

ILADES-UAH Working Papers Series

Nº 325/2018

Innovación en la Extracción de Petróleo y Estabilidad del Cartel de la OPEP

Eduardo H. Saavedra

Mauricio R. Stern

Diciembre 2018

INNOVACIÓN EN LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO Y ESTABILIDAD DEL CARTEL DE LA OPEP *

Eduardo H. Saavedra §

Mauricio R. Stern ¥

Diciembre, 2018

Resumen

Este trabajo desestima que el desplome del precio del barril de petróleo en 2014-15 se explique por la desarticulación del cartel de la OPEP. Por el contrario, este fenómeno se explica principalmente por la mayor producción de shale oil y otras innovaciones extractivas de crudo fuera del cartel. La racionalidad de este resultado se sustenta en un modelo teórico que caracteriza a un mercado con estructura productiva dual, donde productores cartelizados compiten con productores precio aceptante (fringe). Para efectos de la calibración empírica, se supone que el fringe consta tanto de productores no estratégicos como de otros que tienen la capacidad de innovar y así, de tener éxito, expandir su producción. Como es incierto si las eventuales caídas en el precio del petróleo se deben a desviaciones del acuerdo, shocks de demanda y/o incrementos en la oferta del fringe,, no necesariamente una caída en su precio romperá el acuerdo colusivo. El modelo es calibrado para dos escenarios posibles: producción cartelizada de los miembros de la OPEP y competencia a la Cournot de estos, ambos tomando en cuenta la competencia e innovaciones del fringe. Los precios y producción observados entre 2000 y 2017 son consistentes con una oferta dominada por el cartel de la OPEP, siendo razonable que la caída del precio del crudo se deba a la fuerte expansión de la oferta de shale oil de Estados Unidos entre 2011 y 2014.

Palabras Clave: Cartel, Estabilidad, Fringe, Innovación, Petróleo, Shale Oil, OPEP

Clasificación JEL: L12, L13, L42, L71

* Las opiniones expresadas en este artículo son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no necesariamente representan las opiniones de las instituciones en que trabajan.

§ Profesor Asociado, Departamento de Economía, Universidad Alberto Hurtado. E-mail: saavedra@uahurtado.cl
Correspondencia al Departamento de Economía, Universidad Alberto Hurtado, Erasmo Escala 1835, Santiago Chile. Teléfono: 562-28897356. Este autor es además Ministro del Tribunal de Defensa de la Libre Competencia de Chile.

¥ Estudiante de Doctorado en Economía, Universidad de Texas en Austin. E-mail: mauricio.stern@utexas.edu.

1. INTRODUCCIÓN

Luego de mantenerse casi cuatro años por encima de la barrera de los 80 dólares, el precio del barril de petróleo registró una fuerte caída desde julio de 2014, bajando en medio año a precios en torno a los 50 dólares el barril. Diversos estudios entregan explicaciones alternativas a esta situación, pero en donde todos resaltan la importancia de factores de oferta más que de demanda en explicar la brusca caída en el precio del crudo. Es así como el Fondo Monetario Internacional (2015) señala que esta caída se debe principalmente a la expansión de la oferta por productores no OPEP, en especial por Estados Unidos. Consistentemente, el Banco Mundial (2015) señala que el incremento de la producción petrolera por parte de productores no miembros de la OPEP se debió al desarrollo de nuevas técnicas de extracción de petróleo no convencional, principalmente en Estados Unidos, con la extracción del llamado *shale oil*, y en menor medida a los proyectos en las arenas bituminosas de Canadá. Adicionalmente, el Banco Mundial argumenta que la caída de este precio se debe también al anuncio en noviembre de 2014 por parte de la OPEP de un cambio de estrategia, desde una que buscaba mantener precios estables o *Price target* a una estrategia de mantenimiento de la cuota de mercado. La falta de consenso sobre las posibles causas del desplome de los precios del petróleo se evidencia en el trabajo de Kilian (2016), quien argumenta que no había habido importantes cambios inesperados en la oferta de petróleo que explicara la caída abrupta de los precios. Con todo, este autor señala que esta caída se puede explicar a través de cambios acumulados en la oferta y en la demanda de petróleo.

El aporte de este trabajo a esta discusión es analizar si la expansión de la oferta por parte de productores no miembros de la OPEP, específicamente la expansión en la producción de *shale oil* por productores de Estados Unidos, generó o no un quiebre en la estrategia colusiva del cartel de la OPEP. Nuestro principal resultado es que no hubo un quiebre en el acuerdo de los productores cartelizados, sino que la mayor producción y por ende menor precio del crudo son consecuencia directa de las innovaciones exitosas de los productores no cartelizados y el consecuente ajuste estratégico del cartel.

Este trabajo desarrolla un modelo teórico con una estructura de mercado dual, en la que existe un conjunto de productores oligopólicos y cartelizados que conviven con un grupo de productores precio aceptante con costo marginal creciente, al que llamamos *fringe*. Dentro de este *fringe* existe un productor en particular que tiene la capacidad de invertir en innovaciones –al que llamaremos *fringe* innovador– las que de ser exitosas le permiten expandir su capacidad. Por lo tanto, la inversión en innovación y/o expansión de capacidad es una variable con que el *fringe* innovador puede afectar el comportamiento del cartel, ya que en ese caso contrae la demanda residual por petróleo que enfrentan los productores coludidos. En este sentido, el mayor aporte de

este trabajo es unir la literatura sobre estabilidad de los carteles con aquella que estudia la estructura particular de la industria petrolera; esto es, el incentivo que generan los altos precios de un cartel exitoso para que terceros inviertan en innovación precisamente para capturar rentas, lo que en caso de ser exitosas conlleva un ajuste hacia una situación más competitiva.

El modelo desarrollado en este trabajo amplía el de Green y Porter (1984) en la estructura competitiva del mercado, haciéndolo más pertinente a la industria del petróleo. Green y Porter suponen que existen problemas de información por parte del cartel dado que sus miembros sólo pueden observar las variaciones en su precio, pero no qué causa dichos cambios. Esta podría deberse a *shocks* de demanda o a aumentos de la oferta por desviaciones de los miembros del cartel. Por ello, dicho trabajo concluye que shocks negativos de la demanda podrían generar una fase reversiva o de castigo por parte del cartel. Nuestro modelo introduce una tercera fuente de variación: la expansión de la oferta del *fringe* por medio de innovaciones. Esta expansión de la producción del *fringe* genera una contracción de la demanda residual que enfrenta el cartel, y por lo tanto causa los mismos resultados que un shock contractivo de la demanda en Green y Porter (1984).

El modelo que desarrollamos en este trabajo entrega una serie de implicancias teóricas que explicarían los principales hechos estilizados del mercado petrolero en los últimos años. Para contrastar las explicaciones alternativas, se procede a calibrar los parámetros de la demanda mundial de petróleo, la oferta del *fringe*, tanto del innovador como del no estratégico, y de los costos de los miembros del cartel. Una vez obtenidos los parámetros del modelo factual, se procede a calcular dos modelos contrafactuales. El primero supone que la producción de la OPEP es consistente con un cartel que maximiza beneficios y sigue una estrategia compleja de eventuales castigos en caso que el precio del crudo caiga bajo cierto umbral. El segundo modelo contrafactual supone que la producción de la OPEP resulta de la interacción estratégica entre sus miembros que compiten a la Cournot, asumiendo que ésta es la estrategia reversiva adoptada por el cartel una vez roto el acuerdo.

Se comparan finalmente los resultados –precio y cantidades de equilibrio– de los dos modelos contrafactuales con los precios y la producción efectiva de los miembros de la OPEP y el *fringe* en el modelo factual. Se concluye que no hubo un cambio de estrategia por parte del cartel, que haya modificado el nivel de producción de colusión a uno de castigo, sino más bien que prácticamente toda la evolución observada en ambas variables se explica por el efecto del *fringe* innovador. Este resultado no descarta que la abrupta caída en el precio del petróleo y el alza en la producción mundial también podría deberse a un shock contractivo en la demanda mundial por crudo, aunque la persistencia de los nuevos precios y producción observados parece indicar que

fueron las innovaciones exitosas las principales causantes de este cambio de escenario entre los años 2014 y 2015.

Este trabajo se estructura de la siguiente manera. En la sección siguiente se muestran los hechos estilizados de la industria petrolera; mientras que la sección 3 hace una revisión de literatura relacionada con el mercado petrolero y las estrategias colusivas bajo incertidumbre. Ambas secciones son un antecedente relevante para la sección 4, que desarrolla el modelo teórico de cartelización con competencia de un *fringe* innovador y caracteriza los equilibrios de los dos escenarios contrafactuales: colusión e interacción estratégica. La sección 5 explica el proceso de pseudo calibración de nuestro modelo y a sección siguiente entrega los resultados empíricos encontrados al contrastar la producción de cada miembro del cartel y los resultantes precios del crudo para ambos escenarios contrafactuales. Por último, la sección 7 concluye.

2. HECHOS ESTILIZADOS DE LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO

El Gráfico 1 muestra la evolución del precio del barril de petróleo *Brent* y *West Texas Intermediate* (WTI). Se aprecia que este precio tuvo un fuerte incremento desde septiembre del 2008 hasta abril del 2011, esto luego de la gran caída que tuvieron los precios por la crisis económica del año 2008. Posteriormente, los precios tienen movimientos alrededor de 95 dólares por barril para el tipo WTI y de 110 dólares por barril para la cesta *Brent*. Se aprecia además que, a partir de junio del 2014, los precios del petróleo caen vertiginosamente hasta enero del 2015, para luego moverse en esos nuevos niveles.

Gráfico1. Precios del Barril de Petróleo Brent y West Texas

(promedio mensual enero 2010 - mayo 2017)

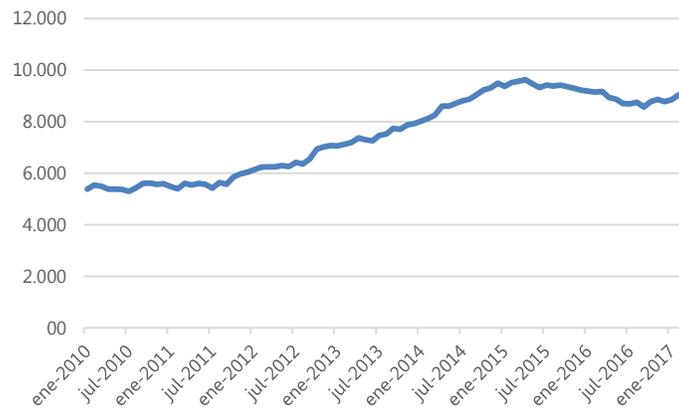


Fuente: Agencia de Información de Energía de Estados Unidos (EIA).

Una explicación posible a esta caída de precios podría ser el aumento en la extracción de petróleo en Estados Unidos y Canadá, mostrada en el Gráfico 2, la que creció de manera persistente entre julio del 2011 y marzo del 2015, pasando de menos de 6 millones a casi 10 millones de barriles diarios, para luego decrecer y mantener alrededor de 9 millones de barriles diarios para el año 2017 (Gráfico 2). El Gráfico 3 presenta además la evolución de la extracción de petróleo a nivel Mundial, la extracción conjunta de los productores pertenecientes a la OPEP y del Resto del Mundo (productores no miembros de la OPEP).

Gráfico 2. Extracción de Petróleo en Estados Unidos y Canadá

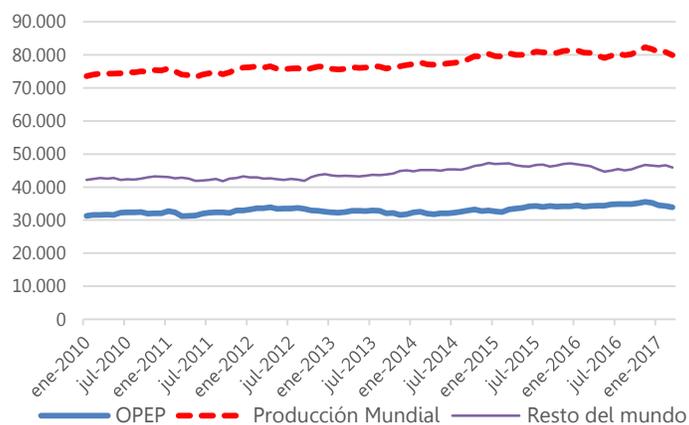
(miles de barriles al día, enero 2010 - marzo 2017)



Fuente: Agencia de Información de Energía de Estados Unidos (EIA).

Gráfico 3. Extracción Mundial de Petróleo, de la OPEP y del Resto del Mundo

(miles de barriles al día, enero 2010 - marzo 2017)



Fuente: Cálculos propios a partir de Agencia de Información de Energía de Estados Unidos (EIA).

Se observa una ligera tendencia creciente en la producción Mundial, en aproximadamente cinco millones de barriles en el decenio pasado; mientras que la extracción de petróleo por parte de la OPEP tiene un comportamiento estable, sin grandes cambios, al igual que la extracción del resto de los productores en el mundo. Es plausible así considerar que la caída de los precios del petróleo podría ser consecuencia del aumento de la producción en Estados Unidos y Canadá. Para Baumeister y Kilian (2016), así como el FMI (2015) y el Banco Mundial (2015), este fenómeno estaría causado por el desarrollo de nuevas técnicas productivas de extracción de *Shale Oil*, ya que por esta vía la producción de crudo pasó de 500 mil barriles en 2010 a cuatro millones en 2014.

A nivel del análisis de cada uno de los miembros de la OPEP, la Tabla 1 muestra los coeficientes de variación de la extracción individual, apreciándose que la producción de petróleo de cada uno de los miembros del cartel es bastante estable, excepto en Libia. La situación de este país se debe a que a partir del año 2011 se vio envuelto en una guerra civil, haciendo muy volátil su producción.

Tabla 1. Coeficiente de Variación de la Producción de los Miembros de la OPEP.¹

	2010-11	2011-12	2012-13	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17
Ecuador	1.48%	0.79%	1.17%	2.05%	1.01%	1.47%	1.50%
Venezuela	1.89%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.75%	2.90%
Irán	0.69%	4.87%	2.61%	2.21%	1.86%	9.61%	2.83%
Iraq	4.19%	4.50%	2.63%	6.05%	6.75%	2.26%	2.20%
Kuwait	3.72%	1.35%	0.62%	1.52%	1.91%	2.53%	2.89%
Catar	3.32%	2.58%	0.98%	0.29%	1.22%	0.81%	5.43%
Arabia Saudí	2.01%	1.52%	3.71%	1.78%	2.46%	0.97%	2.74%
Emiratos Árabes Unidos	4.86%	1.65%	0.00%	1.82%	1.69%	2.40%	2.41%
Argelia	0.00%	0.33%	2.40%	2.32%	0.33%	2.91%	0.86%
Angola	5.28%	4.33%	2.96%	3.18%	3.13%	1.49%	4.90%
Libia	49.75%	72.37%	3.76%	65.59%	37.42%	10.37%	34.80%
Nigeria	2.82%	3.47%	4.59%	2.54%	3.89%	7.28%	5.26%

Fuente: Cálculos propios a partir de Agencia de Información de Energía de Estados Unidos (EIA).

Adicionalmente se puede constatar en la Tabla 2 que no ha habido grandes variaciones en la participación de cada uno de los miembros en la extracción total del cartel. Este comportamiento

¹ El análisis se realiza desde noviembre de cada año hasta octubre del año siguiente, con la excepción de 2016-17, el cual está calculado hasta marzo de 2017.

de la participación de cada miembro del cartel podría ser un indicio de que no ha habido un desvío ex-post del acuerdo por parte de los miembros de la OPEP.

Tabla 2. Participación de los Miembros en la Extracción Total de la OPEP

	2010-11	2011-12	2012-13	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17
Ecuador	1.55%	1.51%	1.54%	1.69%	1.69%	1.58%	1.57%
Venezuela	7.64%	7.59%	7.59%	7.75%	7.61%	7.16%	6.24%
Irán	12.71%	11.81%	9.54%	9.84%	9.93%	10.37%	12.21%
Iraq	7.67%	8.24%	9.47%	9.74%	10.69%	12.70%	12.96%
Kuwait	7.44%	7.92%	8.01%	8.14%	8.26%	8.34%	8.35%
Catar	4.77%	4.79%	4.67%	4.83%	4.65%	4.48%	4.27%
Arabia Saudí	28.40%	29.82%	29.10%	30.68%	29.92%	30.03%	29.97%
Emiratos Árabes Unidos	7.80%	8.33%	8.57%	8.77%	9.00%	8.82%	9.05%
Argelia	4.81%	4.69%	4.55%	4.47%	4.33%	4.08%	3.86%
Angola	5.56%	5.48%	5.41%	5.43%	5.40%	5.30%	4.95%
Libia	3.96%	2.29%	4.31%	1.46%	1.57%	1.06%	1.41%
Nigeria	7.67%	7.52%	7.24%	7.20%	6.96%	6.09%	5.16%

Fuente: Agencia de Información de Energía de Estados Unidos (EIA) y cálculos propios.

3. LITERATURA RELACIONADA

Dos son los cuerpos de la literatura económica que este trabajo rescata y funde en un solo modelo. Por un lado, está aquella que modela la estructura del mercado del petróleo con el fin de analizar la extracción óptima de este recurso natural; mientras que, por otro lado, está la literatura que analiza la estabilidad de los carteles, muchas veces aplicada a la industria petrolera.

Diversos autores han abordado la modelización del mercado petrolero, la mayoría de ellos partiendo del trabajo de Hotelling (1931) sobre la extracción óptima de recursos minerales no renovables. Es así como Salant (1976) modela al mercado petrolero como una industria con muchas unidades de producción con costos y cantidades de reservas petrolera homogéneas. El cartel es formado por la unión de algunas de estas unidades de producción como una sola empresa dominante que fija el precio, al margen de la producción del resto de los productores que son precio aceptante (*fringe*). Esto da origen a una estructura de mercado dual, con un cartel que actúa como empresa dominante y que posee la ventaja de tener conjuntamente mayor cantidad de reservas frente a sus competidores precio aceptante. Ulph y Folie (1980) presenta una extensión de este modelo incorporando heterogeneidad en los costos del cartel y del *fringe*.

Pindyck (1978) modela el proceso de exploración y descubrimiento de reservas de recursos naturales no renovables, señalando que, en el caso del petróleo y el gas natural, el incremento de reservas tendría el efecto de reducir la estructura de costo por efecto stock,² y por tanto la adición de nuevas reservas hace que un productor pueda expandir su producción para un mismo nivel de precio. Adicionalmente, Lin y Wagner (2007) elaboran un modelo con innovación tecnológica y con efecto stock, argumentando que la innovación tecnológica reduce los costos e incrementa la capacidad de producción de los productores. Para efectos de nuestro trabajo, la innovación y la ampliación de capacidad por nuevos descubrimientos de reservas son tratados como equivalentes en términos de reducción de costos y de expansión de capacidad productiva.

A nivel empírico, Lin (2015) estima los parámetros de conducta para la OPEP y sus competidores, adaptando la metodología desarrollada por Genesove y Mullin (1998) a una estructura de cartel-*fringe* y usando una variable de costo de oportunidad de no extraer petróleo para recoger las ideas de Hotelling (1931). Lin (2015) halla que la OPEP se colude como un cartel dominante mientras que sus competidores se comportan como un *fringe* oligopólico. Sin embargo, la existencia de un precio por encima de los costos marginales en el mercado de petrolero no implica que dicho *fringe* tenga poder de mercado oligopólico, ya que la naturaleza extractiva y no productiva de la actividad hace que puedan existir rentas económicas positivas, sin que eso implique que el productor tenga poder para influir en los precios.

En cuanto a la literatura sobre modelos colusivos, hay diversos trabajos que analizan la colusión en entornos de demanda volátil e incierta y/o con la existencia de un *fringe* competitivo, las dos características básicas de nuestro modelo. El trabajo seminal en esta literatura es el de Green y Porter (1984), el que presenta un modelo con información imperfecta e imperfecciones en el monitoreo del cartel. Estos autores encuentran que la colusión es más estable en periodos de demanda alta que en periodos de demanda baja, ya que en estos casos los miembros del cartel no pueden determinar si la caída de precios, única variable observable, se debe a una contracción de la demanda o a desviaciones por parte de los miembros del cartel.

Tal resultado es ciertamente muy dependiente del supuesto de demanda estocástica. De hecho, Rotemberg y Saloner (1986) muestran que en mercados oligopólicos y cartelizados, en donde los cambios en la demanda son predecibles, los acuerdos colusivos serán más estables en periodos de demanda baja que en periodos de demanda alta. Este resultado se debe a que la ganancia de desviarse del acuerdo es mayor en la fase expansiva de la demanda, por cuanto recibirá el castigo de desvío en periodos cuando la demanda es más baja en términos esperados. En

² El efecto stock se refiere al incremento de los costos causado por el agotamiento de la cantidad de hidrocarburo en un pozo, dado que la extracción de hidrocarburo en el transcurso del tiempo se produce a cada vez mayores profundidades del subsuelo.

consecuencia, el castigo de desviarse cuando la demanda es alta es relativamente más bajo en términos esperados que, por el contrario, cuando la demanda es más baja en términos esperados.

Staiger y Wolak (1992) presentan un modelo con una demanda con componente aleatorio, a la Green y Porter (1984), pero adicionando restricción de capacidad en la producción, donde la decisión de construcción de la capacidad se elige antes de observar la demanda. Los autores muestran que cuando la demanda es baja y la capacidad de producción es amplia, existen mayores incentivos a desviarse del acuerdo colusivo, en comparación con una demanda mayor y capacidad de producción restringida. Knittel, Lepore y Shafran (2016) adicionan a dicho modelo disparidades en las capacidades productivas de los miembros del cartel, lo que puede llevar a colusiones con precios asimétricos.

En el trabajo de Bagwell y Staiger (1997) se presenta un modelo con shocks de demanda persistentes. Usando un proceso Markoviano para describir los shocks de demanda, los autores encuentran que si ésta está correlacionada positivamente en el tiempo, los precios del cartel tenderán a ser procíclicos, es decir el acuerdo colusivo va a tender a mantenerse en la fase de crecimiento de la demanda, mientras que sus miembros se desviarán del acuerdo en las fases contractivas de la demanda.

Montero y Guzmán (2010) abordan la relación entre un cartel oligopólico y un *fringe* competitivo, donde la existencia de competidores externos y variaciones de la demanda pueden llevar a dos tipos de equilibrios colusivos, uno "correctivo" que busca maximizar las ganancias conjuntas de la colusión, y otro "estratégico" en que el cartel incrementa la producción para disuadir al *fringe* de no expandir la producción y evitar que se convierta en un oligopolio. Estos cambios en los equilibrios de producción del cartel varían procíclicamente ante shocks en la demanda. Dicho trabajo supone que la expansión de la oferta por parte del *fringe* no es lo suficientemente grande como para convertir a estos productores en un oligopolio.

4. MODELO DE CARTELIZACIÓN CON UN *FRINGE* INNOVADOR

El modelo supone que el mercado se caracteriza por una demanda que recibe *shocks* de demanda aleatorios no observados, similar al modelo de Green y Porter (1984), pero se extiende no sólo con la introducción de un *fringe* competitivo con un comportamiento precio aceptante, sino además diferenciando este *fringe* en uno compuesto por múltiples firmas no estratégicas –que es introducido en el modelo con el fin de calibrarlo mejor con la data– y otro que corresponde al *fringe* innovador que puede, de ser exitoso, expandir su producción. Este *fringe* innovador afecta al mercado, y al cartel, a través de su decisión de invertir en innovación, afectando así la probabilidad de ampliar su capacidad productiva. El *fringe* innovador decide cuánto invertir al inicio de cada

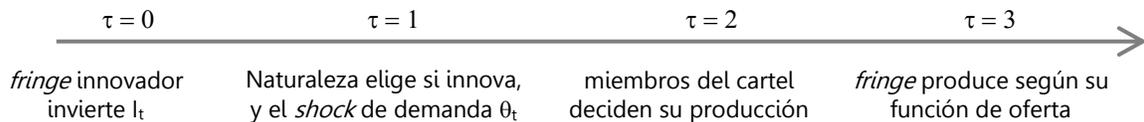
periodo, lo que incide positivamente en la probabilidad de innovar, $q(I)$. Por simpleza se supone que una vez que este *fringe* innova (es exitoso) no volverá a invertir en innovación; caso contrario, lo hará hasta innovar.

Al igual que en el modelo de Green y Porter, la estrategia del cartel está basada en un umbral de precios. Los miembros del cartel van a mantener la estrategia colusiva si el precio observado se ubica por encima de un nivel de precios acordado; de lo contrario, cuando el precio de equilibrio cae bajo el umbral, todas las empresas emplean una estrategia de castigo por un cierto período T . En este sentido, posterior a la inversión del *fringe* innovador, se produce tanto un *shock* a la demanda, determinada por la variable aleatoria y continua θ_t , como el eventual aumento de oferta producto de la innovación. Luego de ello, el cartel decide las acciones a tomar, donde los movimientos de la demanda, la eventual mayor oferta del *fringe* innovador y los desvíos de los mismos miembros del cartel podrían haber afectado el precio observado.

En la última etapa de esta interacción estratégica, los productores precio aceptante deciden su producción, de acuerdo a su función de oferta y precios observados.

Como todo modelo de colusión, éste es dinámico y se supone que se juega infinitos períodos. En cada período se toman decisiones que son secuenciales y se explican esquemáticamente en la Figura 1. En búsqueda de la solución a estas decisiones, se resuelve de atrás hacia adelante para

Figura 1. Secuencia de Decisiones para cada Período t , con 4 subperíodos τ



Fuente: Elaboración propia.

4.1 Decisión de Producción de los Productores Precio Aceptante

Para plantear el problema del *fringe* innovador, definimos p_t como el precio exógeno, x_t^{fi} como la producción del *fringe* y una función de costo marginal creciente $c(x_t^{fi}) = \frac{\gamma}{\Delta}(x_t^{fi})^2$, donde $\Delta \in \{1, \varepsilon\}$ siendo $\varepsilon > 1$ el factor de caída en los costos y, por ende, de aumento en la capacidad productiva si este *fringe* tuvo éxito en la innovación. Así, el problema del *fringe* innovador es:

$$\text{Max}_{x^f} \Delta \pi_t^{fi} = p_t x_t^{fi} - \frac{\gamma}{\Delta} (x_t^{fi})^2 - I$$

A partir de las condiciones de primer orden de este problema, obtenemos su función de oferta:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Delta \pi^{fi}}{\partial x_t^{fi}} &= p_t - \frac{2\gamma}{\Delta} x_t^{fi} = 0 \\ \rightarrow x_t^{fi} &= \frac{\Delta}{2\gamma} p_t \\ &\equiv \Delta \cdot \varphi \cdot p_t\end{aligned}$$

donde $\varphi = \frac{1}{2\gamma}$. Por ello, los beneficios de este *fringe* son condicionales al éxito o fracaso de su innovación. Esto es, $\Delta \pi_t^{fi} = \frac{\Delta \cdot \varphi}{2} \cdot (p_t)^2$

En cuanto al *fringe* no innovador, se supone que su estructura de costos es cuadrática; esto es, $c(x_t^{fn}) = \lambda_1 (x_t^{fn})^2 - \lambda_2 x_t^{fn}$, donde λ_1 y $\lambda_2 > 0$. Con ello, su problema es el siguiente:

$$\text{Max}_{x^{fn}} \pi_t^{fn} = p_t x_t^{fn} - \lambda_1 (x_t^{fn})^2 + \lambda_2 x_t^{fn} - F$$

Las condiciones de primer orden de este problema son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \pi^{fn}}{\partial x_t^{fn}} &= p_t - 2\lambda_1 x_t^{fn} + \lambda_2 = 0 \\ \rightarrow x_t^{fn} &= \frac{p_t + \lambda_2}{2\lambda_1} \\ &\equiv \phi_1 + \phi_2 \cdot p_t\end{aligned}$$

donde $\phi_1 = \lambda_2 / 2\lambda_1$ y $\phi_2 = 1 / 2\lambda_1$. En otras palabras, la unidad marginal es tarifada al precio de mercado (de allí que es un *fringe* precio aceptante), pero dados sus costos marginales crecientes, tiene rentas normales que debieran cubrir sus costos fijos y hundidos de entrada, F .

4.2 El Problema de cada Miembro del Cartel de la OPEP

Previo a determinar cómo decidirá su producción cada miembro del cartel, se debe conocer cómo se ve afectada la demanda residual que ellos enfrentan, la que como hemos mencionado va a depender de dos factores: el *shock* en la demanda de mercado en el período t , que llamamos θ_t , y si hubo o no innovación en el *fringe* innovador, que llamado Δ .

Sean α y b parámetros positivos. La función de demanda del mercado se asumirá en el modelo como $Q_t = \theta_t + \alpha - bp_t$. Luego, la respectiva función de demanda inversa es:

$$p_t = \frac{\theta_t}{b} + \frac{1}{b}(\alpha - Q_t)$$

Como $Q_t = \sum_{i=1}^n x_{it} + x_t^{fi} + x_t^{fn}$ es otra forma de ver la cantidad total demandada por los consumidores a precio p_t , y siendo x_{it} la producción del i -ésimo productor del cartel, tenemos que:

$$\begin{aligned}Q_t &= \sum_{i=1}^n x_{it} + x_t^{fi} + x_t^{fn} \\ &= \theta_t + \alpha - bp_t\end{aligned}$$

o, en otras palabras, reemplazando las respectivas producciones de el fringe innovador y no innovador, se tiene $\sum_{i=1}^n x_{it} + \Delta\varphi p_t + \phi_1 + \phi_2 p_t = \theta_t + \alpha - b p_t$. Por último, despejando el precio, obtenemos la función de demanda inversa residual que enfrenta el cartel:

$$\begin{aligned} p_t &= \frac{1}{b + \Delta\varphi + \phi_2} \left[\alpha - \phi_1 + \theta_t - \sum_{i=1}^n x_{it} \right] \\ &= \frac{\theta_t}{b + \Delta\varphi + \phi_2} + \frac{1}{b + \Delta\varphi + \phi_2} p \left(\sum_{i=1}^n x_{it} \right) \end{aligned}$$

donde se define la función de demanda inversa $p(\sum_{i=1}^n x_{it}) \equiv \alpha - \phi_1 - \sum_{i=1}^n x_{it}$.

El impacto de un *shock* de demanda y de una innovación del *fringe* sobre los precios, dado la producción de cartel, respectivamente será:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_t}{\partial \theta_t} &= \frac{1}{b + \Delta\varphi + \phi_2} \\ &> 0 \\ \frac{\partial p_t}{\partial \Delta_t} &= -\frac{\varphi \theta_t}{(b + \Delta\varphi + \phi_2)^2} - \frac{\varphi}{(b + \Delta\varphi + \phi_2)^2} p \left(\sum_{i=1}^n x_{it} \right) \\ &< 0 \end{aligned}$$

Por lo tanto, manteniendo constante la producción del cartel, un shock positivo (negativo) en la demanda genera un alza (caída) en los precios. Asimismo, si el *fringe* tiene éxito (fracaso) en la innovación se producirá una caída (alza) en los precios en dicho período.

Con esta demanda residual, conocida por el cartel en cada período, la estrategia de las firmas que pertenecen a este cartel en un período t es condicional a la historia de precios observados. Suponemos la siguiente estrategia del acuerdo: cada empresa i producirá en $t = 0$ lo acordado, que llamamos y_i , luego de lo cual producirá:

$$x_{it} = \begin{cases} y_i & \text{si } p_{t-1} > \bar{p} \text{ para el período } t-1 \\ y_i & \text{si } t-T \text{ fue normal y } p_{t-T} < \bar{p} \\ z_i & \text{en reversión o algún castigo} \end{cases}$$

donde z_i es la producción en caso que el cartel entre en una fase de reversión o castigo, con $z_i < x_i$.

Sea r la estrategia de producción $x_{it} = r$ en un periodo colusivo; $\gamma_i(r)$ el beneficio esperado de la firma i cuando emplea la estrategia r en periodo de colusión; y δ_i el beneficio esperado para el periodo de reversión/castigo, con $\gamma_i(r) > \delta_i$. Estos dos últimos beneficios esperados se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} \gamma_i(r) &= E_{\bar{\theta}} \pi_i(r, \bar{\theta} + \tilde{p}(r + \omega_i)) \\ &= E_{\bar{\theta}} \left\{ \left[\frac{\theta_t}{b + \Delta\varphi + \phi_2} + \frac{1}{b + \Delta\varphi + \phi_2} p(r + \omega_i) - c_i \right] r \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_i &= E_{\tilde{\theta}} \pi_i \left(z_i, \tilde{\theta} + \tilde{p} \left(\sum_{j \leq n} z_j \right) \right) \\ &= E_{\tilde{\theta}} \left\{ \left[\frac{\theta_t}{b + \Delta\varphi + \phi_2} + \frac{1}{b + \Delta\varphi + \phi_2} p \left(\sum_{j \leq n} z_j \right) - c_i \right] z_i \right\}\end{aligned}$$

donde $\omega_i = \sum_{j \neq i} y_j$ y c_i es el costo marginal de la firma i .

Los *shocks* de demanda de equilibrios son $\tilde{\theta}_t^n = \frac{\theta_t}{b + \varphi + \phi_2}$ si no hay innovación; y $\tilde{\theta}_t^\varepsilon = \frac{\theta_t}{b + \varepsilon\varphi + \phi_2}$ si el *fringe* ha innovado. Luego, las funciones de demanda inversa están condicionadas al *shock* de demanda correspondiente; esto es $\tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i) = \frac{1}{b + \varepsilon\varphi + \phi_2} p(r + \omega_i)$ y $\tilde{p}^n(r + \omega_i) = \frac{1}{b + \varphi + \phi_2} p(r + \omega_i)$.

Defínase la función $\text{Pr}(\cdot)$ como la función de probabilidad de incurrir en fases de colusión o de castigo, que está distribuida en base a $\tilde{\theta}_t^n$ (sin innovación) y $\tilde{\theta}_t^\varepsilon$ (con innovación). Como $\gamma_i(r)$ dependerá de la decisión del *fringe*, entonces definimos $\gamma_i^\varepsilon(r)$ como el beneficio de la firma i del cartel cuando el *fringe* innova y $\gamma_i^n(r)$ como el beneficio de dicha firma cuando el *fringe* no innova.

Sea $V_i(r)$ el valor presente esperado de los beneficios para la estrategia $x_{it} = r$ en un periodo colusivo. Las inversiones del *fringe* innovador generan que los miembros del cartel tengan dos funciones de valor ex post, las que dependen de si el *fringe* innova o no. Así, sea la función de valor *ex post* cuando el *fringe* ya innovó:

$$V_i^\varepsilon(r) = \gamma_i^\varepsilon(r) + \beta \text{Pr}(\bar{p} \leq \tilde{\theta}^\varepsilon + \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i)) V_i^\varepsilon(r) + \text{Pr}(\tilde{\theta}^\varepsilon + \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i) < \bar{p}) \left(\sum_{t=1}^{T-1} \beta^t \delta_i^\varepsilon + \beta^T V_i^\varepsilon(r) \right)$$

Si $\text{Pr}(\tilde{\theta}^\varepsilon + \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i) < \bar{p}) = \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i))$, sustituyendo y despejando la función valor estacionaria en el tiempo, obtenemos:

$$\begin{aligned}V_i^\varepsilon(r) &= \frac{\gamma_i^\varepsilon(r) + \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i)) \left(\frac{\beta - \beta^T}{1 - \beta} \right) \delta_i^\varepsilon}{1 - \beta + (\beta - \beta^T) \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i))} \\ &= \frac{\gamma_i^\varepsilon(r) - \delta_i^\varepsilon}{1 - \beta + (\beta - \beta^T) \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i))} + \frac{\delta_i^\varepsilon}{1 - \beta}\end{aligned}$$

Como hemos definido la función valor $V_i(r)$ *ex ante* de que el *fringe* haya innovado, y ya hemos definimos como q a la probabilidad esperada de que el *fringe* innove, entonces:

$$\begin{aligned}V_i(r) &= q V_i^\varepsilon(r) + (1 - q) \left\{ \gamma_i^n(r) + \beta \text{Pr}(\bar{p} \leq \tilde{\theta}^n + \tilde{p}^n(r + \omega_i)) V_i(r) \right. \\ &\quad \left. + \text{Pr}(\tilde{\theta} + \tilde{p}^n(r + \omega_i) < \bar{p}) \left(\sum_{t=1}^{T-1} \beta^t \delta_i^n + \beta^T V_i(r) \right) \right\}\end{aligned}$$

Al reemplazar el valor de $V_i^\varepsilon(r)$ y definiendo $\Pr(\tilde{\theta}^n + \tilde{p}(r + \omega_i) < \bar{p}) = \tilde{F}_n(\bar{p} - \tilde{p}(r + \omega_i))$; luego de algo de álgebra se obtiene la función valor de estado estacionario:

$$\begin{aligned} V_i(r) &= \frac{q}{1 + (1-q)[(\beta - \beta^T)\tilde{F}_n(\bar{p} - \tilde{p}^n(r + \omega_i)) - \beta]} \left\{ \frac{\gamma_i^\varepsilon(r) - \delta_i^\varepsilon}{1 - \beta + (\beta - \beta^T)\tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i))} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\delta_i^\varepsilon}{1 - \beta} \right\} + (1-q) \left\{ \frac{\gamma_i^n(r) + \tilde{F}_n(\bar{p} - \tilde{p}^n(r + \omega_i)) \left(\frac{\beta - \beta^T}{1 - \beta} \right) \delta_i^n}{1 - (1-q)\beta + (1-q)(\beta - \beta^T)\tilde{F}_n(\bar{p} - \tilde{p}^n(r + \omega_i))} \right\} \\ &= \frac{1}{1 - (1-q)\beta + (1-q)(\beta - \beta^T)\tilde{F}_n(\bar{p} - \tilde{p}^n(r + \omega_i))} \left\{ \frac{q\gamma_i^\varepsilon(r) - q\delta_i^\varepsilon}{1 - \beta + (\beta - \beta^T)\tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i))} + \frac{q\delta_i^\varepsilon}{1 - \beta} \right. \\ &\quad \left. + (1-q)\gamma_i^n(r) - \left(\frac{1 - (1-q)\beta}{1 - \beta} \right) \delta_i^n \right\} + \frac{\delta_i^n}{1 - \beta} \end{aligned}$$

La acción y_i es un equilibrio de Nash si y sólo si $v_i(r) \leq v_i(y_i)$, entonces debe cumplirse la siguiente condición de primer orden $V_i'(y_i) = 0$:

$$\begin{aligned} &\left\{ \frac{q\gamma_i^{\varepsilon'}(r)}{1 - \beta + (\beta - \beta^T)\tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i))} + \frac{q(\gamma_i^\varepsilon(r) - \delta_i^\varepsilon)\tilde{F}_\varepsilon'(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i))\tilde{p}^{\varepsilon'}(r + \omega_i)}{[1 - \beta + (\beta - \beta^T)\tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i))]^2} + (1-q)\gamma_i^{n'}(r) \right\} \\ &+ [1 - (1-q)\beta + (1-q)(\beta - \beta^T)\tilde{F}_n(\bar{p} - \tilde{p}^n(r + \omega_i))] + \left\{ \frac{q\gamma_i^\varepsilon(r) - q\delta_i^\varepsilon}{1 - \beta + (\beta - \beta^T)\tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(r + \omega_i))} + \right. \\ &\quad \left. \frac{q\delta_i^\varepsilon}{1 - \beta} + (1-q)\gamma_i^n(r) - \left(\frac{1 - (1-q)\beta}{1 - \beta} \right) \delta_i^n \right\} (1-q)(\beta - \beta^T)\tilde{F}_n'(\bar{p} - \tilde{p}^n(r + \omega_i))\tilde{p}^{n'}(r + \omega_i) = 0 \quad (1) \end{aligned}$$

Como es estándar en economía, la condición de primer orden (1) muestra que la ganancia marginal esperada de desviarse del acuerdo colusivo, dada por la mayor ganancia de aumentar la producción manteniendo el precio colusivo (primer término de las primeras dos líneas de esta ecuación), debe ser igual al costo marginal esperado de caer en un episodio reversivo, producto de la mayor probabilidad que el precio final caiga bajo el umbral crítico debido a esta mayor producción (segundo término de la primera línea y desde el segundo término de la segunda línea hasta el final de esta ecuación).

4.3 El Problema de Inversión del Fringe Innovador

Este *fringe* tiene como variable estratégica la inversión en innovación, donde la función de probabilidad de innovar cumple con las condiciones de Inada, esto es:

$$q(0) = 0, \quad q'(I) > 0, \quad q''(I) < 0, \quad \lim_{I \rightarrow 0} q'(I) = \infty \quad y \quad \lim_{I \rightarrow \infty} q'(I) = 0$$

Las expresiones δ_i^f y π_i^f muestran los beneficios esperados del fringe en entornos reversivos y colusivos respectivamente cuando no innova; mientras que, cuando innova, los beneficios se multiplican por el factor ε . La producción total de cartel es igual a Q^c . Adicionalmente, se va a suponer que en periodos reversivos no se realiza inversión, y por tanto no hay innovación ($q(0) = 0$).

Una vez que realiza la innovación, suponemos que el *fringe* no vuelve a innovar. Dado esto, la función de valor presente de los beneficios esperados del *fringe ex post*, luego de innovar es:

$$V_f^\varepsilon(I) = \varepsilon\pi_i^f + \beta\Pr[\bar{p} \leq \tilde{\theta}^\varepsilon + \tilde{p}^\varepsilon(Q^c)]\varepsilon V_f(I) + \Pr(\tilde{\theta}^\varepsilon + \tilde{p}^\varepsilon(Q^c) < \bar{p}) \left(\sum_{t=1}^{T-1} \beta^t \varepsilon \delta_i^f + \beta^T V_f^\varepsilon(I) \right)$$

Se define $\Pr(\tilde{\theta}^\varepsilon + \tilde{p}^\varepsilon(Q^c) < \bar{p}) = \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(Q^c))$ y se halla así la función de valor en el estado estacionario:

$$\begin{aligned} V_f^\varepsilon(I) &= \frac{\varepsilon\pi_i^f + \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(Q^c)) \left(\frac{\beta - \beta^T}{1 - \beta} \right) \varepsilon \delta_i}{1 - \beta + (\beta - \beta^T) \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(Q^c))} \\ &= \varepsilon \left[\frac{\pi_i^f - \delta_i^f}{1 - \beta + (\beta - \beta^T) \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(Q^c))} + \frac{\delta_i^f}{1 - \beta} \right] \end{aligned}$$

Luego, sea la función de valor de la decisión del *fringe* de innovar *ex ante*:

$$\begin{aligned} V_f(I) &= q(I)\{V_f^\varepsilon(I)\} + (1-q(I)) \left\{ \pi_i^f + \beta\Pr(\bar{p} \leq \tilde{\theta} + \tilde{p}(Q^c)) V_f(I) + \Pr(\tilde{\theta} + \tilde{p}(Q^c) < \bar{p}) \left(\sum_{t=1}^{T-1} \beta^t \delta_i + \beta^T V_f(I) \right) \right\} - I \\ &= q(I) \left\{ \varepsilon \left[\frac{\pi_i^f - \delta_i^f}{1 - \beta + (\beta - \beta^T) \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(Q^c))} + \frac{\delta_i^f}{1 - \beta} \right] \right\} + \\ &= (1-q(I)) \left\{ \pi_i^f + \beta\Pr(\bar{p} \leq \tilde{\theta} + \tilde{p}(Q^c)) V_f(I) + \Pr(\tilde{\theta} + \tilde{p}(Q^c) < \bar{p}) \left(\sum_{t=1}^{T-1} \beta^t \delta_i + \beta^T V_f(I) \right) \right\} - I \end{aligned}$$

Sea a su vez $\Pr(\tilde{\theta} + \tilde{p}(Q^c) < \bar{p}) = \tilde{F}(\bar{p} - \tilde{p}(Q^c))$, la función de valor en el estado estacionario será:

$$\begin{aligned} V_f(I) &= \frac{1}{1 + (1-q(I)) [(\beta - \beta^T) \tilde{F}_n(\bar{p} - \tilde{p}^n(r + \omega_i)) - \beta]} \left\{ q(I) \varepsilon \left[\frac{\pi_i^f - \delta_i^f}{1 - \beta + (\beta - \beta^T) \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(Q^c))} + \frac{\delta_i^f}{1 - \beta} \right] \right. \\ &\quad \left. + (1-q(I)) \left[\pi_i^f + \left(\frac{\beta - \beta^T}{1 - \beta} \right) \tilde{F}_n(\bar{p} - \tilde{p}^n(r + \omega_i)) \delta_i^f \right] - I \right\} \\ &= \frac{1}{1 + (1-q(I)) [(\beta - \beta^T) \tilde{F}_n(\bar{p} - \tilde{p}^n(r + \omega_i)) - \beta]} \left\{ q(I) \varepsilon \left[\frac{\pi_i^f - \delta_i^f}{1 - \beta + (\beta - \beta^T) \tilde{F}_\varepsilon(\bar{p} - \tilde{p}^\varepsilon(Q^c))} + \frac{\delta_i^f}{1 - \beta} \right] \right. \\ &\quad \left. + (1-q(I)) \pi_i^f - \left(\frac{1 - (1-q(I))\beta}{1 - \beta} \right) \delta_i^f \right\} + \frac{\delta_i^f}{1 - \beta} \end{aligned}$$

lo que entrega la siguiente condición de primer orden $V_f'(I) = 0$:

$$\left\{ q'(l)\varepsilon \left[\frac{\pi_i^f - \delta_i^f}{1 - \beta + (\beta - \beta^T)\bar{F}_\varepsilon(\bar{p} - \bar{p}^\varepsilon(Q^c))} + \frac{\delta_i^f}{1 - \beta} \right] - q'(l)\pi_i^f - \left(\frac{q'(l)\beta}{1 - \beta} \right) \delta_i^f - 1 \right\} [1 - (1 - q(l))\beta + (1 - q(l))(\beta - \beta^T)\bar{F}_\varepsilon(\bar{p} - \bar{p}^\varepsilon(r + \omega_i))] - \left\{ q(l)\varepsilon \left[\frac{\pi_i^f - \delta_i^f}{1 - \beta + (\beta - \beta^T)\bar{F}_\varepsilon(\bar{p} - \bar{p}^\varepsilon(Q^c))} + \frac{\delta_i^f}{1 - \beta} \right] + (1 - q(l))\pi_i^f - \left(\frac{1 - (1 - q(l))\beta}{1 - \beta} \right) \delta_i^f - 1 \right\} [q'(l)\beta - q'(l)(\beta - \beta^T)\bar{F}_\varepsilon(\bar{p} - \bar{p}^\varepsilon(r + \omega_i))] = 0 \quad (2)$$

La condición (2) muestra que el *fringe* va a invertir en innovación hasta que ganancia marginal esperada de innovar sea igual a su costo marginal (toda la primera línea hasta el primer término de la segunda línea de esta ecuación) más la pérdida marginal de beneficio esperada de generar un comportamiento reversible en el cartel (segundo término de la segunda línea hasta el final del lado izquierdo de esta ecuación).

5. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para efectos de contrastar las simulaciones que entrega nuestro modelo para los escenarios contrafactuales con los datos reales de precio del crudo y la cantidad producida por cada uno de los productores, así como la inversión que decidirá el *fringe* innovador, se procedió a calibrar el modelo usando las condiciones de primer orden de las funciones valor (ecuaciones (1) y (2)). Debido principalmente a la complejidad de la resolución simultánea del sistema de ecuaciones no lineales que representa (1) para los 12 países miembros del cartel de la OPEP, que muchas veces no reportó soluciones, se optó por usar una aproximación a través de linealizar estas condiciones de primer orden usando series de Taylor de orden 1. Esto se hace también para la inversión en innovación para la extracción de crudo que representa (2).

Las 14 ecuaciones resultantes son las siguientes expansiones de Taylor para $V_i'(y_i)$ (12 ecuaciones) y $V_f'(I)$ (2 ecuaciones):

$$\begin{aligned} V_i' \left(y_i^*, \sum_{j \neq i} y_j^*, I^* \right) + \frac{\partial V_i'(y_i^*, \sum_{j \neq i} y_j^*, I^*)}{\partial y_i} (y_i^c - y_i^*) + \sum_{j \neq i} \frac{\partial V_i'(y_i^*, \sum_{j \neq i} y_j^*, I^*)}{\partial y_j} (y_j^c - y_j^*) \\ + \frac{\partial V_i'(y_i^*, \sum_{j \neq i} y_j^*, I^*)}{\partial I} (I - I^*) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_f' \left(y_i^*, \sum_{j \neq i} y_j^*, I^* \right) + \frac{\partial V_f'(y_i^*, \sum_{j \neq i} y_j^*, I^*)}{\partial y_i} (y_i^c - y_i^*) + \sum_{j \neq i} \frac{\partial V_f'(y_i^*, \sum_{j \neq i} y_j^*, I^*)}{\partial y_j} (y_j^c - y_j^*) \\ + \frac{\partial V_f'(y_i^*, \sum_{j \neq i} y_j^*, I^*)}{\partial I} (I - I^*) = 0 \end{aligned}$$

Las variables incógnitas son $y_i^c \in I$ en el sistema lineal de ecuaciones resultante de aplicar la serie de Taylor a cada condición de primer orden. Para ello se usan los valores iniciales (y_i^*, y_j^*, I^*) . Se utiliza para la variable de producción las decisiones de cada productor en el marco de un cartel maximizador de beneficios estático, cuyo procedimiento se muestra en los párrafos siguientes. En cuanto al nivel de inversión del *fringe* innovador, se supone que éste corresponde a los gastos promedios en desarrollo y exploración de pozos petroleros en Estados Unidos entre 2008 y 2010, cuya fuente es la Agencia de Información de Energía de Estados Unidos, EIA.

Volviendo a la producción inicial de cada miembro del cartel, se supone que ésta está dada por la solución que maximiza conjuntamente los beneficios de todos sus miembros. Es importante señalar que en la práctica los miembros del cartel en general no van a producir esta cantidad óptima, debido a la existencia de problemas de información que generan incentivos a desviarse de la producción maximizadora de beneficios, aun cuando ello no pueda ser detectado y no produzca un rompimiento del acuerdo colusivo. Este comportamiento, largamente estudiado desde Stigler (1964) en adelante, no será considerado en la calibración, aunque sí debe tenerse presente a la hora de extraer conclusiones respecto de los resultados de este ejercicio de calibración. En consecuencia, los niveles de producción del cartel que maximiza beneficios representan un límite inferior a la producción del cartel que debería observarse, tanto en la realidad como en el modelo propuesto en este trabajo.

Sea el problema del cartel que maximiza beneficios estáticamente:

$$\text{Max}_Q B = E_{\bar{\theta}} \left\{ \left[\frac{\theta_t}{b + \Delta\varphi + \phi_2} + \frac{1}{b + \Delta\varphi + \phi_2} [\alpha - \phi_1 - Q] - E(c_i) \right] Q \right\}$$

donde $Q = \sum_{i=1}^n x_{it}$ y $E(c_i)$ es el costo marginal promedio ponderado entre los productores pertenecientes al cartel. De la condición de primer orden de este problema se encuentra que la producción que maximiza los beneficios conjuntos del cartel está dada por.

$$E_{\bar{\theta}} \left\{ \frac{\theta_t}{b + \Delta\varphi + \phi_2} + \frac{1}{b + \Delta\varphi + \phi_2} [\alpha - \phi_1 - 2Q] - E(c_i) \right\} = 0$$

entonces,

$$Q = \sum_{i=1}^n x_{it} = E_{\bar{\theta}} \left\{ \frac{1}{2} [\theta_t + \alpha - \phi_1 - (b + \Delta\varphi + \phi_2) E(c_i)] \right\} \quad (4)$$

donde $y_i^* = pr_i * Q$, siendo pr_i la cuota promedio de producción del país i entre los años 2000 y 2017.

En cuanto a los niveles de producción de los miembros del cartel cuando se entra en una fase de castigo, el trabajo de Porter (1983) deriva analíticamente cuáles son las soluciones o respuestas óptimas de cada productor de un cartel usando la estrategia de Green y Porter (1984)

con competencia en cantidades producidas. Porter encuentra que la respuesta óptima en un equilibrio reversivo es la solución de Cournot. Por ello, tomamos la función de beneficios de cada uno de los miembros del Cartel:

$$\begin{aligned}\delta_i &= E_{\bar{\theta}} \left\{ \pi_i \left(z_i, \bar{\theta} + \tilde{p} \left(z_i + \sum_{j \neq i} z_j \right) \right) - c_i z_i \right\} \\ &= E_{\bar{\theta}} \left\{ \left[\frac{\theta_t}{b + \varphi + \phi_2} + \frac{1}{b + \varphi + \phi_2} p \left(z_i + \sum_{j \neq i} z_j \right) - c_i \right] z_i \right\}\end{aligned}$$

con lo cual el problema que enfrenta cada uno de estos productores es el siguiente:

$$\text{Max}_{z_i} \delta_i = E_{\bar{\theta}} \left\{ \left[\frac{\theta_t}{b + \Delta\varphi + \phi_2} + \frac{1}{b + \Delta\varphi + \phi_2} \left[\alpha - \phi_1 - \left(z_i + \sum_{j \neq i} z_j \right) \right] - c_i \right] z_i \right\}$$

La condición de primer orden para cada miembro del cartel es:

$$\begin{aligned}E_{\bar{\theta}} \left\{ \frac{\theta_t}{b + \Delta\varphi + \phi_2} + \frac{1}{b + \Delta\varphi + \phi_2} \left[\alpha - \phi_1 - \left(2z_i + \sum_{j \neq i} z_j \right) \right] - c_i \right\} &= 0 \rightarrow \\ z_i = E_{\bar{\theta}} \left\{ \frac{1}{2} \left[\theta_t + \alpha - \phi_1 - c_i(b + \Delta\varphi + \phi_2) - \sum_{j \neq i} z_j \right] \right\} &\quad (5)\end{aligned}$$

en donde esta solución Cournot-Nash debe resolver n ecuaciones como la planteada en (4), siendo n el número de miembros del cartel.

Una vez obtenidos los niveles de producción y beneficios de colusión generado por el modelo, tanto en la fase de colusión (4) como en la de reversión (5), se procede a calibrar los parámetros usados en ambas series de Taylor en (3).

En cuanto a los parámetros de demanda, se supone una demanda lineal tal como el modelo desarrollado en el apartado 4.2. Así, $\theta_t + \alpha$ representa el intercepto de la demanda total, el cual se descompone en dos factores: α representa el componente determinístico y θ_t representa el componente estocástico del intercepto de la demanda. A su vez, la pendiente de la función de demanda total $-b-$ se obtiene a partir de la elasticidad de demanda por petróleo crudo estimada por Baumeester y Peersman (2013), que es igual a $-0,1$ para la actual década. Tal elasticidad, bastante pequeña, es consistente con la entregada por trabajos recientes (Serletis, Timilsina y Vasetsky, 2010; Boderstein y Guerrieri, 2011; y Kilian y Murphy, 2013).

Para los parámetros de oferta de las firmas precio aceptante, se supone que para el *fringe* innovador, cuya función de costos es cuadrática en el modelo, se deben calibrar tres parámetros de oferta relevantes: $\Delta\varphi$, ϕ_1 y ϕ_2 . Por un lado, $\Delta\varphi$ corresponde a la pendiente de su función de oferta, la que teóricamente tomará el valor de φ si no innova y $\varepsilon\varphi$ si logra innovar. Para su obtención, y a

falta de alguna estimación empírica, se asume una elasticidad igual a uno. El *fringe* innovador es representado por los productores petroleros localizados en Estados Unidos y Canadá. Por otro lado, ϕ_1 corresponde al intercepto de la función de oferta del *fringe* no innovador y ϕ_2 a la pendiente de la función de oferta del *fringe* no innovador. Para calcular estos valores se utiliza la elasticidad de oferta de los productores fuera de la OPEP estimada por Baumeester y Peersman (2013) Se supone que los miembros de este *fringe* son todos los productores de petróleo, excluyendo a los de Estados Unidos, Canadá y a los miembros de la OPEP.³

Recordemos que se supuso que cada productor perteneciente al cartel de la OPEP tiene una función de costos lineal, con un costo marginal igual a c_i . Para la calibración, por simpleza, se utiliza como aproximación del costo marginal una estimación del costo medio de producción, correspondiendo a su valor promedio anual entre los años 2005 y 2010.

Para la calibración y cálculos de los dos escenarios contrafactuales se usaron bases de datos procedentes de dos organizaciones. Por un lado, de la Agencia de Información de Energía de Estados Unidos (EIA por sus siglas en inglés) se obtuvo las estadísticas trimestrales de producción petrolera mundial y por país, entre enero del 2000 y marzo del 2017. Adicionalmente, se obtuvo los promedios de precios del petróleo mensuales para el precio del Barril de petróleo Brent desde enero del 2000 hasta junio del 2017. Por otro lado, el Banco Mundial provee una base de datos de rentas petroleras anuales. Estas rentas petroleras están en términos monetarios desde 1970 hasta 2008, y como porcentaje del Producto Interno Bruto desde 1970 hasta 2013. A partir de estas estadísticas, y usando los datos de producción y precios, se recuperaron los costos medios de producción.

Por último, se supone que la función de probabilidad que el cartel caiga en una fase de castigo sigue una distribución logística $\tilde{F}_n(\bar{p} - \tilde{p}(r + \omega_i)) = \frac{1}{1 + e^{-(\bar{p} - \tilde{p}(r + \omega_i))}}$; mientras que la función de probabilidad de éxito del *fringe* innovador es de la forma $q(I) = \frac{I}{1+I}$.

Como el mercado es calibrado trimestre a trimestre, para luego calcular el promedio entre 2000 y 2017, la Tabla 3 entrega las estadísticas básicas –valor promedio, desviación estándar, valor máximo y mínimo– de cada parámetro para las funciones de demanda y oferta pertinentes. Los costos medios de producción de los miembros del cartel corresponden en todos los casos al costo de cada país promedio para el período 2005 a 2010.

Tabla 3. Estadísticas Descriptivas de los Parámetros Calibrados

³ Como miembros de la OPEP, solo se consideran a Ecuador, Venezuela, Irán, Irak, Kuwait, Qatar, Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Argelia, Angola, Libia y Nigeria. Se excluyeron de la OPEP y se consideran como del resto del mundo a Gabón (miembro desde el año 2016) y a Guinea Ecuatorial (miembro desde el año 2017).

	Promedio	Desviación Estándar	Máximo (Valor absoluto)	Mínimo (Valor absoluto)
Pendiente Demanda Total (b)	-292,23	122,81	-633,61	-187,42
Intercepto Demanda Total ($\theta_t + \alpha$)	97441,27	3151,17	103024,15	92851,62
Pendiente Oferta (Estados Unidos + Canadá)	162,26	86,96	391,34	80,91
Pendiente Oferta Resto (ϕ_2)	95,14	40,90	208,77	61,11
Intercepto Oferta Resto (ϕ_1)	26486,09	732,08	28783,05	25673,86
Costo Medio de Producción (países OPEP) (c_i)	15.10	7.30	28.30	5.80

Nota: Los interceptos de la demanda y la oferta, así como el costo medio de producción están medido en dólares a precios constantes por barril, con base IPC de Estados Unidos a diciembre de 2010 = 100.

Fuente: Elaboración propia.

Resta por dilucidar cuál es el precio límite (mínimo) que gatilla una fase de castigo y el largo de dicho período. Como no se cuenta con evidencia alguna respecto de estos dos parámetros, se estimarán las producciones (y precio) de equilibrio para los escenarios contrafactuales asumiendo diferentes valores para estas dos variables que son de elección del cartel pero inobservables para estos autores. Se exigen dos criterios mínimos sobre el umbral o precio límite que gatilla el quiebre del cartel: i) que éste debe ser menor que el de colusión, pero mayor al de interacción estratégica (fase de reversión), y ii) que entregue niveles de producción que cumplan también con que sean económicamente razonables, esto es que la producción bajo colusión sea menor que la de reversión. Tod para (\bar{p}, T) que no cumpla con alguno de estos dos criterios es desechado de las simulaciones que se entregan a continuación.

6. RESULTADOS EMPÍRICOS

Una vez obtenidos los valores de producción de los dos escenarios contrafactuales (modelos de colusión con T períodos de castigo y modelo de reversión o interacción estratégica), se compararon con la producción real para cada país productor de petróleo. Se contrasta así cuál fue la estrategia adoptada por el cartel a caídas del precio del crudo, en particular como respuesta a la expansión de la producción de *shale oil* por parte principalmente de los productores de Estados Unidos.⁴ Igual procedimiento se repite para los precios de equilibrio, ya que es de particular interés nuestro lo sucedido con el desplome del precio del barril de petróleo desde mediados de 2014 a fines de 2015.

⁴ La simulación de los dos escenarios contrafactuales entrega la producción para cada miembro del cartel, así como para el *fringe* innovador (Estados Unidos y Canadá) y del *fringe* no innovador (resto de países productores). Por simpleza, se presentan en esta sección la información agregada para todo el cartel.

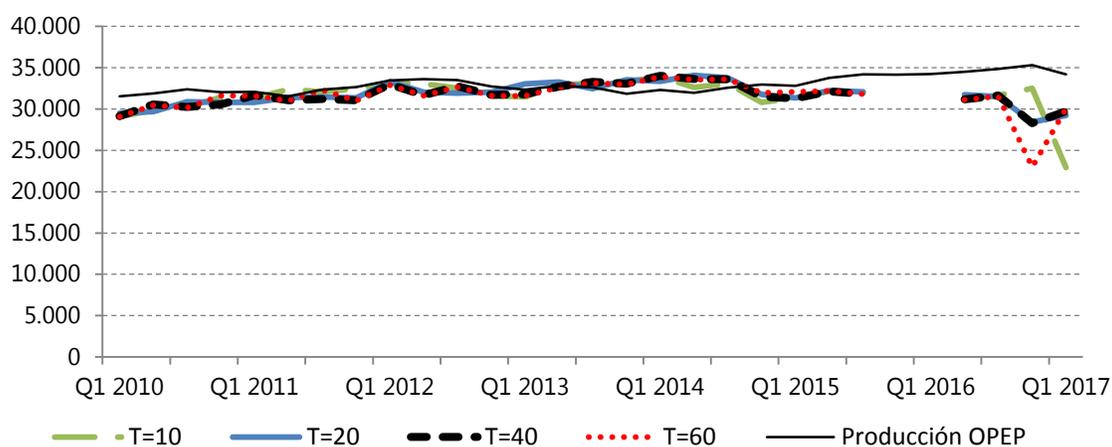
En el Gráfico 4 vemos el promedio de las simulaciones de la producción de la OPEP para diferentes periodos de castigos (T).⁵ Tal como se puede apreciar, si bien las series por periodo de castigos no son exactamente iguales, el modelo genera tendencias y niveles de producción relativamente similares para los diferentes periodos de castigos mostrados.

También podemos notar de dicho gráfico que no existen estimaciones para el 4° trimestre del 2015 y el 1° trimestre del 2016, infiriéndose que, dado los parámetros calibrados, no existen precios gatillos ni periodos de castigos que puedan sustentar el modelo para este par de trimestres.

En el Gráfico 5 podemos apreciar que el nivel de producción generado por un equilibrio de Cournot es considerablemente más alto el nivel de producción efectivo por parte de la OPEP; mientras que la data parece ser consistente con la producción simulada por la linealización del modelo de colusión, para 20 trimestres de castigo en caso de desvío. En otras palabras, si se hubiera producido un quiebre en el cartel de la OPEP en el 4° trimestre de 2014, su producción debería haberse acercado a la de la fase de castigo, lo que no ocurrió. Se observa un leve aumento de la producción del cartel, llegando a 35 millones de barriles al día, por encima de lo simulado con acuerdo que se estimó en 28 millones de barriles al día; sin embargo, de haberse entrado en una fase de castigo la producción debería haberse duplicado a los 70 millones de barriles. No es razonable suponer que haya un ajuste lento hacia un nuevo equilibrio, luego de 14 trimestres de iniciado el desplome de los precios del crudo.

Gráfico 4. Producción Promedio de la OPEP para Periodos de Castigo Alternativos

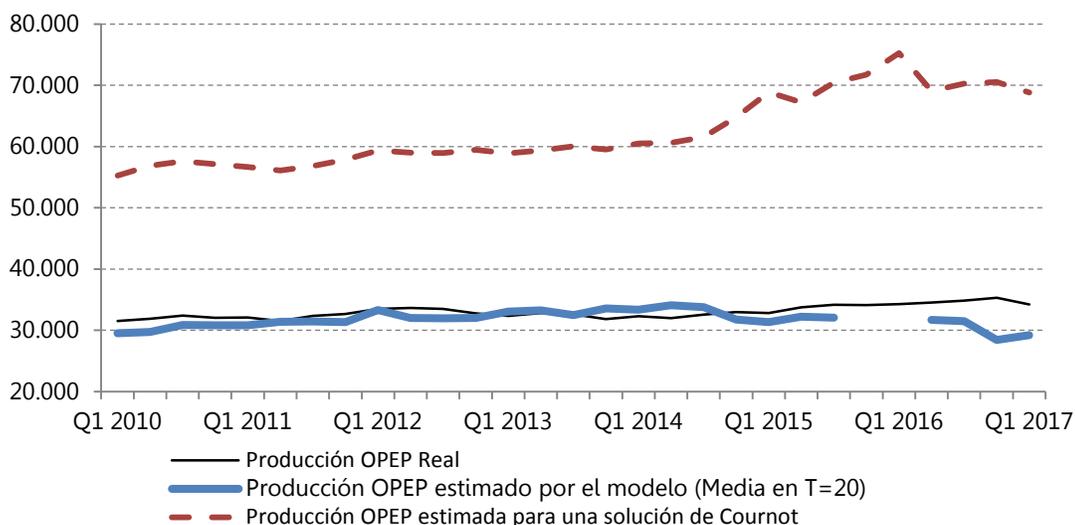
(M Barriles / día, 1° trimestre 2010 al 1° trimestre 2017)



Fuente: Cálculos propios para las cuatro simulaciones y EIA para la producción real.

⁵ La estimación muestra los promedios de los niveles estimados de producción que generan un nivel de precios mayor al umbral o precio gatillo, es decir que sostengan el esquema de colusión presentado en el modelo. Debido que en cada trimestre existen varios niveles de precios gatillos que generan sus respectivos niveles de producción y de precios por encima del precio gatillo, el gráfico muestra el promedio de dichos niveles de producción.

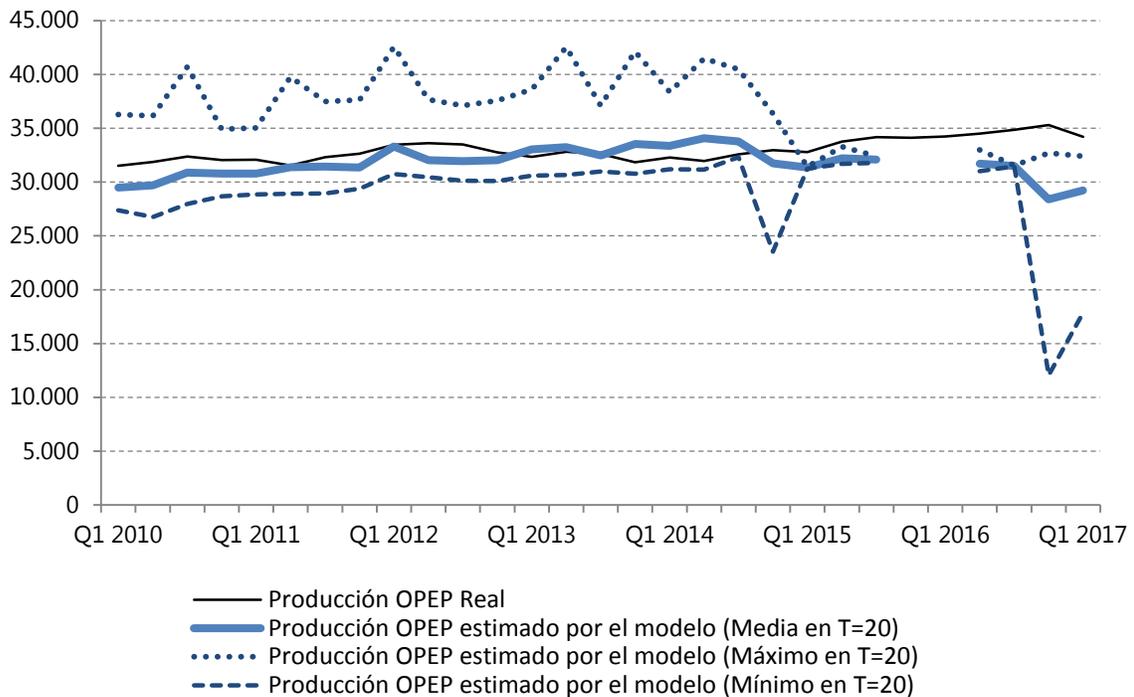
**Gráfico 5. Producción Simulada para Modelo Colusivo (valor promedio, T = 20),
Modelo de Cournot para Reversión y Producción Real de la OPEP**
(M Barriles / día, 1° trimestre 2010 al 1° trimestre 2017)



Fuente: Cálculos propios para simulaciones de contrafactuales y EIA para la producción real.

Consistente con la discusión anterior, el Gráfico 6 revela que igual hubo un desvío, aunque leve, en la estrategia colusiva de los miembros del cartel de la OPEP desde fines de 2014. Se observa que entre el 1° trimestre de 2010 y el 4° trimestre de 2014, el nivel de producción de la OPEP se encuentra dentro de intervalo de niveles de producción simulado por el modelo linealizado de acuerdo colusivo con castigo en caso de desvío. A partir del 1° trimestre de 2015, el nivel de producción de los miembros de la OPEP se encuentra fuera del intervalo de producción proyectado por el modelo, lo que podría ser una evidencia leve de un posible cambio de estrategia por parte de la OPEP al inicio del año 2015. Con todo, nos parece que esto no desvirtúa un quiebre definitivo hacia una fase de castigo, por lo señalado en el párrafo previo, sino que más bien una adecuación a un nuevo escenario con precios más bajos.

**Gráfico 6. Producción Simulada Producción Media, Máxima y Mínima para T = 20
y Producción Real de la OPEP**
(Miles de Barriles / día, 1° trimestre 2010 al 1° trimestre 2017)

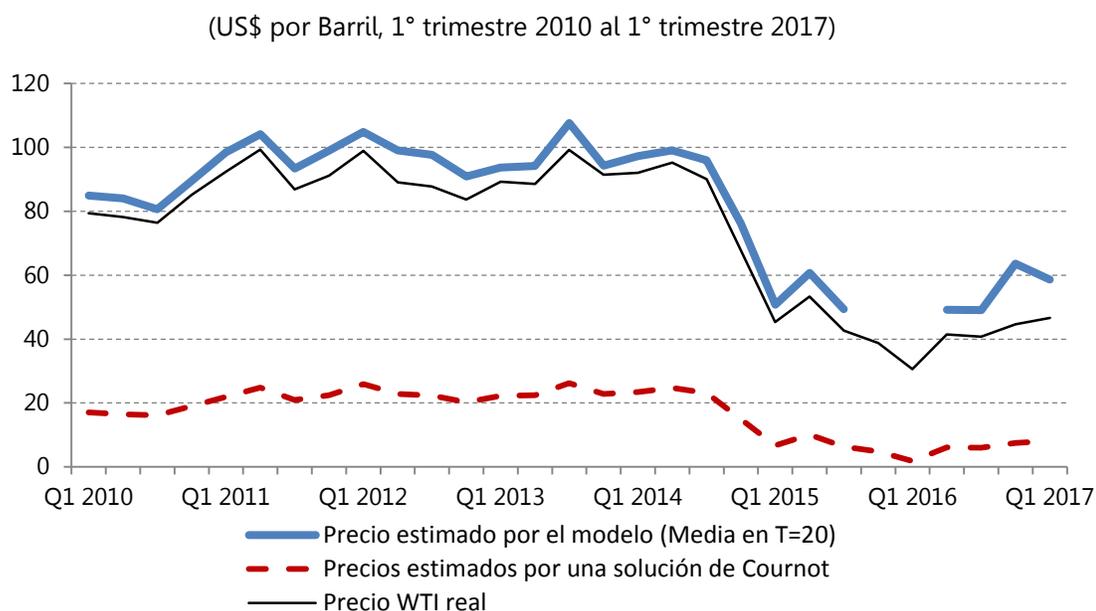


Fuente: Cálculos propios para simulaciones de contrafactuales y EIA para la producción real.

El Gráfico 7 muestra que los precios generados por el modelo de colusión propuesto son bastante cercanos a los precios WTI reales; mientras que, como era de esperarse, los precios simulados por el modelo de Cournot o de reversión, están muy por debajo de los precios reales, para todo el período estudiado. Esto corrobora lo señalado por el Gráfico 5 precedente.

Gráfico 7. Precio Medio Simulado por el Modelo (T = 20), Precio de Cournot y Precio WTI ⁶

⁶ WTI corresponde al precio *West Texas Intermediate*. Este precio por barril está deflactado por el IPC de Estados Unidos, con Dic2010 = 100.



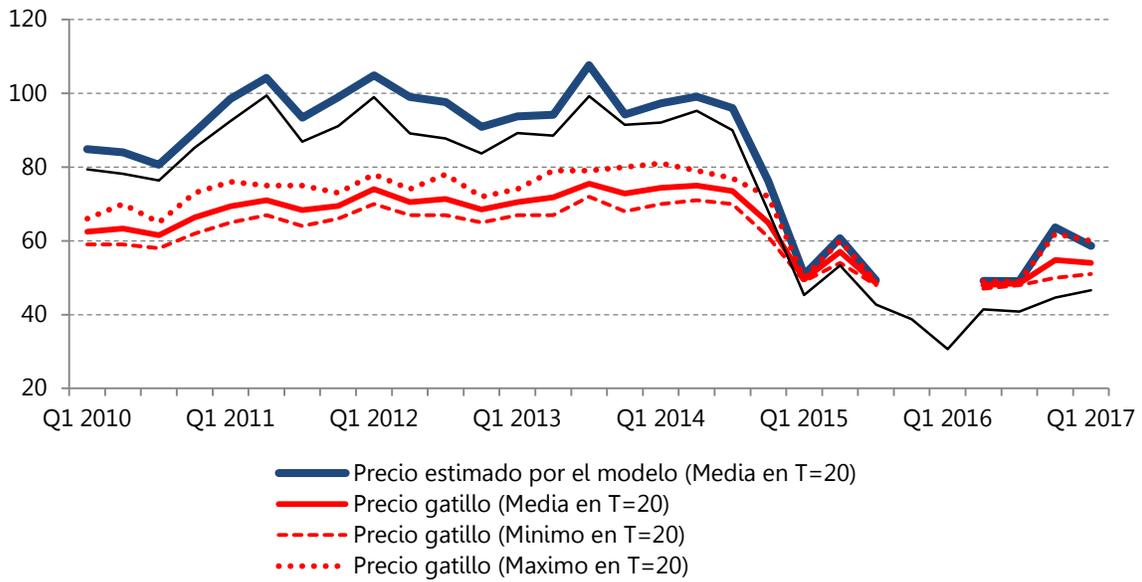
Fuente: Cálculos propios para precios simulados en contrafactuales y EIA para precios reales.

El Gráfico 8 es una muestra más robusta que no se habría gatillado una fase reversiva en el cartel de la OPEP en en 4° trimestre de 2014 ni posteriormente. El precio promedio simulado por el modelo para $T = 20$ es siempre mayor a cualquier umbral o precio gatillo que se simula para dicho modelo, para todos los trimestres analizados. Con todo, a partir del 1° semestre de 2015, los precios simulados por el modelo linealizado de colusión son muy cercanos a los precios gatillos que los sustentan, pero incluso nunca inferiores al precio gatillo máximo simulado para el respectivo período.

Finalmente, en el Gráfico 9 se aprecia que las simulaciones de la producción del *fringe* innovador (Canadá y Estados Unidos), obtenidas en el entorno de estrategia colusiva por parte de la OPEP, muestran valores cercanos a la producción real de dicho *fringe* entre el 1° trimestre del 2010 al 4° trimestre del 2014. A partir del 1° trimestre del 2015, las simulaciones en el entorno colusivo muestran niveles de producción más altos a los efectivamente observados en la realidad. Ello corrobora que tampoco los productores considerados como *fringe* innovadores estimaban que el cartel de la OPEP se encontraba en una fase reversiva de su acuerdo, ya que en dicha situación deberían haber reducido, y no aumentado, su producción.

Gráfico 8. Precio Real y Medio Simulado versus Precios Gatillo Medio, Máximo y Mínimo

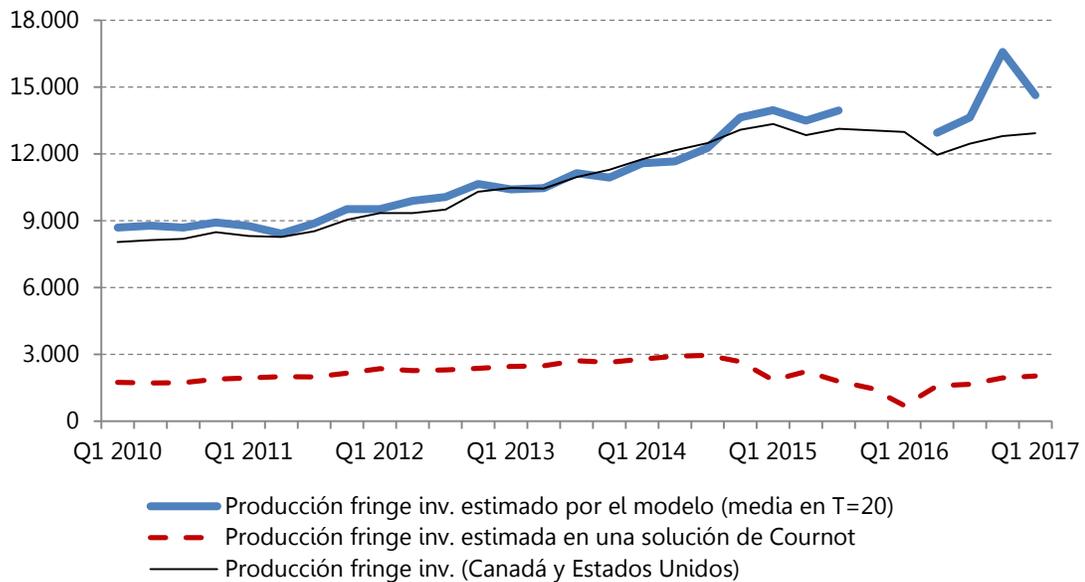
(US\$ por Barril, 1° trimestre 2010 al 1° trimestre 2017)



Fuente: Cálculos propios para precios simulados en contrafactual y gatillos, y EIA para precios reales.

Gráfico 9. Producción Simulada del *Fringe* Innovador por el Modelo de Colusión (T = 20), por el Modelo de Cournot, y Producción Real

(Miles de Barriles / día, 1° trimestre 2010 al 1° trimestre 2017)



Fuente: Cálculos propios para producciones simuladas y EIA para producción real.

Finalmente, aunque no se reportan en este trabajo, se puede mencionar que las mismas series de producción y precios se obtuvieron para un modelo de monopolista maximizador de beneficios, que sirvieron de insumo para calibrar el modelo de colusión con T periodos de castigo, tal como

fue señalado en la sección 5. Los valores simulados en producción y precios para dicho modelo son muy similares al de nuestro modelo contrafactual de colusión y, por ende, muy alejados de aquellos valores que suponen una reversión en el cartel a partir de fines de 2014.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo explora teórica y empíricamente las posibles estrategias colusivas de un cartel en presencia de competidores externos precio-aceptante que pueden afectar al acuerdo colusivo a través de la expansión de su capacidad productiva por innovación. Partiendo del modelo canónico de esta literatura propuesto por Green y Porter (1984), se desarrolló un modelo teórico con estructura dual de un oligopolio cartelizado que convive con un *fringe* innovador, analizando las posibles estrategias adoptadas por el cartel en un entorno con problemas de información.

Este modelo se motiva en el hecho que en el *upstream* de la industria petrolera co-existen productores cartelizados y al menos un competidor importante (Estados Unidos) que ha sido exitoso en innovar en su producción. El desarrollo de nuevas técnicas extractivas ha posibilitado a los productores de este país expandir su producción total de manera considerable desde principios de esta década. Esta situación y tanto los mayores stocks de crudo como las expectativas de mayor producción futura, según nuestro modelo, podrían explicar el derrumbe del precio del crudo en el segundo semestre de 2014. Lo más importante es que, de acuerdo a nuestro modelo, tal derrumbe de precios es probable que siga siendo bajo el contexto de producción colusiva del cartel de la OPEP y no, como parte de los expertos argumentaban, por un quiebre en el cartel.

Las predicciones del modelo son luego contrastadas empíricamente. Para ello se compara la diferencia de los valores reales observados desde 2000 a 2017 de tres variables endógenas diferentes: producción total de los países cartelizados, precio internacional del crudo y producción del *fringe* innovador (Estados Unidos), con los valores simulados para estas variables para los escenarios de cartelización y de fase reversiva o competencia a la Cournot. Para el primer escenario contrafactual se simplificó el modelo desarrollado teóricamente, por la vía de realizar una aproximación lineal mediante una serie de Taylor de primer orden de las dos principales condiciones de equilibrio predichas por el modelo. Tal aproximación lineal entrega similares predicciones teóricas que el modelo, pero es mucho más manejable desde la perspectiva de su resolución numérica. Ello por cuanto, de no hacerse esta simplificación, se requeriría resolver un modelo que simule producción para cada país, dentro y fuera del cartel de la OPEP, lo que es muy complejo a la hora de resolver un modelo recursivo como el presentado en la sección 4 de este trabajo.

La evidencia es fuerte en sostener que el derrumbe del precio internacional del crudo no se debe a un quiebre del cartel de la OPEP, ya que los niveles de producción de los países cartelizados sigue siendo muy cercano al de la estrategia colusiva planteada, en particular comparado con la producción de estos en el modelo de Cournot, que representa precisamente el escenario contrafactual de fase reversiva o castigo del acuerdo. Esta conclusión es además robusta a otros dos indicadores: la producción de Estados Unidos es más acorde a enfrentar a una OPEP cartelizada que a una OPEP quebrada; y, sobretodo, a que el precio de equilibrio del crudo simulado por nuestro modelo es superior al precio gatillo o umbral, bajo el cual se gatillaría su fase reversiva.

Con todo, el modelo simulado muestra un cambio de tendencia en la estrategia del cartel acontecida en 2015. En efecto, las simulaciones muestran que la producción la OPEP para el modelo de cartelización es muy cercana a su producción real entre 2010 y mediados de 2014, siendo unas veces mayor y en otras menos a la producción real. Sin embargo, de manera sistemática, desde el tercer trimestre de 2014, la producción real crece y es mayor a la simulada bajo cartelización, llegando incluso en el primer trimestre de 2017 a ser un 20% más alta. Sin perjuicio de lo señalado, nos parece que se está lejos de un escenario de quiebre del acuerdo colusivo, pues el modelo señala que la producción de la OPEP en caso de quiebre de su acuerdo debería ser el doble a la observada.

En conclusión, más que una desarticulación del cartel de la OPEP, la caída en los precios internacionales del crudo parece ser consecuencia principalmente de la expansión de la producción del *fringe*, innovador, pudiendo haber afectado ligeramente la estrategia del cartel de la OPEP de manera de adaptarse a esa mayor competencia. De hecho, de acuerdo al modelo simulado, se aprecia que la estabilidad del cartel depende del precio gatillo que genera la implementación de la estrategia de castigo; mientras que el horizonte de castigo no afecta sustancialmente el comportamiento de los miembros del cartel. Esta fuerte relación entre expansión de la producción del *fringe* y precio del crudo, más el hecho que luego de tres años del desplome del precio del petróleo su demanda se mantiene a niveles de principio de la década, nos hace pensar que fue la innovación exitosa de extracción de *shale oil* en Estados Unidos, además, aunque en menor grado, a innovaciones de extracción por arenas bituminosas en Canadá, lo que produjo el desplome de este precio.

■

REFERENCIAS

- Bagwell, K. y R. Staiger (1997). "Collusion over the Business Cycle", *The RAND Journal of Economics* 28(1): 82-106.
- Banco Mundial (2015). *Commodity Market Outlook. World Bank Quarterly Report*, Abril.
- Baumeister, C. y L. Kilian (2016). "Understanding the Decline in the Price of Oil since June 2014", *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 3(1): 131-158
- Baumeister, C. y G. Peersman (2013). "The Role of Time-varying Price Elasticities in Accounting for Volatility Changes in the Crude Oil Market", *Journal of Applied Econometrics* 28(7): 1087-1109.
- Fondo Monetario Internacional (2015). "Global Implications of Lower Oil Prices", IMF Staff Discussion Note.
- Genesove, D. y Mullin, W.P. (1998). "Testing Static Oligopoly Models: Conduct and Cost in the Sugar Industry, 1890-1914", *The RAND Journal of Economics* 29(2): 355-377.
- Green, E., y R. Porter (1984). "Noncooperative Collusion under Imperfect Price Information", *Econometrica* 52(1): 87-100
- Hotelling, H. (1931). "The Economics of Exhaustible Resources", *Journal of Political Economy* 82(5): 137-175.
- Lin, C., y G. Wagner (2007). "Steady-state Growth in a Hotelling Model of Resource Extraction", *Journal of Environmental Economics and Management* 54(1): 68-83.
- Lin, C. (2015). "Market Power in the World Oil Market: Evidence for an OPEC Cartel and an Oligopolistic Non-OPEC Fringe", Working Paper.
- Kilian, L. (2016). "The Impact of the Shale Oil Revolution on U.S. Oil and Gasoline Prices", *Review of Environmental Economics and Policy* 10(2): 185-205.
- Kilian, L. y D. Murphy (2013). "The Role of Inventories and Speculative Trading in the Global Market for Crude Oil", *Journal of Applied Econometrics* 29, 454-478.
- Knittel, C., J. Lepore y A. Shafran (2016). "Demand Uncertainty Leads to Diverse Collusive Dynamics", Mimeo disponible en: <<https://pdfs.semanticscholar.org/0f2b/4eb1d22450f18d6ee9188066cf23030eab8b.pdf>>
- Krichene, N. (2002). "World Crude Oil and Natural Gas: A Demand and Supply Model", *Energy Economics* 24(6): 557-576.
- Montero, J. y J. Guzmán (2010). "Output-Expanding Collusion in the Presence of a Competitive Fringe", *The Journal of Industrial Economics* 50(1): 106-126.

- Organización de Países Exportadores de Petróleo (2014). Encuentro N° 166 de la OPEP, Viena, 27 de Noviembre de 2014. <http://www.opec.org/opec_web/en/press_room/2938.htm>.
- Pindyck, R. (1978). "The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources", *Journal of Political Economy* 86(5): 841-861.
- Porter, R. (1983). "Optimal Cartel Trigger Price Strategies", *Journal of Economic Theory* 29(2): 313-338.
- Rotemberg J. y G. Saloner (1986). "A Supergame-Theoretic Model of Price Wars during Booms", *American Economic Review* 76(3): 390-407.
- Salant, S. (1976). "Exhaustible Resources and Industrial Structure: A Nash-Cournot Approach to the World Oil Market", *The Journal of Political Economy* 84(5): 1076-1094.
- Staiger, R. y F. Wolak (1992). "Collusive Pricing with Capacity Constraints in the Presence of Demand Uncertainty", *The RAND Journal of Economics* 23(2): 203-220.
- Ulph, A. y G. Folie (1980). "Exhaustible Resources and Cartels: An Intertemporal Nash-Cournot Model", *The Canadian Journal of Economics* 13(4): 645-658.