrones de transmisión de información de que el Brent es el más sensible a los choques de mercado, debido a su importante posición como marcador para la fijación de los precios del petróleo.

En un estudio reciente, Sehgal *et al.* (2013) analizan los efectos de transmisión de volatilidad entre precios físicos y de futuros y entre precios de futuros del WTI negociados en las plataformas NYMEX, ICE y MCX.⁶ Sus resultados

⁶ MCX es la principal bolsa de múltiples productos básicos en la India.

confirman la presencia de transmisión de volatilidad en el largo plazo de la ICE hacia la MCX y de la MCX hacia la NYMEX. Aunque el efecto parece ser más fuerte de la NYMEX hacia la ICE y MCX, lo que confirma su posición dominante en el mercado del petróleo. En tanto que la ICE y la MCX mantienen el mismo nivel competitivo en el mercado global del WTI.

Finalmente, Soucek y Todorova (2014) proponen un modelo autorregresivo heterogéneo multivariado (VHAR), y analizan los patrones de transmisión de volatilidad en los mercados de futuros de energía (ICE). Los resultados revelan choques de corto plazo en la volatilidad de los futuros del Brent que afectan de manera importante a la volatilidad de los futuros del gasóleo. Además, la principal fuente de transmisión de volatilidad del petróleo y gasóleo hacia el gas natural es el componente de la volatilidad de largo plazo.

3. METODOLOGÍA ECONOMETRICA

En esta sección se describirá el modelo VEC-EGARCH bivariado que explica el efecto de transmisión de la media y volatilidad.

3.1 Modelo EGARCH bivariado con término de corrección de error

De acuerdo con la literatura, la presencia de efectos asimétricos en la volatilidad es ampliamente confirmada en los mercados accionarios de países industrializados y emergentes. Sin embargo, la evidencia para mercados del petróleo requiere ser verificada. Por ello, este estudio extiende el modelo EGARCH de Nelson (1991) a una estructura multivariada para analizar la naturaleza de los mecanismos de transmisión de la media y volatilidad entre los mercados del petróleo.

Para el análisis de los patrones de transmisión de información de precios, los rendimientos físicos y de los futuros del petróleo se consideró si son afectados por sus propios términos y los términos de los otros rendimientos, pero desfasados, así como por el término de corrección de error.

Las ecuaciones de las medias condicionales se especifican a través de los modelos de vectores de corrección de error de la siguiente manera:

$$R_{S,t} = \mu_{S_0} + \sum_{j=1}^m \alpha_{S_{1,j}} R_{S,t-j} + \sum_{j=1}^m \alpha_{S_{2,j}} R_{F,t-j} + \alpha_{S_3} (P_{S,t-1} - \lambda_0 - \lambda_1 P_{F,t-1}) + \varepsilon_{S,t} \quad (1)$$

$$R_{F,t} = \mu_{F_0} + \sum_{j=1}^m \alpha_{F_{1,j}} R_{F,t-j} + \sum_{j=1}^m \alpha_{F_{2,j}} R_{S,t-j} + \alpha_{F_3} (P_{S,t-1} - \lambda_0 - \lambda_1 P_{F,t-1}) + \varepsilon_{F,t} \quad (2)$$

donde $R_{S,t}$ y $R_{F,t}$ son los rendimientos de los precios físicos y de futuros del petróleo, es decir, $S = \text{Maya, Istmo, Olmeca}$ y $F = \text{WTI, Brent}$. $P_{S,t}$ y $P_{F,t}$ son los precios logarítmicos de S y F en la fecha t , respectivamente. Además, $\alpha_{S_{1,j}}$ y $\alpha_{F_{1,j}}$ son los coeficientes de los efectos propios de los rendimientos desfasados. $\alpha_{S_{2,j}}$ y $\alpha_{F_{2,j}}$ miden los efectos indirectos de la media para los rendimientos físicos y de futuros. α_{S_3} y α_{F_3} son los coeficientes que miden la velocidad de ajuste de precios entre los mercados físicos y de futuros del petróleo o rapidez con la que se corrigió la discrepancia en el equilibrio de largo plazo. Ψ_{t-1} es el conjunto de información disponible en el tiempo $t-1$. $\varepsilon_t = (\varepsilon_{S,t}, \varepsilon_{F,t})$ son los residuales de las medias condicionales, tal que $\varepsilon_t | \Psi_{t-1} \sim N(0, H_t)$. $H_t = \{h_{S,t}, h_{F,t}, h_{SF,t}\}$ se define como la matriz de varianza-covarianza condicional.

Dado que la volatilidad es importante para entender mejor el proceso de transmisión de información entre los mercados físicos y de futuros del petróleo cuando existen efectos de asimetría. Las ecuaciones de las varianzas condicionales se definen de la siguiente manera:

$$\log h_{S,t}^2 = \phi_{S_0} + \phi_{S_1} g_S(\xi_{S,t-1}) + \phi_{S_2} \log h_{S,t-1}^2 + \phi_{S_3} g_F(\xi_{F,t-1}) + \phi_{S_4} \log h_{F,t-1}^2 + \beta_{S_0} (P_{S,t-1} - \lambda_0 - \lambda_1 P_{F,t-1})^2 \quad (3)$$

$$\log h_{F,t}^2 = \phi_{F_0} + \phi_{F_1} g_F(\xi_{F,t-1}) + \phi_{F_2} \log h_{F,t-1}^2 + \phi_{F_3} g_S(\xi_{S,t-1}) + \phi_{F_4} \log h_{S,t-1}^2 + \beta_{F_0} (P_{S,t-1} - \lambda_0 - \lambda_1 P_{F,t-1})^2 \quad (4)$$

$$g_j(\xi_{j,t-1}) = |\xi_{j,t-1}| - E[|\xi_{j,t-1}|] + \delta_j \xi_{j,t-1} \quad (5)$$

donde $j = S, F$ y $\xi_{j,t-1} = \varepsilon_{j,t-1} / h_{j,t-1}$ son los residuales estandarizados. Además, ϕ_{S_1} y ϕ_{F_1} miden el nivel de persistencia de corto plazo o efectos propios directos de transmisión de choques. Los parámetros ϕ_{S_3} y ϕ_{F_3} miden los efectos de transmisión de volatilidad de mercado cruzado de corto plazo en los rendimientos de los precios físicos y de futuros del petróleo, respectivamente. De esta manera, la volatilidad condicional no sólo será afectada por choques en los residuales pasados de su propio mercado, sino también por choques de los otros mercados. ϕ_{S_2} y ϕ_{F_2} cuantifican el grado de persistencia de largo plazo en la volatilidad. Un valor cercano a uno indica que alta volatilidad es seguida por volatilidad más grande en la misma dirección.

Por su parte, ϕ_{S_4} y ϕ_{F_4} miden los efectos de transmisión de volatilidad de mercado cruzado de largo plazo en cada uno de los mercados físicos y de futuros. Los parámetros β_{S_0} y β_{F_0} recogen los efectos de las desviaciones temporales en la relación de equilibrio, los cuales afectan a la varianza condicional porque el incremento en el diferencial entre las dos variables genera incertidumbre e incrementa la volatilidad (Lee, 1994).

La presencia del efecto de asimetría en la volatilidad condicional, es determinada por la ecuación (5) cuando el parámetro δ_j es significativamente diferente de 0. Si las derivadas parciales de la función $g(\xi_{j,t})$ se toman con respecto a $\xi_{j,t}$ se tiene que

$$\frac{\partial g(\xi_{j,t})}{\partial \xi_{j,t}} = \begin{cases} 1 + \delta_j, \xi_j > 0 \\ -1 + \delta_j, \xi_j < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Los términos $|\xi_{j,t}| - E[|\xi_{j,t}|]$ y $\delta_j \xi_{j,t}$ miden los efectos de tamaño y signo correspondiente, respectivamente. Si $\delta_j < 0$, la innovación⁷ negativa fortalece el efecto de tamaño, mientras que el efecto de tamaño es neutralizado cuando $\delta_j > 0$. Esto significa que las innovaciones negativas incrementarán más la volatilidad que innovaciones positivas de la misma magnitud. Asimismo, la evaluación de la importancia de la asimetría o efectos de apalancamiento es medido por $|-1 + \delta_j| / (1 + \delta_j)$.

7

El término innovación es otra forma de expresar la existencia de choques positivos y negativos en los rendimientos. Además, la presencia de choques positivos y negativos de la misma magnitud tiene diferente efecto en la volatilidad.

Las covarianzas son determinadas de la siguiente manera:

$$h_{SF,t} = \rho \times \sqrt{h_{S,t}} \times \sqrt{h_{F,t}} \quad (7)$$

donde ρ es la correlación condicional constante.

Finalmente, el método de cuasi-máxima verosimilitud se emplea para estimar los parámetros de la función de verosimilitud logarítmica

$$L(\theta) = -T \log 2\pi - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \ln |H_t(\theta)| - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \varepsilon_t'(\theta) H_t^{-1}(\theta) \varepsilon_t(\theta) \quad (8)$$

donde θ es el vector de parámetros del modelo y T indica el número de observaciones.

4. DATOS Y ANÁLISIS PRELIMINAR PARA CADA MERCADO DEL PETRÓLEO

La información utilizada para el estudio está constituida por las series de los precios físicos diarios de la canasta de crudos mexicanos: Maya, Istmo y Olmeca.⁸ Los precios de cierre diarios de los futuros de petróleo de referencia internacional –WTI y Brent– que cotizan en las bolsas de Nueva York y Londres. No obstante, de que la fecha de entrega de los contratos de futuros se lleva a cabo en ciclos mensuales; no significa que es continúa. Por consiguiente, en la construcción de las series de los precios de los futuros se emplea la regla habitual de la literatura, que consiste en utilizar el contrato de futuros con vencimiento más próximo. Asimismo, para evitar los efectos de precios volátiles derivados de la expiración del contrato y la falta de liquidez en el mercado,⁹ el proceso de transición al segundo contrato de futuros con vencimiento más próximo se lleva a cabo una semana antes del último día de operación del contrato de futuros actual.

⁸ Esta canasta de crudos sirve como principal marcador para la fijación del precio de la Mezcla Mexicana de Exportación.

⁹ En la medida que el contrato de futuros se aproxima a su fecha de expiración, la concentración de la actividad del mercado se mueve inmediatamente al segundo contrato de futuros con vencimiento más cercano, lo que incrementa automáticamente su volumen de operación e interés abierto.

La muestra para el análisis cubre el periodo del 3 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2015, totalizando 4 114 observaciones. Para la estandarización de las series de los precios físicos y de futuros se utiliza el método de interpolación de Lagrange, el cual estima los datos que no están disponibles debido a los días festivos o días no laborables en un mercado determinado. Es importante destacar que todas las series financieras se obtuvieron de la base de datos de Bloomberg.

Para los propósitos del análisis, ambas series de precios son transformadas en series de rendimientos continuos de la siguiente manera: $R_t = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1})$. En el cuadro 1 se reportan las estadísticas básicas de rendimientos y resultados de las pruebas de raíz unitaria, autocorrelación y cointegración. Tal como se muestra en el Panel A, todos los valores de las medias son positivos, pero pequeños con respecto a las desviaciones estándar que alcanzan valores entre 2.19-2.49%. Este hecho indica una relación rendimiento-riesgo positiva y una mayor exposición al riesgo para los participantes en los mercados del petróleo, en particular para los crudos Istmo y Maya. Asimismo, todas las series de rendimientos revelan sesgo negativo y exceso de curtosis, lo que conlleva al rechazo del supuesto de normalidad debido a la presencia de observaciones extremas y al alto valor del estadístico Jarque-Bera.

Los resultados de la prueba de Ljung-Box, $Q(20)$ confirman la fuerte presencia de correlación serial en cada una de las series de los rendimientos del petróleo. Este hallazgo sugiere una mejor especificación de la ecuación de la media condicional para capturar este fenómeno. Con respecto al comportamiento de la volatilidad, los resultados del estadístico $Q^2(20)$ proporcionan evidencia convincente de heterocedasticidad condicional en los rendimientos cuadrados de los cinco mercados del petróleo y la necesidad de la estimación de un modelo GARCH para su modelación apropiada.

Las condiciones de estacionariedad en las series de los precios y rendimientos son validadas con las pruebas de raíz unitaria de Dickey-Fuller y Phillips-Peron, y sus resultados se reportan en el Panel B del cuadro 1. Los valores negativos cercanos a cero y no significativos de los estadísticos son débiles para rechazar la hipótesis nula al 1%, lo cual indica que todas las series de los precios logarítmicos tienen una raíz unitaria o son integrados de orden uno, $I(1)$. Este hallazgo puede confirmar la existencia de una relación estacionaria lineal entre dos series no estacionarias, es decir, entre los precios físicos y de futuros. En el caso de las primeras diferencias, los grandes valores negativos rechazan la hipótesis nula de raíz unitaria, lo que confirma que las series de los rendimientos se comportan como un proceso estacionario.

Cuadro 1. Estadísticas básicas y pruebas de raíces unitarias y cointegración

	Maya	Istmo	Olmeca	WTI	Brent
Panel A: Estadísticas Básicas					
Media	0.0080	0.0105	0.0103	0.0089	0.0096
Mínimo	-22.0316	-22.4611	-16.0214	-16.5474	-14.4478
Máximo	14.7619	16.8412	14.3542	16.4132	12.7145
Desviación	2.4841	2.4971	2.2991	2.3745	2.1942
Sesgo	-0.1793	-0.3968	-0.1781	-0.2029	-0.2546
Curtosis	9.0252	9.5351	6.9354	7.4472	6.3674
Jarque-Bera	6244*	7428*	2676*	3418*	1988*
Q(20)	49.11*	60.15*	46.49*	48.62*	51.35*
Q ² (20)	2 100.86*	1 527.43*	1 955.05*	2 131.22*	1 870.94*
Panel B: Pruebas de Raíz Unitaria					
Niveles					
Dickey-Fuller	-0.54	-0.96	-0.89	-1.10	-0.46
Phillips-Perron	-0.45	-0.82	-0.70	-0.92	-0.37
Primeras Diferencias					
Dickey-Fuller	-28.62*	-29.57*	-29.55*	-29.65*	-29.22*
Phillips-Perron	-64.53*	-67.78*	-66.26*	-66.61*	-68.08*
		λ0	λ1	Dickey-Fuller	Phillips-Perron
Panel C: Prueba de Cointegración					
Maya-WTI		-1.1600(0.0148)	1.2402(0.0036)	-4.3484*	-4.9395*
Istmo-WTI		-0.5748(0.0102)	1.1310(0.0025)	-5.5446*	-7.5693*
Olmeca-WTI		-0.3509(0.0079)	1.0899(0.0019)	-5.6832*	-7.4445*
Maya-Brent		-0.7245(0.0096)	1.1278(0.0023)	-5.0392*	-6.2514*
Istmo-Brent		-0.5748(0.0102)	1.1310(0.0025)	-5.5447*	-7.5694*
Olmeca-Brent		-0.3509(0.0079)	1.0899(0.0019)	-5.6834*	-7.4445*

Nota: Jarque-Bera corresponde a la prueba estadística de la hipótesis nula de normalidad en la distribución de rendimientos; Q(20) y Q²(20) indican los estadísticos de la prueba de Ljung-Box para los rendimientos simples y cuadrados con 20 rezagos; el término * indica rechazo de la hipótesis nula a un nivel de significancia de 1%. Los valores entre paréntesis son los errores estándar de los parámetros estimados de la prueba de cointegración.

Fuente: elaboración propia con información de la base de datos de Bloomberg.

Para investigar la existencia de la relación de cointegración se aplicó la metodología de Engle-Granger en dos pasos.¹⁰ En el Panel C se muestran los resultados de la relación de equilibrio de largo plazo entre los logaritmos de los precios físicos y de futuros del petróleo. Los parámetros estimados de la prueba de cointegración son estadísticamente significativos y se encuentran por arriba de uno para λ_1 con errores estándar pequeños. Además, la cointegración para cada par de series de precios logarítmicos es confirmada por el valor del estadístico de las pruebas de Dickey- Fuller y Phillips-Perron a un nivel de significancia de 1%, lo que indica que las series de los residuales son estacionarias o integradas de orden cero, $I(0)$. Estos hallazgos son importantes para el estudio porque constatan los estrechos vínculos informacionales entre los precios físicos y de futuros del petróleo a través de sus diferentes plataformas de negociación. De esta manera, es importante incorporar el término de corrección de error en las ecuaciones de las medias y varianzas condicionales del modelo EGARCH bivariado.

5. EVIDENCIA EMPÍRICA

5.1 Transmisión de información a través de los rendimientos y volatilidad

Utilizando las series de rendimientos de los precios físicos y las series de rendimientos de los precios de futuros, este estudio estima 12 especificaciones VEC-EGARCH bivariadas para analizar los mecanismos de transmisión de información de la media y volatilidad entre mercados físicos del petróleo mexicano y mercados de futuros de petróleo.

En el cuadro 2, de acuerdo con la especificación de la media condicional, la significancia estadística de los parámetros estimados $\alpha_{s_{i,j}}$ revela que los rendimientos actuales de los petróleos Maya, Istmo y Olmeca son directamente afectados por sus propios rendimientos desfasados un periodo. El número de rezagos en la ecuación de la media fue seleccionado de acuerdo al criterio de información de Akaike.

En términos de la transmisión de información de los efectos indirectos de la media, los rendimientos del petróleo mexicano son afectados positivamente

¹⁰ Para una descripción técnica más detallada del método de cointegración, véase Engle y Granger (1987).

por los rendimientos de los futuros del WTI y Brent, excepto para la relación WTI→Olmeca. Todos los coeficientes $\alpha_{S_{2,j}}$ son estadísticamente significativos a un nivel de 1%. La reacción más alta de mercado ante un cambio en los precios de los futuros se observa en las relaciones WTI→Istmo, WTI→Maya y Brent→Istmo con valores del 0.7824, 0.7605 y 0.5258, respectivamente. Mientras que el efecto es más débil en la relación WTI→Olmeca con un valor de -0.1847. Estos resultados indican que la información generada en los mercados de futuros del WTI y Brent se transmite rápidamente a los mercados del petróleo mexicano. Este hecho es alimentado por el importante papel de los mercados de futuros para asimilar las expectativas de mercado, y reflejarlas eficientemente en la formación y predicción de los precios futuros. Además, la ineficiencia y falta de liquidez en el mercado del petróleo mexicano lo obliga a actuar como tomador de precios en lugar de marcarlos, lo que implica una dependencia cada vez mayor de los mercados internacionales para fijar sus precios de venta al exterior, a pesar de ser un país productor de petróleo con una alta capacidad de producción.

Los coeficientes estimados α_s en el modelo VEC determinan la velocidad de ajuste de precios para alcanzar la relación de equilibrio de largo plazo entre los mercados físicos y de futuros del petróleo. La carencia de significancia en los resultados revela la ausencia de ajuste entre los precios del Maya e Istmo y las desviaciones de la relación de equilibrio de largo plazo, excepto para las relaciones Brent→Olmeca (1.0214) y WTI→Olmeca (1.0159) a un nivel de 1 y 5%, respectivamente. La razón de este hallazgo se atribuye a las características físico-químicas similares entre el crudo Olmeca y los petróleos de referencia internacional, porque los precios Olmeca se ajustan y reaccionan a los desequilibrios entre los precios físicos y de futuros cuando el sistema de precios presenta diferenciales estrechos. Por otra parte, los precios de los petróleos Istmo y Maya generalmente no reaccionan a la presencia de desviaciones temporales en la relación de equilibrio de largo plazo en el periodo anterior cuando los coeficientes del término de corrección de error son negativos o cercanos a cero, porque los precios físicos requieren de un incremento importante para mantener el equilibrio del mercado.

Cuadro 2. Parámetros estimados del modelo VEC-EGARCH biviariado

	<i>WTI</i> → <i>Maya</i>	<i>WTI</i> → <i>Istmo</i>	<i>WTI</i> → <i>Olmeca</i>	<i>Brent</i> → <i>Maya</i>	<i>Brent</i> → <i>Istmo</i>	<i>Brent</i> → <i>Olmeca</i>
Panel A: Ecuaciones de la media condicional						
μ_{S_0}	-0.0022 (0.0052)	-0.0011 (0.0042)	0.0020 (0.0300)	-0.0004 (0.0128)	0.0021 (0.0104)	0.0146 (0.0138)
$\alpha_{S_{1,j}}$	0.0541* (0.0150)	0.0738* (0.0161)	0.2395* (0.0196)	0.0833* (0.0167)	0.0790* (0.0159)	0.2655* (0.0174)
$\alpha_{S_{2,j}}$	0.7605* (0.0802)	0.7824* (0.0611)	-0.1847* (0.0177)	0.4282* (0.1475)	0.5258* (0.1339)	0.2391* (0.0613)
α_{S_3}	0.0007 (0.0412)	-0.0229 (0.0493)	1.0159** (0.4425)	0.2465 (0.1754)	0.1503 (0.2073)	1.0214* (0.4008)
Panel B: Ecuaciones de la varianza condicional						
ϕ_{S_0}	-0.0589* (0.0071)	-0.0608* (0.0079)	-0.0453* (0.1195)	-0.0560* (0.0058)	-0.0603* (0.0059)	-0.0557* (0.0065)
ϕ_{S_1}	0.0894* (0.0100)	0.0937* (0.0108)	0.0740* (0.0103)	0.0816* (0.0079)	0.0886* (0.0080)	0.0868* (0.0091)
ϕ_{S_2}	0.9942* (0.0024)	0.9927* (0.0029)	0.9909* (0.0030)	0.9973* (0.0017)	0.9951* (0.0022)	0.9901* (0.0027)

ϕ_{S_3}	0.0007** (0.0004)	0.0004 (0.0004)	0.0026* (0.0005)	0.0006 (0.0004)	0.0003 (0.0004)	0.0017* (0.0006)
ϕ_{S_4}	-0.0008 (0.0005)	-0.0005 (0.0006)	-0.0021* (0.0007)	-0.0010** (0.0005)	-0.0004 (0.0005)	-0.0012*** (0.0008)
β_{S_0}	-0.0109 (0.0508)	-0.0303 (0.1048)	-0.2978*** (0.1688)	-0.0513 (0.0813)	-0.1291 (0.2442)	-0.6690 (0.6428)
δ_S	-0.4872* (0.0703)	-0.4578* (0.0630)	-0.5057* (0.0887)	-0.4332* (0.0609)	-0.4001* (0.0597)	-0.4200* (0.0668)
δ_{S_F}	-0.2995* (0.0546)	-0.5808* (0.0947)	-0.5132* (0.0927)	-0.2523** (0.0477)	-0.3034* (0.0721)	-0.2367* (0.0785)

Panel C: Pruebas de Ljung-Box para autocorrelación

Q(18)	5.9854[0.9963]	7.0910[0.9893]	11.2074[0.8853]	9.1816[0.9807]	10.6756[0.9542]	10.3072[0.9838]
Q ² (18)	19.2682[0.3755]	20.2239[0.3204]	20.4170[0.3098]	32.9567[0.0341]	34.6429[0.0221]	23.5526[0.1102]

Nota: Q(18) y Q²(18) indican los estadísticos de la prueba de Ljung-Box para los residuales simples y cuadrados con 18 rezagos y valores-p entre corchetes cuadrados. Los términos *, ** y *** indican significancia para los niveles de 1, 5 y 10%, respectivamente. Los errores estándar se reportan entre paréntesis.

Fuente: elaboración propia con información de la base de datos de Bloomberg.

Para el caso de las estimaciones de la ecuación de la varianza condicional reportados en el Panel B, la significancia de los parámetros estimados ϕ_{s_1} revela la existencia de efectos ARCH en los mercados del petróleo mexicano. Este resultado implica que las innovaciones pasadas tienen un efecto positivo e importante sobre la volatilidad actual de los precios del petróleo mexicano. Para los efectos cruzados de la transmisión de volatilidad en el corto plazo, la significancia de los parámetros ϕ_{s_3} sólo indica efectos de propagación de volatilidad en las relaciones WTI→Maya, WTI→Olmeca y Brent→Olmeca a un nivel de 1 y 5%, con fuertes impactos positivos que van del WTI y Brent hacia el Olmeca. Este resultado indica que los mercados del petróleo Maya y Olmeca son evidentemente vulnerables, no sólo por sus propias noticias del mercado, sino también por los choques inesperados de los mercados de futuros del petróleo de referencia internacional. Este hallazgo se puede atribuir al mecanismo adoptado por las autoridades gubernamentales para fijar los precios regulados del petróleo mexicano, puesto que México como productor de petróleo es tomador de precios por naturaleza en lugar adoptar la posición de marcador.

Con respecto a los efectos directos de largo plazo, todos los coeficientes estimados ϕ_{s_2} son estadísticamente significativos al 1%, lo que indica una fuerte evidencia de persistencia en la volatilidad. La volatilidad pasada de los mercados físicos del petróleo afecta de manera importante a la volatilidad actual y requiere de bastante tiempo para decaer. Este hecho se refleja más en las relaciones Brent→Maya (0.9973) y WTI→Maya (0.9942), y que se puede atribuir a las diferentes propiedades físicas-químicas entre el Maya (22 grados API y 3.3% de azufre) y el WTI (40 grados API y 0.2% de azufre) y Brent (38 grados API y 0.4% de azufre). Por lo que sus cotizaciones son más altas en los mercados internacionales y los diferenciales de precios más amplios.

En el caso de los efectos de mercado cruzado de largo plazo, la significancia de los coeficientes estimados ϕ_{s_4} en los niveles convencionales revelan la existencia de transmisión de volatilidad de los mercados de futuros del WTI y Brent hacia los mercados físicos del Maya y Olmeca. En términos absolutos, los efectos más fuertes van del WTI y Brent hacia el Olmeca, seguido por la relación Brent→Maya. Este hallazgo revela que la presencia de alta volatilidad aunado a los efectos de mercado cruzado de corto y largo plazos, originaran creciente incertidumbre en los precios actuales del petróleo físico, en particular para el crudo Olmeca, a pesar de que el signo del coeficiente es negativo. Esto es debido a que el valor del coeficiente de los efectos de mercado cruzado de corto plazo es relativamente más grande al del coeficiente de los efectos de mercado cruzado de largo plazo en los respectivos mercados del petróleo, lo

que implica que los efectos ARCH indirectos son más importantes para la predicción de la volatilidad futura de los precios físicos que los efectos GARCH indirectos.

Asimismo, el efecto de asimetría directo y de los mercados de futuros hacia los mercados físicos del petróleo, medido por los parámetros δ_S y δ_{S_F} , es significativamente diferente de cero. Este hallazgo indica que las noticias negativas tendrán mayor impacto en la volatilidad que las noticias buenas. El efecto de asimetría de las noticias malas del mercado de futuros del WTI es 1.86, 3.77 y 3.11 veces con respecto al impacto de las noticias buenas en los mercados del petróleo Maya, Istmo y Olmeca, respectivamente. Los efectos de apalancamiento del mercado de futuros del Brent sobre los mercados físicos del petróleo alcanzan valores de 1.67, 1.87 y 1.62 en el mismo orden. Este hallazgo explica por qué los diseñadores de la política energética en México se preocupan cuando la tendencia positiva de los precios cambia drásticamente de dirección en el corto plazo.

De acuerdo con la magnitud y significancia estadística de los parámetros β_{S_0} , que miden los efectos de las desviaciones de corto plazo en el equilibrio sobre la varianza condicional de los mercados físicos del petróleo, el término de corrección de error sólo tiene efecto negativo significativo para la relación WTI→Olmeca a un nivel de 10%. El valor negativo del coeficiente indica que en la medida que las desviaciones entre los precios físicos y de futuros del petróleo alcanzan valores grandes, la volatilidad en el mercado del petróleo Olmeca descenderá a un ritmo lento y el comportamiento de los precios será ligeramente menos volátil a través del tiempo.

Para el caso de los resultados estimados de los mercados de futuros reportados en el cuadro 3. Al igual que en los mercados físicos, los rendimientos actuales de los petróleos WTI y Brent son afectados por sus propios rendimientos desfasados un periodo. En el caso del mecanismo de transmisión de información de la media, la mayoría de los coeficientes $\alpha_{F_{2,j}}$ son positivos y significativos al 1%, lo que indica la existencia de efectos bilaterales entre los mercados físicos y de futuros del petróleo. Al comparar sus coeficientes se puede observar que $\alpha_{S_{2,j}} > \alpha_{F_{2,j}}$. Por ejemplo, el coeficiente de la relación WTI→Istmo tiene un valor de 0.7824 contra 0.4346 de la relación Istmo→WTI. Esto evidencia efectos más fuertes y rápidos de los mercados de futuros hacia los mercados físicos del Istmo y Maya, por lo que proporcionan mayor información, la cual es transmitida de un mercado al otro. En contraste, los cambios en el mercado del petróleo Olmeca tienen un efecto más fuerte en los mercados de futuros de acuerdo con el tamaño de su coeficiente esti-

mado, lo que implica más información para la fijación de los precios de los futuros en los respectivos mercados.

Existen dos factores externos que pueden explicar estos resultados. El primero se refiere a que México se colocó en el lugar 12 en la producción de petróleo a nivel mundial en 2015, con un volumen de extracción de aproximadamente 2 300 millones de barriles diarios de acuerdo con el *ranking* global de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP). La segunda justificación es que las exportaciones petroleras de México ascendieron a 427.9 millones de barriles con un valor aduanal de 18 524 millones de dólares aproximadamente, lo que mantiene a México en el cuarto lugar como proveedor neto de crudo a Estados Unidos por volumen después de Canadá, Arabia Saudita y Venezuela. Estas cifras son relevantes para el crecimiento de la economía doméstica porque México puede llegar a ejercer cierto control sobre los precios de referencia internacional al menos en el corto plazo y, al mismo tiempo, tener la capacidad para influir de forma directa y sensible en los precios de los petróleos de menor calidad.

El coeficiente α_{F_3} del término de corrección de error es negativo y estadísticamente significativo al 1% en todos los rendimientos de los futuros con la excepción de las relaciones Olmeca \rightarrow WTI y Olmeca \rightarrow Brent. La explicación de estos resultados se atribuye a la diferencia trascendental de las características físicas-químicas entre los petróleos Maya e Istmo y los crudos de referencia internacional. En este contexto, los precios de los futuros del WTI y Brent se ajustan y reaccionan a los desequilibrios entre los precios físicos y de futuros cuando el sistema de precios presenta grandes diferenciales, porque los precios de los futuros están sobrevaluados y requieren de un incremento importante para mantener el equilibrio en el largo plazo.

Asimismo, los hallazgos no apoyan la hipótesis de que los mercados físicos y de futuros del petróleo sigan una tendencia de integración progresiva. Existen varias causas que pueden explicar los resultados, tales como que los pequeños volúmenes de transacción en los mercados del petróleo mexicano, los costos de transacción y el diferencial de precios. Otros importantes factores de carácter interno se refieren al hecho de que la estructura del mercado de la industria del petróleo en México está completamente monopolizada por Petróleos Mexicanos (Pemex) y la falta de un mercado de futuros y opciones que sirva como mecanismo de cobertura transparente para la exposición al riesgo de precios del petróleo mexicano.

Los resultados de las ecuaciones de la varianza condicional para los rendimientos de los futuros del WTI y Brent son mostrados en el Panel B del cuadro 3. Los estimadores ϕ_{F_1} de los efectos ARCH son todos significativos

al 1% y positivos, lo que implica que las innovaciones pasadas tienen un efecto positivo e importante sobre la volatilidad actual de los precios de los futuros. Asimismo, la significancia estadística de los coeficientes ϕ_{F_2} revela la presencia de un alto grado de persistencia en la volatilidad. La justificación de este hallazgo está en línea con los altos volúmenes operados en los respectivos mercados de futuros. Estos instrumentos financieros no sólo se han incluido en los portafolios de inversión como alternativa para la diversificación del riesgo, sino también para propósitos de especulación, lo que ha originado creciente volatilidad en los últimos años.

En términos de los efectos de mercado cruzado de corto plazo, los resultados de los coeficientes ϕ_{F_3} revelan que choques inesperados de los mercados físicos del petróleo pueden afectar positivamente la evolución de la volatilidad actual en los mercados de futuros, lo que puede originar inestabilidad en los precios de los futuros, en particular en las relaciones Istmo→WTI, Maya→Brent e Istmo→Brent. La existencia de efectos de transmisión de volatilidad bilateral sólo es alcanzada en las relaciones WTI↔Olmeca y Brent↔Olmeca con derramamientos más fuertes, en términos de valor, que van del WTI y Brent hacia el Olmeca. Aunque los resultados son débiles por el error de especificación en la varianza condicional de los rendimientos de los futuros. Estos hallazgos son explicados por la capacidad de los mercados de futuros para asimilar rápidamente la información de eventos externos relacionados con la reforma energética mexicana.

Con respecto a los efectos de mercado cruzado de largo plazo, los coeficientes ϕ_{F_4} indican que el efecto de transmisión de volatilidad bilateral sólo ocurre en las relaciones WTI↔Olmeca y Brent↔Olmeca. En términos absolutos, el proceso de transmisión de volatilidad es más fuerte en las relaciones WTI→Olmeca y Olmeca→Brent que el efecto opuesto. Este hecho confirma la importante función de los mercados de futuros en el área de la transparencia de la información en el mercado del petróleo, así como la integración del mercado del petróleo Olmeca a través de plataformas para negociar futuros sobre crudo de referencia internacional. La explicación de los hallazgos se puede adjudicar a la apertura del sector energético, aprobada por el H. Congreso de la Unión, a la inversión extranjera para explorar aguas profundas y ultra profundas en el Golfo de México; al ingreso de México a la Agencia Internacional de Energía en noviembre de 2015, con el fin de iniciar su proceso de adhesión para mejorar el régimen petrolero y fiscal en materia extractiva.

Al igual que en los mercados físicos del petróleo, los efectos de asimetría directos e indirectos en la volatilidad de los rendimientos de los futuros son

Cuadro 3. Parámetros estimados del modelo VEC-EGARCH biviariado

	<i>Maya</i> → <i>WTI</i>	<i>Istmo</i> → <i>WTI</i>	<i>Olmeca</i> → <i>WTI</i>	<i>Maya</i> → <i>Brent</i>	<i>Istmo</i> → <i>Brent</i>	<i>Olmeca</i> → <i>Brent</i>
Panel A: Ecuaciones de la media condicional						
μ_{F_0}	-0.0003 (0.0284)	-0.0002 (0.0096)	-0.0045 (0.0167)	-0.0057 (0.0176)	-0.0032 (0.0079)	-0.0023 (0.0123)
$\alpha_{F_{1,j}}$	0.3157* (0.0170)	0.3180* (0.0160)	0.1466* (0.0207)	0.3829* (0.0189)	0.3322* (0.0177)	0.1550* (0.0211)
$\alpha_{F_{2,j}}$	-0.1812* (0.0177)	0.4346* (0.0362)	0.2811** (0.1303)	0.1685* (0.0460)	0.4966* (0.0323)	0.4352* (0.1011)
α_{F_3}	-0.8706* (0.2528)	-0.4443* (0.1328)	-0.2714 (0.2392)	-0.8223* (0.2361)	-0.2495* (0.0795)	-0.1496 (0.1694)
Panel B: Ecuaciones de la varianza condicional						
ϕ_{F_0}	-0.0888* (0.0071)	-0.0671* (0.0064)	-0.0468* (0.0059)	-0.0636* (0.0061)	-0.0360* (0.0044)	-0.0432* (0.0058)
ϕ_{F_1}	0.1431* (0.0105)	0.1183* (0.0108)	0.0740* (0.0084)	0.1074* (0.0101)	0.0608* (0.0071)	0.0697* (0.0084)
ϕ_{F_2}	0.9810* (0.0032)	0.9808* (0.0036)	0.9960* (0.0021)	0.9819* (0.0037)	0.9921* (0.0021)	0.9950* (0.0026)

ϕ_{F_3}	0.0002 (0.0007)	0.0017* (0.0005)	0.0011* (0.0004)	0.0024* (0.0007)	0.0034* (0.0005)	0.0016** (0.0007)
ϕ_{F_4}	0.0008 (0.0009)	-0.0008 (0.0008)	-0.0015* (0.0005)	-0.0007 (0.0011)	-0.0031* (0.0007)	-0.0018** (0.0008)
β_{F_0}	0.2712* (0.0732)	0.3056** (0.1245)	-0.3157* (0.1542)	0.2151*** (0.1175)	-0.0772 (0.0710)	-0.3648** (0.1568)
δ_S	-0.3117* (0.0443)	-0.3097* (0.0521)	-0.5073* (0.0759)	-0.4002* (0.0517)	-0.6508* (0.0982)	-0.5310* (0.0804)
δ_F	-0.4123* (0.0576)	-0.4398* (0.0789)	-0.5532* (0.1187)	-0.4212* (0.0654)	-0.7045* (0.0854)	-0.7120* (0.1145)

Panel C: Pruebas de Ljung-Box para autocorrelación

Q(18)	16.0119[0.5917]	17.8652[0.4646]	14.5888[0.6900]	9.8326[0.9372]	14.7590[0.6784]	15.3258[0.6395]
Q ² (18)	23.2305[0.1819]	20.7132[0.2941]	39.6453[0.0023]	21.3547[0.2619]	27.9984[0.0621]	42.4136[0.0010]

Nota: Q(18) y Q²(18) indican los estadísticos de la prueba de Ljung-Box para los residuales simples y cuadrados con 18 rezagos y los valores-p entre corchetes cuadrados. Los términos *, ** y *** indican significancia para los niveles de 1, 5 y 10%, respectivamente. Los errores estándar se reportan entre paréntesis.

Fuente: elaboración propia con información de la base de datos de Bloomberg.

estadísticamente significativos al 1%. Los efectos de apalancamiento de los mercados físicos del Maya, Istmo y Olmeca sobre los mercados de futuros alcanzan valores del 1.91, 1.90 y 3.06 para el WTI y del 2.33, 4.73 y 3.26 para el Brent, respectivamente. De acuerdo con la magnitud y significancia estadística de los parámetros β_{F_0} del término de corrección de error en la varianza condicional de los mercados de futuros. Los resultados revelan un efecto mixto, por ejemplo, positivo para las relaciones WTI→Maya, WTI→Istmo y Brent→Maya y negativo para las relaciones WTI→Olmeca y Brent→Olmeca. El valor positivo de los coeficientes indica que en la medida que las desviaciones entre los precios físicos y de futuros del petróleo alcanzan valores pequeños, la volatilidad en los mercados de futuros se incrementará a un ritmo acelerado, por lo que el comportamiento de los precios será más volátil a través del tiempo y, en consecuencia, su predicción será más difícil y viceversa.

Los hallazgos pueden ser relevantes para el gobierno federal y los consumidores industriales de petróleo mexicano, porque proporcionan importante información para el desarrollo de estrategias de coberturas cruzadas que coadyuven a mitigar la exposición al riesgo del precio del petróleo en periodos de extrema volatilidad. Además, estas operaciones financieras serán más transparentes y con bajos costos de transacción a diferencia de las coberturas con opciones de ventas, que se caracterizan por tener una estructura más peligrosa fomentada por la presencia del riesgo de incumplimiento de las contrapartes. Asimismo, el análisis de los patrones de transmisión de precios y volatilidad podría proporcionar información útil a la política energética para entender mejor la vulnerabilidad del mercado ante la apertura del sector petrolero a la inversión extranjera. La disponibilidad de esta información también podría ser de ayuda para los diseñadores de la política energética en la creación de políticas efectivas y un marco regulatorio sólido que garanticen la seguridad de la producción y las exportaciones netas de la canasta de crudos mexicanos y, por consiguiente, fomenten la competitividad y la sustentabilidad en el país con un mayor presencia en los mercados internacionales.

Sin embargo, los participantes en los mercados de futuros y físicos del petróleo deben tener cuidado porque los resultados son débiles para explicar los efectos de mercado cruzado de la volatilidad en el corto y largo plazo. Este hecho se atribuye a que algunas especificaciones de las varianzas condicionales no logran eliminar la autocorrelación en los residuales estandarizados cuadrados como se muestra en el Panel C de los cuadros 2 y 3. Los estadísticos de Ljung-Box con 18 rezagos indican la presencia de dependencia no-lineal en las innovaciones estandarizadas cuadradas para las relaciones Brent→Maya, Brent→Istmo, Olmeca→WTI y Olmeca→Brent. Este fenómeno caracterís-

tico de las series financieras, tal vez, puede ser relajado si en el modelo VEC-EGARCH bivariado se incorporan cambios estructurales.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza el proceso de la transmisión de información de la media y volatilidad entre mercados físicos del petróleo mexicano y mercados de futuros de referencia internacional –WTI y Brent– utilizando datos diarios del 3 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2015. La implementación del modelo VEC-EGARCH bivariado con correlaciones constantes es insuficiente para explicar el proceso de transmisión de volatilidad bilateral en los mercados físicos y de futuros del petróleo. De acuerdo con la significancia estadística de las estimaciones, la evidencia de transmisión de información de la media es bilateral con efectos más fuertes y rápidos de los mercados de futuros hacia los mercados del petróleo Istmo y Maya, aunque existen efectos fuertes y significativos que van del mercado del petróleo Olmeca hacia los mercados de futuros del WTI y Brent.

La respuesta de reacción a las desviaciones temporales del equilibrio de largo plazo es más rápida por parte del mercado físico del petróleo Olmeca que en lo que respecta a los mercados de futuros. En el caso de los efectos de mercado cruzado de corto y largo plazos, la evidencia de efectos de transmisión de volatilidad bilateral es sólo alcanzada en las relaciones $WTI \leftrightarrow Olmeca$ y $Brent \leftrightarrow Olmeca$ con efectos más fuertes y rápidos que van del WTI hacia el Olmeca en el largo plazo y del Olmeca hacia el Brent. Asimismo, la presencia de desviaciones en la relación de equilibrio de largo plazo intensifica más la volatilidad en los mercados de futuros que en los mercados físicos del petróleo, por lo que el término de corrección de error contiene importante información para la predicción de la volatilidad condicional. Los hallazgos empíricos tienen importantes implicaciones económicas-financieras para el gobierno, los consumidores y los diseñadores de la política energética. El conocimiento de la dirección del flujo de información e intensificación de la formación de volatilidad puede ayudar a mitigar la exposición al riesgo de precios en el petróleo mexicano a través del diseño de estrategias de cobertura cruzada y la creación de políticas efectivas cuidadosamente diseñadas que impulsen el ritmo de crecimiento económico y mejoren la calidad de vida de los mexicanos. En este estudio, el modelo VEC-EGARCH bivariado no tiene la capacidad para estimar correlaciones cambiantes en el tiempo. Este tipo de problema será tratado en una investigación futura.

BIBLIOGRAFÍA

- Brooks, C. y Prokopczuk, M. (2013), "The Dynamics of Commodity Prices", *Quantitative Finance*, vol. 13, núm. 4.
- Chang, C.L., McAleer, M. y Tansuchat, R. (2009), "Modeling Conditional Correlations for Risk Diversification in Crude Oil Markets", *Journal of Energy Markets*, vol. 2, núm. 4.
- _____, McAleer, M. y Tansuchat, R. (2010), "Analyzing and Forecasting Spillovers and Asymmetries in Mayor Crude Oil Spot, Forward and Futures Markets", *Working Paper* No. 19/2010.
- Cheng, W.H. y Hung, J.C. (2011), "Skewness and Leptokurtosis in GARCH-typed VaR Estimation of Petroleum and Metal Asset Returns", *Journal of Empirical Finance*, vol. 18, núm. 1.
- Engle, R. y Granger, C. (1987), "Co-integration and Error Correction: Representation, Estimation and Testing", *Econometrica*, vol. 55, núm. 2.
- Ewing, B., Malik, F. y Ozfiden, O. (2002), "Volatility Transmission in The Oil and Natural Gas Markets", *Energy Economics*, vol. 24, núm. 6.
- Geman, H. y Kharoubi, C. (2008), "WTI Crude Oil Futures in Portfolio Diversification: The Time-to-maturity Effect", *Journal of Banking & Finance*, vol. 32, núm. 12.
- Han, L., Liang, R. y Tang, K.E. (2013), "Cross-market Soybean Futures Price Discovery: does The Dalian Commodity Exchange Affect The Chicago Board of Trade?", *Quantitative Finance*, vol. 13, núm. 4.
- Hammoudeh, S., Li, H. y Jeon, B. (2003), "Causality and Volatility Spillovers Among Petroleum Prices of WTI, Gasoline and Heating Oil in Different Locations", *The North American Journal of Economics and Finance*, vol. 14, núm. 1.
- Jin, X., Xiaowen, S. y Tamvakis, M. (2012), "Volatility Transmission and Volatility Impulse Response Functions in Crude Oil Markets", *Energy Economics*, vol. 34, núm. 6.
- Kang, S.H., Cheong, C., y Yoon, S.M. (2011), "Structural Changes and Volatility Transmission in Crude Oil Markets", *Physica A*, vol. 390, núm. 23-24.
- Kroner, K.F., Kneafsey, K.P. y Claessens, S. (1995), "Forecasting Volatility in Commodity Markets", *Journal of Forecasting*, vol. 14, núm. 2.
- Lee, T.H. (1994), "Spread and Volatility in Spot and Forward Exchange Rates", *Journal of International Money and Finance*, vol. 13, núm. 3.
- Lin, S.X. y Tamvakis, M.N. (2001), "Spillovers Effects in Energy Futures Markets", *Energy Economics*, vol. 23, núm. 1.

- _____ y Tamvakis, M.N. (2004), "Effects of NYMEX trading on IPE Brent Crude Futures Markets: a Duration Analysis", *Energy Policy*, vol. 32, núm. 1.
- Liu, X., Cheng, S., Wang, S., Hong, Y. y Li, Y. (2008), "An Empirical Study on Information Spillover Effects between The Chinese Copper Futures Market and Spot Market", *Physica A*, vol. 387, núm. 4.
- Nelson, D.B. (1991), "Conditional Heteroscedasticity in Asset Returns: a New Approach", *Econometrica*, vol. 59, núm. 2.
- Plourde, A. y Watkins, G.C. (1998), "Crude Oil Prices between 1985 and 1994: How Volatile in Relation to other Commodities?", *Resources and Energy Economics*, vol. 20, núm. 3.
- Reigner, E. (2007), "Oil and Energy Price Volatility", *Energy Economics*, vol. 29, núm. 3.
- Sehgal, S., Berlia, N. y Ahmad, W. (2013), "An Examination of Price Discovery and Volatility Spillovers of Crude Oil in Global linked Commodity Markets", *International Journal of Economics and Finance*, vol. 5, núm. 5.
- Spargoli, F. y Zagaglia, P. (2007), "The co-movements between Futures Markets for Crude Oil: Evidence from a Structural GARCH Model", *Working Paper* 2007-15.
- Soucek, M. y Todorova, N. (2014), "Volatility Transmission in Energy Futures Markets", *Journal of Energy Markets*, vol. 7, núm. 3.
- Zhong, M., Darrat, A.F. y Otero, R. (2004), "Price Discovery and Volatility Spillovers in Index Futures Markets: Some Evidence from Mexico", *Journal of Banking & Finance*, vol. 28, núm. 12.