



## Costos económicos de las externalidades ambientales del *fracking*: un análisis de metarregresión y algunas implicaciones para Colombia\*

### Economic Costs of the Environmental Externalities of Fracking: a Meta-regression Analysis and Some Implications for Colombia

Pablo Blas Tupac Silva Barbosa\*\*, Fernando Carriazo\*\*\*

Recibido: 2017-04-01 // Aprobado: 2017-04-30 // Disponible en línea: 2017-06-30

Cómo citar este artículo: Silva Barbosa, P. B. T. y Carriazo, F. (2017). Costos económicos de las externalidades ambientales del *fracking*: un análisis de metarregresión y algunas implicaciones para Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 21(41), 25-42. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd21-41.ceea>  
doi:10.11144/Javeriana.ayd21-41.ceea

#### Resumen

La cuantificación monetaria de las externalidades ambientales derivadas de la explotación de hidrocarburos no convencionales que utiliza la técnica de fracturación hidráulica o *fracking* muestra una alta variabilidad pues sus costos no están unívocamente determinados. En este documento desarrollamos un análisis de metarregresión sobre los posibles efectos económicos atribuibles a la proximidad de entornos que puedan verse afectados ambientalmente por el *fracking*. Las categorías de impacto analizadas son: 1) contaminación de fuentes de agua, 2) disposición de residuos peligrosos, 3) contaminación del aire y 4) sismicidad inducida. Los resultados de nuestras estimaciones sugieren un efecto de mayor magnitud y significancia para las dos primeras. Se muestra también que aspectos metodológicos y externos a las investigaciones tales como el año de la publicación del estudio o la especificación utilizada influyen sobre la estimación de los costos.

**Palabras clave:** externalidades ambientales negativas; *fracking*; análisis de metarregresión; precios hedónicos

**Clasificación JEL:** Q51, Q53.

\* Este artículo es el resultado de la tesis titulada *Costos económicos asociados a las externalidades ambientales del fracking*, desarrollada por el primer autor en el 2016 para optar al título de magíster en Economía por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Fue dirigida por el profesor Fernando Carriazo.

\*\* M. Sc. Economía, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: pablo.blas.silva@gmail.com

\*\*\* Ph. D. Agricultural, Environmental and Regional Economics. Profesor de la Universidad del Rosario. Correo electrónico: fernando.carriazo@urosario.edu.co

**Abstract**

The monetary quantification of environmental externalities derived from the exploitation of unconventional hydrocarbons using hydraulic fracturing or fracking shows a high variability because their costs are not uniquely determined. In this document we develop a meta-regression analysis on the possible economic effects attributable to the proximity of settings that may be environmentally affected by fracking. The impact categories analyzed are: 1) contamination of water sources, 2) disposal of hazardous waste, 3) air pollution and 4) induced seismicity. The results of our estimates suggest an effect of greater magnitude and significance for the first two items. It also shows that methodological aspects and those external to the investigations such as the year of the publication of the study or the specification used influence the estimation of the costs.

**Keywords:** environmental externalities; fracking; meta-regression analysis; hedonic pricing model

**JEL classification:** Q51, Q53.

## Introducción

La explotación masiva de hidrocarburos no convencionales (HNC) ha reconfigurado el panorama energético mundial. Generalmente, los HNC tales como el petróleo y el gas se encuentran atrapados en rocas con baja permeabilidad, lo cual hace que deban ser explotados por medio de la técnica de perforación horizontal para la fractura hidráulica o *fracking*. El potencial de esta técnica ha elevado significativamente, en los últimos años, las reservas de petróleo y gas en países como Canadá, donde la disponibilidad efectiva de este último recurso ascendió de 62 trillones de pies cúbicos (Tcf) a 388 Tcf, o México, que pasó de contar con 12 Tcf a 681 Tcf. En el caso de los Estados Unidos, los HNC triplicaron sus reservas en comparación con los yacimientos convencionales, reservas que pasaron de 272.5 Tcf a 862 Tcf, y se espera que para el 2017 se convierta en un exportador neto (United States Energy Information Administration, 2015).

En Colombia, las reservas estimadas en yacimientos no convencionales ascienden a 19 Tcf de gas y 4.6 mil millones de barriles de petróleo (United States Energy Information Administration, 2013). Lo anterior, además de incrementar la capacidad energética del país, lo convierte en el séptimo del continente con mayor potencial en dichos yacimientos.

Pese a las manifiestas ventajas económicas y energéticas que ofrecen los HNC, sus costos ambientales y comunitarios inherentes son de especial relevancia. Algunos de los efectos negativos han sido ampliamente documentados en la literatura. Entre estos se encuentran: sobreutilización del recurso hídrico, degradación de reservorios de agua subterránea, disposición indebida de residuos altamente peligrosos, contaminación del aire y sismicidad inducida, entre otros (Barth, 2010).

Sobre el consumo excesivo de agua, la United States Environmental Protection Agency (2011) estimó que cerca de 35 000 pozos de explotación en Estados Unidos requirieron entre 70 y 140 miles de millones de galones de agua anualmente, lo que equivale al agua necesaria para suplir entre cuarenta y ochenta ciudades con poblaciones de 50 000 habitantes.

Con respecto a la contaminación de fuentes de agua, las fracturas provocadas por el proceso mismo de extracción pueden servir de puente entre los reservorios de agua subterránea y los químicos inyectados en las tuberías instaladas. Un análisis de acuíferos de 68 hogares en Pensilvania (Jackson *et al.*, 2014) encontró que la concentración de metano en estos pozos era diecisiete veces mayor en comparación con zonas en las que no se llevaba a cabo la práctica, a la cual era atribuible este fenómeno.

En lo referente a la disposición de residuos, estos pueden inyectarse bajo tierra, lo cual, como se mencionó arriba, es una presunta causa de sismos considerables (además de propiciar la contaminación de reservorios de agua subterránea) o puede depositarse en vertederos diseñados para esto. Los residuos generados representan entre el 10 % y el 35 % de la mezcla inicial de agua y químicos usados para la extracción de HNC, es decir, por operación pueden generarse hasta 28 000 m<sup>3</sup> de agua residual, que incluye químicos potencialmente peligrosos para la salud humana (Jackson *et al.*, 2014).

En cuanto a la contaminación del aire, los efectos del metano son más fuertes que los del dióxido de carbono y, además, tiene mayor probabilidad de escapar a la atmósfera durante el proceso de fraccionamiento hidráulico (Tollefson, 2012). En efecto, los autores encontraron que durante el proceso de fraccionamiento se escapaba cerca del 4 % del gas a la atmósfera en la cuenca de Julesburg en Denver.

La sismicidad inducida por el *fracking* puede presentarse por dos canales. El primero es mediante la inyección rutinaria de químicos y agua, lo que genera microsismos, aunque estos no representan un riesgo considerable. El segundo canal lo constituye la inyección bajo tierra del agua residual del proceso. Esta práctica puede inducir de hecho a terremotos de magnitud considerable. Un sismo en Oklahoma en el 2012, desencadenado por la disposición subterránea de estos desechos, destruyó catorce viviendas (Ellsworth, 2013).

Estas evidencias han influido en las decisiones de algunos países como Francia, Bulgaria y algunas regiones de España, donde la técnica del *fracking* se encuentra prohibida, mientras que en Irlanda del Norte y Sudáfrica, entre otros países, se ha declarado una moratoria de su uso (di Risio, 2012).

En consecuencia, un horizonte realista de las implicaciones sobre el bienestar social de la explotación de HNC pasa, necesariamente, por sopesar los beneficios económicos con sus respectivos costos ambientales. Sin embargo, como se argumentará en la segunda sección del documento, los resultados de estudios que se han realizado en ese sentido presentan una alta variabilidad, tanto por las condiciones particulares de la zona donde se realizan como por la metodología usada.

Puesto que en Colombia este tipo de explotación no ha pasado de ser más que una expectativa, es un hecho que el problema de la cuantificación de costos ambientales y comunitarios esperados en el país está totalmente abierto, y es oportuno, entonces, aproximarse a él de manera rigurosa.

Una forma de cuantificar las externalidades ambientales la constituye el cálculo de la variación en el precio de propiedades cercanas al centro de operaciones. Su argumento teórico radica en que las propiedades en sí mismas representan un flujo de servicios y atributos que, además de capitalizarse en el mercado inmobiliario, se ve afectado por el uso adverso de la tierra o por la contaminación de los recursos en su entorno (Farber, 1997).<sup>4</sup>

El presente trabajo tiene dos objetivos: primero, estimar el efecto que tienen las principales externalidades asociadas con la explotación de HNC sobre el valor de propiedades, para aproximar así su costo económico, y segundo, examinar cómo y en qué medida factores metodológicos y externos de estudios realizados previamente influyen en la valoración de tal efecto. Las externalidades se clasifican en las siguientes cuatro categorías: 1) contaminación de fuentes de agua superficiales y subterráneas, 2) vertederos de residuos peligrosos, 3) contaminación del aire y 4) eventos sísmicos producto de la explotación.

La metodología propuesta es el análisis de metarregresión, también conocido como metaanálisis. Este método examina la variabilidad sistemática de resultados entre investigaciones que estudiaron de manera aislada o conjunta las externalidades propuestas, a través de modelos de precios hedónicos y estableciendo una relación entre la distancia de las propiedades a la fuente de contaminación y la variación en su valor. De acuerdo con nuestras investigaciones, este es el primer trabajo que utiliza la técnica de metaanálisis para examinar las principales implicaciones ambientales de la explotación de HNC. A lo largo de los modelos planteados en el presente documento, la categoría de impacto relacionada con la contaminación de fuentes de agua es la que muestra coeficientes de mayor magnitud y significancia. En el contexto colombiano, el resultado es de especial relevancia dada la complejidad de la estructura hidrográfica del país.

## Valores de la vivienda, metarregresión y evaluación ambiental de la explotación de hidrocarburos no convencionales

Son varios los estudios que relacionan los impactos de la explotación petrolera con el valor de las viviendas localizadas en las proximidades de las operaciones de extracción. Muehlenbachs, Spiller y Timmins (2014) calculan, a través de un modelo de precios hedónicos, los efectos de la explotación de HNC en el valor de propiedades adyacentes a la zona de operación, para lo cual usan un panel de ventas de vivienda en 36 condados de Pensilvania en el periodo 1995-2012.<sup>5</sup> En el panel se incluyeron

4 Una externalidad se define como un impacto no compensado que tienen las acciones de un agente de la economía sobre el bienestar de otro agente. La contaminación es un ejemplo típico de externalidad negativa. Por ejemplo, las emisiones de una fábrica pueden producir impactos negativos en el bienestar de la población vecina. Estos impactos generalmente no son compensados.

5 Precios hedónicos se refiere a una metodología de valoración ambiental, de acuerdo con la cual el precio de

tanto condados en los que se aplicó el *fracking* como en los que no. Mediante la aplicación de la técnica de diferencias en diferencias, y en el marco de un modelo de precios hedónicos, los autores estiman que el riesgo de contaminación de agua subterránea, producto de la explotación, genera una disminución en el valor de las propiedades que dependen de esta fuente, que varía entre el 10% y el 22%.<sup>6</sup> El anterior resultado es válido para viviendas que se encuentran a lo sumo a un kilómetro y medio de cercanía al núcleo de la extracción de HNC y se traduce en una pérdida anual de US\$33 214, en promedio, para cada una de estas.

Por su parte, Gopalakrishnan y Klaiber (2012) y Delgado, Guilfoos y Boslett (2014) también utilizan modelos hedónicos para identificar efectos del *fracking* en propiedades adyacentes a otras operaciones en Pensilvania. Los primeros autores encuentran que el impacto de la fase temprana de las operaciones en el valor de propiedades, cuando las secuelas para el medio ambiente y la salud no son aún claras, es negativo y de 3.8%, es decir, US\$5883, en un radio de una milla. Por su parte, los segundos hallan, a partir de un modelo semiparamétrico, que el efecto es una reducción en el precio de cada propiedad de aproximadamente 5%, lo que corresponde a US\$6000, en aquellas situadas a tres millas o menos de la zona de operaciones.<sup>7</sup>

Además de las aplicaciones de valoración ambiental basadas en estimaciones directas de precios hedónicos, en la literatura hay varios estudios que han utilizado el análisis de metarregresión basado en estimaciones hedónicas para aproximar los efectos de cercanía a centros de actividad económica de diversa índole, sin embargo, consideramos que la técnica de metarregresión no ha sido aplicada para identificar los impactos de las operaciones de hidrocarburos en el valor de la vivienda, siendo esta la principal contribución del presente trabajo.<sup>8</sup> Mohammad *et al.* (2013) examinan por medio de metarregresión el impacto de proyectos ferroviarios sobre el valor de propiedades cercanas, mediante un modelo de efectos aleatorios. Braden, Feng y Won (2011) analizan el impacto de zonas de acumulación de desechos en el valor de propiedades, considerando varias categorías de impacto referentes al tipo de contaminación que generan. Smith y Huang (1995) estudian la influencia de las condiciones de mercado y la metodología de precios hedónicos sobre el valor estimado de la disponibilidad marginal a pagar (DMAP) por mejorar la calidad del aire.<sup>9</sup> Ambas investigaciones usan mínimos cuadrados ordinarios (MCO) para estimar el modelo que proponen.<sup>10</sup>

Simons y Saginor (2006) llevaron a cabo un metaanálisis acerca de los efectos de un gran número de fuentes de contaminación ambiental y de amenidades positivas en el valor real de las propiedades. El insumo del trabajo estuvo conformado por 75 investigaciones. El método de estimación usado

---

un atributo ambiental se puede inferir a través de la relación que existe entre el precio de un bien de mercado como la vivienda y una característica no mercadeable relacionada (por ejemplo, la calidad ambiental del vecindario). La estimación de un modelo econométrico que relaciona el precio con un conjunto de características estructurales de la vivienda o del entorno se conoce como *estimación hedónica*.

- 6 La técnica de diferencias en diferencias evalúa cambios esperados en el precio de las propiedades entre el periodo posterior y el periodo anterior al evento de *fracking* en viviendas expuestas a los efectos, menos la diferencia esperada en el precio para propiedades que no fueron expuestas a *fracking* durante el mismo periodo.
- 7 Los métodos semiparamétricos son formas de análisis de regresión que asumen una parte de las variables explicativas con distribución conocida y otra parte con una distribución desconocida.
- 8 La técnica de metarregresión, también conocida como metaanálisis, consiste en realizar inferencia estadística a partir de la estimación de modelos de regresión (generalmente lineales) basados en estudios secundarios. En este contexto, la variable dependiente de la regresión son medidas de disponibilidad a pagar por un bien ambiental extraída de estudios secundarios, en función de otras variables que se supone explican la medida de disponibilidad a pagar (por ejemplo, características del método, de los individuos, del lugar, entre otras).
- 9 La disponibilidad marginal a pagar (DMAP) se interpreta como el precio que paga el individuo por un cambio de una unidad adicional en la calidad ambiental que mejore su bienestar. Esta medida también se conoce, en este contexto, como precio implícito de la calidad del aire.
- 10 Técnica de análisis de regresión para encontrar parámetros vinculados a una variable o predictor, basada en la minimización de la suma de los errores al cuadrado.

fue el de MCO, y algunas de sus variables independientes fueron el tipo de contaminación, la región geográfica y las condiciones de mercado. Los autores encontraron que la contaminación de agua subterránea tiene un efecto negativo y significativo sobre los valores de propiedad, que se ve representado en pérdidas, en promedio, de US\$16 600 por vivienda. Además, resalta que el desempleo tiene un efecto positivo, resultado que, en principio, va en contra de la intuición económica. Es importante destacar que en este trabajo el uso de encuestas y técnicas de casos de estudio arroja resultados más elevados, en valor absoluto, que las investigaciones que usan técnicas de regresión.

Ready (2010) desarrolla la misma metodología para conocer el efecto de la cercanía a vertederos de residuos en el valor de propiedades. Con la particularidad, a diferencia de los estudios mencionados en esta subsección, de que en este trabajo se incorporan mediciones directas como parte de sus datos y no únicamente los resultados de estudios previos. El autor considera dos tipos de vertederos según su intensidad: los que reciben diariamente menos de quinientas toneladas y los que reciben más de ese volumen. El insumo del metaanálisis es un conjunto de estudios que contiene información de quince impactos estimados en el precio de las viviendas. Las variables independientes del estudio son: el tamaño de la muestra de cada estudio, el precio promedio de la vivienda, el límite espacial asumido de impacto y el volumen de residuos aceptado en el vertedero. Esta última variable fue la única que arrojó un resultado significativo en el modelo. El principal resultado del autor es que los vertederos de desechos que reciben más de quinientas toneladas diarias impactan negativamente el precio de las propiedades cercanas, en promedio, en el 13.7% de su valor.

De lo expuesto anteriormente se puede afirmar que el análisis de las consecuencias ambientales de la extracción de HNC se ha investigado desde distintas metodologías, aunque los estimadores no muestran similitud entre estudios. Además, el análisis de metarregresión es una técnica usada por diversos autores para estimar el valor económico de externalidades ambientales a la luz de la variabilidad de resultados precedentes. Una muestra de lo anterior es el trabajo de Nelson y Kennedy (2008), quienes elaboraron un sondeo de 130 investigaciones que usan el análisis de metarregresión en el campo de la economía ambiental. No obstante, las publicaciones que se han valido de esta metodología usan fuentes muy dispares de contaminación, que en el caso de Simons y Saginor (2006) van desde la contaminación producida por plantas nucleares, hasta el ruido generado en aeropuertos; o se restringen a un solo tipo, en el caso de Ready. Lo anterior impide contar con un panorama de las implicaciones económicas de las externalidades ambientales del *fracking*. Sumado a esto, dado que no se han encontrado estudios que usen el análisis de metarregresión para evaluar este fenómeno, el presente trabajo intenta llenar ese vacío en la literatura.

## Métodos

El análisis de metarregresión utiliza datos e información preexistente que proviene de contextos distintos al del objetivo por estudiar. Se fundamenta en el resumen y la síntesis de los resultados y las observaciones de determinadas variables en otros estudios provenientes de una revisión exhaustiva de la literatura, lo que permite explicar sistemáticamente la variación estadística de sus resultados, que puede darse por el método de evaluación, la localización geográfica u otros factores (Rosenberger y Loomis, 2003). Esta técnica, utilizada originalmente en el campo de la medicina y la psicología, se ha ido extendiendo al dominio de ciencias comportamentales, sociales y económicas, y en particular se ha usado ampliamente en la economía ambiental (Braden *et al.*, 2011). La metodología resulta de gran utilidad y pertinencia para lograr el objetivo de este documento, si se tiene en cuenta, como se mencionó en la introducción, que la explotación de HNC no se ha formalizado ni desarrollado masivamente en Colombia.

La forma genérica de un modelo de metarregresión se muestra en la ecuación (1) (Mohammad *et al.*, 2013):

$$P_{ij} = \beta_0 + \sum_k \beta_k X_{ijk} + \varepsilon_i \quad (1)$$

donde  $j$  se refiere a cada observación extraída del estudio  $i$  de la revisión;  $P_{ij}$  es la variable dependiente (precio de las propiedades);  $X_{ijk}$  son las variables independientes del modelo;  $\beta_k$  es el parámetro del modelo ligado con cada variable independiente  $k$  ( $\beta_0$  corresponde al intercepto); y  $\varepsilon_i$  representa el término del error.

De acuerdo con Braden *et al.* (2011), el precio de equilibrio en el mercado de propiedades es descrito por una función de precios hedónicos, en la cual el valor de una vivienda ( $P$ ) depende de características estructurales ( $E$ ), del vecindario ( $V$ ) y ambientales ( $A$ ), como se exhibe en la ecuación (2):

$$P = f(E, V, A) \quad (2)$$

El fundamento de los estudios que usan el enfoque del método indirecto de valoración ambiental de precios hedónicos para estimar el impacto de una externalidad ambiental negativa se basa en la estimación de precios implícitos de bienes que no tienen mercado a través de la observación de un bien mercadeable relacionado. La vivienda usualmente se ha empleado como el bien mercadeable para inferir precios implícitos de atributos ambientales que pueden influir en el valor de las propiedades. El precio implícito de un atributo ambiental corresponde a la derivada parcial de  $P$  con respecto a  $A$ . Dicha derivada suele interpretarse como la disponibilidad marginal a pagar (DMAP) por determinada característica ambiental, que en el caso de la presente investigación corresponde a la distancia a las fuentes de contaminación estudiadas.

Este documento busca desarrollar un análisis de metarregresión sobre estudios que han usado el anterior enfoque para cuantificar las consecuencias económicas de determinado tipo de contaminación. La variable dependiente del modelo propuesto es el diferencial en el precio de las propiedades con respecto a un cambio marginal de la distancia a la fuente de contaminación, lo que denota el efecto económico de la exposición a esta, o la DMAP por alejarse de la fuente.

Es claro que tal perspectiva no recoge en su totalidad el impacto ambiental y comunitario de ciertas externalidades y muestra limitaciones como la potencial omisión de variables relevantes. Sin embargo, es una aproximación a tales costos ocasionados por la externalidad ambiental.

Al llevar a cabo un análisis de metarregresión, se espera que los resultados de los estudios usados como insumo puedan verse afectados por variables que se clasifican en tres categorías: *sustantivas*, que se refieren a aquellas que son propias del objeto de investigación; *metodológicas*, relativas al modelo de cada investigación que conforma el cuerpo de datos; y *extrínsecas*, relacionadas con el estudio (Nelson y Kennedy, 2008). En estas se enmarcan las variables que se van a usar, las cuales se describen y justifican a continuación.

#### VARIABLES SUSTANTIVAS

Una variable dicotoma caracteriza cada externalidad asociada con la extracción de HNC, y de esta manera se configuran las categorías de impacto del trabajo. Cada variable señalada en este párrafo toma el valor de 1 si la observación del estudio correspondiente usado como insumo evalúa esa externalidad, y 0 si no lo hace.<sup>11</sup> Estas son, contaminación de fuentes de agua, bien sean subterráneas o superficiales (*Recurso\_hidrico*), disposición de residuos peligrosos (*Residuo*), sismicidad inducida (*Sismo*) o contaminación del aire (*Contaminacion\_aire*). Las anteriores categorías no son mutuamente excluyentes, por lo que no se establece alguna de ellas como base de las otras.

11 En general, una variable dicotoma o *dummy* es una variable que se utiliza como indicador de presencia (toma el valor de 1) o de ausencia (toma el valor de 0) de un atributo. Por ejemplo, se codifica como 1 si la persona correspondiente a una observación es de género femenino y como 0 si la persona es de género masculino.

La variable dicótoma *Características\_Vecindario* señala si la observación corresponde a un estudio en el que se consideraron características del vecindario, como la composición étnica, la edad promedio de los habitantes en la muestra seleccionada o el número de escuelas en el condado, entre otras. Se incorpora la tasa anual de desempleo (*Desempleo*) de la región donde se realizó cada uno de los estudios, en el periodo examinado por estos, como una variable *proxy* del estado de la economía. Esta información se obtiene de fuentes secundarias cuando el estudio no lo reporta (para las regiones de Estados Unidos se obtuvo de la Oficina de Estadísticas Laborales de dicho país; para Canadá, de la página del Gobierno de Alberta y para Holanda del portal IndexMundi).

Otra variable es el ancho de banda, en millas, que tiene en cuenta cada estudio (*buffer*), dado que puede influir sobre la magnitud de la DMAP estimada. Por último, se incluye una serie de variables dicótomas que caracterizan la región geográfica donde se llevó a cabo la investigación primaria, y que se construyen sobre la base de la división de las regiones del Censo de los Estados Unidos, además de una categoría adicional en la que se incluyen las observaciones de Europa y Canadá. Estas variables son: *West* (Washington, California, Indiana, Michigan, Ohio, Minnesota), *South* (Maryland, North Carolina, Virginia, Florida y Texas) y *No\_usa* (observaciones de Europa y Canadá). La categoría base es *Northeast*, que abarca los estados de Massachusetts y Pensilvania. El anterior conjunto de variables se incluye con el objetivo de hallar diferencias regionales en el efecto de las externalidades.

#### Variables metodológicas

En esta categoría se encuentra el tamaño de la muestra (*Tamano*) de cada estudio, debido a que la variación en esta puede afectar la significancia de los resultados (Mohammad *et al.*, 2013). También se incluye la variable *Panel*, que indica si el estudio usa datos panel (1) o de sección cruzada (0).

Respecto al tipo de modelo, se contemplan los semilogarítmicos (*Semilog*), lineales (*Lineal*) y logarítmicos, estos últimos usados como categoría de base. La variable *Significativo* recoge información de si los resultados obtenidos en las investigaciones son significativos por lo menos al 10 %.

#### Variables extrínsecas

Se incluye el año de publicación de cada estudio (*Anio*) y la variable dicótoma *Advertencia*, la cual indica si al momento de realizarse las transacciones en el mercado inmobiliario, se habían hecho de público conocimiento los riesgos que implicaban las externalidades.

La definición de las variables usadas, tanto las sustantivas como las metodológicas y las extrínsecas, así como sus respectivas estadísticas descriptivas, se presenta en la tabla 1. A continuación se prosigue con la cuarta sección del documento, que describe los datos usados, la estrategia empírica y los resultados del ejercicio estadístico.

## Estrategia empírica

De acuerdo con lo que se desarrolló en la sección anterior, el modelo por evaluar se expone en la ecuación (3):

$$\begin{aligned} \text{DMAP} = & \beta_0 + \beta_1 * \text{RecursoHidrico} + \beta_2 * \text{Residuo} + \beta_3 * \text{Sismo} + \beta_4 * \text{PolucionAire} + \beta_5 * \text{CaracterísticasVecindario} + \beta_6 * \text{Desempleo} + \beta_7 * \text{ValorMedio} + \beta_8 * \text{Buffer} + \beta_9 * \text{West} + \beta_{10} * \text{South} + \beta_{11} * \text{NoUsa} + \beta_{12} * \text{Tamani} \\ & o + \beta_{13} * \text{Panel} + \beta_{14} * \text{Semilog} + \beta_{15} * \text{lineal} + \beta_{16} * \text{Significativo} + \beta_{17} * \text{Anio} + \beta_{18} * \text{Advertencia} + \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

En vista de que el objetivo del trabajo es estudiar la variación estadística de la DMAP, por alejarse de las fuentes de contaminación contempladas en los estudios seleccionados, la estimación del modelo mediante MCO resulta una aproximación adecuada (Simons y Saginor, 2006). A continuación, se discuten los datos que conformaron la muestra.

### Búsqueda de información y construcción de la base de datos

La muestra del estudio está compuesta por 75 observaciones provenientes de 25 investigaciones revisadas. Ahora bien, dado que la literatura que trata el objeto de estudio propuesto a través de la metodología de precios hedónicos se encuentra aún en una etapa incipiente, se recurrió a buscar estudios que calcularan la relación entre la distancia a diversas fuentes de contaminación y el precio de propiedades cercanas, usando la existencia de evidencia causal entre la explotación de HNC y la externalidad analizada en este como criterio de selección, como se mencionó en la introducción.

La anterior exposición sirve para contextualizar el principal problema que presenta la metodología propuesta en el presente trabajo. Esta limitación, conocida como *file drawer effect* (Simons y Saginor, 2006), tiene que ver con los estudios que se realizaron y pudieron haberse usado como insumo, pero que, al no mostrar efectos significativos, los autores decidieron archivarlos. La ausencia de estos trabajos, que serían potenciales insumos de la metarregresión, puede sesgar los estimadores obtenidos.

Con respecto a la variable dependiente, la especificación considerada responde a la necesidad de contar con un indicador robusto a inflación y a diferencias entre mercados locales (Braden *et al.*, 2011). Así, una medida del impacto relativo de la cercanía a las fuentes de contaminación es el cociente entre, por un lado, el valor estimado del impacto en el precio de propiedades ante un cambio de una milla en la distancia a la fuente de contaminación evaluada y, por el otro, el valor medio de las propiedades consideradas en la muestra de cada estudio, como se ilustra en la ecuación (4):

$$DMAP_{ij} = \frac{\text{Cambio marginal en el precio de la propiedad}_{ij}}{\text{Valor medio de las propiedades contempladas en la muestra}_{ij}} \quad (4)$$

Los valores monetarios se expresan en dólares estadounidenses constantes del 2015, usando el índice de precios al consumidor como deflactor.

La tabla 1 presenta las estadísticas descriptivas de las variables y su respectiva definición, y posteriormente se presenta la estimación de los modelos, las respectivas pruebas estadísticas y los resultados de allí obtenidos.

**Tabla 1.** Estadísticas descriptivas de las variables usadas en el modelo. Por conjunto de variables

<i>Variables sustantivas</i>			
<i>Variable</i>	<i>Definición</i>	<i>Media</i>	<i>Desv. Est</i>
<i>Disponibilidad_a_pagar</i>	Cambio marginal en el precio de la propiedad ante un cambio en la distancia a la fuente de contaminación (USD).	2166.56	17 555.05
<i>Recurso_hidrico</i>	1 si la externalidad evaluada corresponde a contaminación de fuentes de agua subterránea o superficial, 0 de lo contrario.	0.51	0.5
<i>Residuo</i>	1 si la externalidad evaluada corresponde a disposición de residuos peligrosos, 0 de lo contrario.	0.52	0.5
<i>Sismo</i>	1 si la externalidad evaluada corresponde a sismicidad inducida por la explotación de hidrocarburos, 0 si no.	0.03	0.7
<i>Contaminacion_Aire</i>	1 si la externalidad evaluada corresponde a contaminación del aire producto del proceso de explotación de hidrocarburos, 0 si no.	0.32	0.47

<i>Variables sustantivas</i>			
<i>Variable</i>	<i>Definición</i>	<i>Media</i>	<i>Desv. Est</i>
<i>Características_Vecindario</i>	1 si en la regresión hedónica se incluyen propiedades del vecindario, 0 si no.	0.63	0.49
<i>Desempleo</i>	Variable continua. Tasa de desempleo en el periodo evaluado (%).	5.68	1.84
<i>Valor_medio</i>	Variable continua. Valor medio de las propiedades en la muestra estudiada (USD).	192 666.2	110 721
<i>Buffer</i>	Variable continua. Ancho de banda contemplado en cada estudio (en millas).	2.06	2-38
<i>West</i>	1 si el estudio se desarrolló en los estados de Washington, California, Indiana, Michigan, Ohio, Minnesota, 0 si no.	0.3	0.46
<i>South</i>	1 si el estudio se desarrolló en los estados de Maryland, North Carolina, Virginia, Florida y Texas, 0 si no.	0.25	0.44
<i>No_usa</i>	1 si el estudio se desarrolló en Canadá o Europa, 0 si no.	0.06	0.23
<b>Variables metodológicas</b>			
<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est</b>
Tamaño	Variable continua que se refiere al tamaño de la muestra.	9 171.37	23 996.21
Panel	1 si el estudio usa datos panel, 0 si usa sección cruzada.	0.41	0.5
Semilog	1 si el estudio usa forma funcional semilogarítmica, 0 si no.	0.68	0.47
Lineal	1 si el estudio usa forma funcional lineal, 0 si no.	0.14	0.35
Significativo	1 si el efecto de la variable de interés es significativo al menos al 10%, 0 si no.	0.72	0.45
<b>Variables extrínsecas</b>			
<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est</b>
Año	Variable discreta. Año de la publicación.	2 004.99	9.38
Advertencia	1 si los riesgos relacionados con cada externalidad eran de público conocimiento, 0 si no.	0.73	0.45

**Fuente:** elaboración propia.

## Estimación del modelo

La relación entre la variable dependiente y las variables independientes propuestas se evaluó mediante MCO, teniendo en cuenta la totalidad de las observaciones de la muestra.<sup>12</sup>

Por la naturaleza de la revisión llevada a cabo, de algunos estudios se extrajo más de una observación, circunstancia que conduce a una presumible correlación entre las distintas estimaciones que se extraen de una misma investigación (Nelson y Kennedy, 2008). Para solucionar este problema, se estimó una regresión en la cual los errores estándar están corregidos por clústeres, los cuales corresponden a cada investigación revisada. Así, a cada observación se le asignó un identificador que la vinculó a la investigación de la cual se obtuvo.

Ahora, debe tenerse también en cuenta que algunos estudios se realizaron en una misma región, y por lo tanto puede haber cierto grado de correlación entre las estimaciones, así no correspondan al mismo estudio (Nelson y Kennedy, 2008). Luego, es necesario evaluar si los resultados se ven afectados por este aspecto. Se realizó entonces un análisis de sensibilidad en el que se creó una nueva variable categórica (*región*), que clasificó a cada estudio de la siguiente manera: si se había realizado en zona *NorthEast*, tomaba el valor de 1, si se había hecho en *West*, el de 2, fuera de los Estados Unidos (*No\_Usa*), 3, y en *South*, 4. Esta nueva variable configuró los clústeres. Los resultados de las estimaciones se discuten en la siguiente sección.

## Resultados y discusión

En la tabla 2 se presentan los resultados del modelo planteado en la ecuación (3). La columna izquierda (1) corresponde al modelo en el que se incluyen todas las variables independientes; la siguiente (2), al que considera únicamente las variables sustantivas; y la última (3), al que examina solamente las variables metodológicas y extrínsecas. En estos modelos la variable dependiente es el impacto relativo de la cercanía a las fuentes de contaminación (*Impacto\_relativo*). Los resultados del primer modelo planteado, en el que se usan todas las variables independientes propuestas, muestran que la variable *Recurso\_hídrico* tiene un efecto positivo y significativo al 1 % sobre la DMAP. Este resultado se replica para las categorías de impacto *Residuo* y *Sismo*. La variable correspondiente a la contaminación del aire no arrojó el signo esperado, aunque tampoco es significativa.

Respecto a las variables geográficas, *West* tiene un efecto positivo y significativo al 1 %, en comparación con la categoría base *Northeast*, mientras que la variable que identifica a los estudios que fueron realizados en Canadá o Europa, *No\_usa*, tiene un efecto negativo y también significativo al 1 %. Este resultado denota las diferencias de los efectos económicos en distintas regiones. Tanto estos resultados como los del párrafo anterior se replican en el modelo que solo tiene en cuenta las variables sustantivas.

Llama la atención que la variable *Desempleo* tiene un efecto positivo y significativo al 5 % sobre la variable dependiente. Este resultado no es acorde con la intuición económica, dado que se esperaría que un mayor nivel de desempleo esté relacionado con menor actividad económica y por lo tanto con una depresión de los precios en general. Lo anterior se vería reflejado en una menor disponibilidad a pagar por alejarse de zonas que generan contaminación ambiental. Aun así, ya Simons y Saginor (2006) obtuvieron un resultado análogo con respecto a esta variable.

De otra parte, las especificaciones semilogarítmicas (*Semilog*) arrojan resultados más altos que las logarítmicas, según el primer modelo propuesto. En este, el coeficiente de dicha variable es significativo al 5 %. Por último, se observa que los estudios cuyos resultados fueron significativos obtienen estimadores más grandes con respecto a aquellos que no lo hicieron. Las demás variables del modelo

12 Para descartar aquellas que pudieran estar distorsionando los resultados de la regresión, se indagó acerca de cuáles tenían un comportamiento atípico (*outliers*). Fue necesaria la eliminación de cuatro observaciones, cuyos residuales eran mayores a 1 en valor absoluto, notablemente superiores a los de las demás observaciones de la muestra.

no mostraron significancia. El R-cuadrado del modelo indica que las variables independientes explican a la variable dependiente en 53.2%.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del tercer modelo planteado en la tabla 2 es evaluar la validez externa de los resultados. En este modelo se observa que el tamaño de la muestra tiene un efecto negativo y significativo al 5% en la determinación de los costos, de tal manera que a medida que aumenta la muestra, los costos estimados producto de las externalidades ambientales negativas son menores. Un comportamiento similar se observa en la variable *panel*, que es significativa al 10%.

La variable *Significativo* muestra el mismo comportamiento observado en el primer modelo, siendo este que en los trabajos que obtienen resultados significativos, los costos estimados son mayores. Además, la variable *LogAnio* es positiva y significativa al 10%. Una posible explicación de este resultado es que con el paso del tiempo se van refinando los modelos de precios hedónicos y los estimadores obtenidos son menos sesgados, con lo cual el efecto sobre los precios se distribuye en otras variables y no solamente en la distancia. Los análisis de bienestar que se realicen en el futuro, así como las políticas públicas que se formulen con base en estudios de la naturaleza de los analizados en este trabajo, deben tener entonces estos aspectos en cuenta.

**Tabla 2.** Estimación del modelo propuesto mediante MCO con errores estándar corregidos por clústeres que corresponden al estudio del que se extrajo cada observación

	(1)	(2)	(3)
	<i>impacto_relativo</i>	<i>impacto_relativo</i>	<i>impacto_relativo</i>
Recurso_hidrico	0.164*** (3.28)	0.152*** (14.64)	
Residuo	0.135*** (3.25)	0.153*** (10.50)	
Sismo	0.157*** (4.02)	0.163*** (9.14)	
Contaminacion_aire	-0.00679 (-0.21)	0.0123 (0.46)	
Caracteristicas_vecindario	-0.0318 (-1.29)	-0.0239 (-1.56)	
Desempleo	0.0127** (2.51)	0.00481 (0.83)	
Buffer	-0.000437 (-0.25)	0.00153 (0.70)	
West	0.0685*** (4.77)	0.0484** (2.65)	
South	-0.00160 (-0.07)	-0.0171 (-1.35)	
No_usa	-0.0671*** (-3.04)	-0.0511** (-2.46)	
LogTamaño	-0.000000643 (-0.00)		-0.0137** (-2.71)
Panel	-0.00123 (-0.05)		-0.0437* (-1.72)
Semilog	0.0399** (2.67)		0.0266 (1.01)
Lineal	-0.00643 (-0.40)		0.0206 (0.82)

	(1)	(2)	(3)
	<i>impacto_relativo</i>	<i>impacto_relativo</i>	<i>impacto_relativo</i>
Significativo	0.0673*** (2.83)		0.0420** (2.68)
LogAnio	-1.019 (-0.30)		6.399* (2.00)
Advertencia	-0.0428 (-1.35)		-0.0428 (-1.35)
_cons	7.541 (0.29)	-0.130*** (-4.13)	-48.50* (-2.00)
N	71	71	71
R2	0.5322	0.3716	0.2694

t statistics in parentheses

\*  $p < 0.1$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$

Fuente: elaboración propia.

Ahora se evalúan los resultados obtenidos al correr el modelo mediante MCO con errores estándar corregidos por clústeres, cuando estos corresponden a la región donde se realizó el respectivo estudio (tabla 3). En el primer modelo, donde se incluyen todas las variables independientes, la categoría *Recurso\_hidrico* es significativa al 5% e influye de manera positiva sobre la variable dependiente, lo que también se observa en la variable *Residuo*, aunque esta última es significativa al 1%. Estos resultados se replican en el modelo que tiene en cuenta únicamente las variables sustantivas. A diferencia de los resultados expuestos en la tabla 2, las demás categorías de impacto no tienen efecto significativo sobre la DMAP. Sin embargo, de manera análoga a este, la variable *Significativo* es positiva, significativa (al 10%) y muestra el mismo efecto sobre la variable dependiente.

Cabe resaltar también que, a pesar de no ser significativa, la variable *Advertencia* muestra un coeficiente negativo, tanto en este modelo como en el presentado en la tabla 2. Lo anterior es inesperado y contraintuitivo, aunque Braden *et al.* (2011) obtienen un resultado que podría considerarse equivalente. En su metaanálisis sobre sitios de disposición de residuos, hallan que aquellos que se encuentran en la National Priority List (listado en el que se señalan aquellos vertederos que son en extremo peligrosos para la salud) están relacionados con una disponibilidad a pagar por alejarse de ellos más baja, en comparación con los que no se encuentran en esta lista. Según el R-cuadrado del modelo, las variables independientes explican a la variable dependiente en 40.13%. Por su parte, los resultados del tercer modelo son similares a los presentados en la tabla 2, a diferencia de que ahora las variables *LogAnio* y *Panel* no son significativas. Las variables independientes, que en este caso son las metodológicas y las extrínsecas, explican a la variable dependiente en un 26.94%.

**Tabla 3.** Análisis de sensibilidad. Modelo estimado por MCO con errores estándar corregidos por clústeres que corresponden a la región en la que se hizo el estudio

	(1)	(2)	(3)
	<i>impacto_relativo</i>	<i>impacto_relativo</i>	<i>impacto_relativo</i>
Recurso_hidrico	0.115** (4.67)	0.121** (5.32)	
Residuo	0.135*** (6.84)	0.158*** (9.11)	

	(1)	(2)	(3)
	<i>impacto_relativo</i>	<i>impacto_relativo</i>	<i>impacto_relativo</i>
Sismo	0.0541 (0.83)	0.102* (2.90)	
Contaminacion_aire	0.0109 (0.39)	0.0467*** (8.73)	
Caracteristicas_vecindario	-0.0204 (-0.94)	-0.0162 (-0.94)	
Desempleo	0.00898 (1.03)	0.00292 (0.50)	
Buffer	-0.000738 (-0.49)	0.000352 (0.12)	
LogTamaño	-0.00125 (-0.19)		-0.0137** (-3.21)
Panel	-0.0111 (-0.66)		-0.0437 (-2.05)
Semilog	0.0257 (1.87)		0.0266* (2.62)
Lineal	0.0276 (1.17)		0.0206 (0.78)
Significativo	0.0668* (2.67)		0.0420*** (6.19)
LogAnio	2.632 (0.70)		6.399 (1.88)
Advertencia	-0.0343 (-1.05)		-0.0428 (-1.00)
_cons	-20.15 (-0.71)	-0.112*** (-6.88)	-48.50 (-1.87)
N	71	71	71
R2	0.4013	0.2600	0.2694

t statistics in parentheses

\*  $p < 0.1$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$

Fuente: elaboración propia.

En suma, las variables que capturan el efecto de la contaminación de fuentes de agua y de cercanía a sitios de disposición de residuos muestran estimadores consistentemente positivos y significativos sobre la variable dependiente en todos los modelos presentados. Esto constituye uno de los principales resultados del ejercicio estadístico. Sin embargo, ninguna de las otras categorías de impacto presenta el mismo comportamiento.

La significancia de los resultados, el signo de las variables en los modelos y las pruebas de validez y de sensibilidad expuestas son los elementos más susceptibles de análisis y los principales resultados de esta sección. No obstante, a continuación se presenta una posible interpretación monetaria de las dos categorías de impacto que tuvieron resultados significativos y consistentes a lo largo de los modelos: *Recurso\_hídrico* y *Residuo*. Al ponderar el coeficiente de la primera variable con el valor medio de las viviendas de la muestra, se encuentra que la disponibilidad marginal a pagar por alejarse una milla de una fuente de recursos hídricos contaminada (como producto del *fracking* o atribuible a esta actividad) es de US\$3160 dólares por hogar. El anterior resultado es válido para el primer modelo presentado en la tabla 2, cuando se tienen en cuenta todas las variables del modelo. Para el primer modelo de la tabla 3, la disponibilidad marginal, por hogar, es de US\$2216 dólares. Por su parte, según los resultados de las regresiones planteadas, la disponibilidad marginal por alejarse de un vertedero de residuos peligrosos es de US\$2601 por hogar.

## Implicaciones para Colombia

Actualmente en el país se encuentra vigente el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, el cual resalta la necesidad de incentivar la explotación de yacimientos no convencionales:

[...] el Ministerio de Minas y Energía y la ANH darán continuidad a la promoción de inversiones en las actividades de exploración y producción de hidrocarburos [...] Teniendo en cuenta el potencial hidrocarburífero del país y la necesidad de incorporar nuevas reservas que permitan ampliar el horizonte de autosuficiencia energética en materia de hidrocarburos, en particular se continuará promoviendo: i) la exploración y producción costa afuera; ii) la exploración y producción de yacimientos no convencionales. (Departamento Nacional de Planeación, 2015)

Es precisamente en el aspecto referente a la contaminación de fuentes de agua donde el caso colombiano cobra importancia. El manejo de las aguas residuales en los procesos productivos e industriales ha sido deficiente. Prueba de ello es que en el índice de manejo ambiental de las universidades de Yale y Columbia el país pasó de ocupar el puesto 9 en el año 2008 al puesto 85 en el año 2014<sup>13</sup>.

Cabrera y Fierro (2013) estudian las dinámicas de contaminación del agua (huella hídrica) producto de la actividad minera y su relación con las debilidades del sistema de licenciamiento y de las condiciones institucionales. Dado que las actividades mineras en sí mismas conllevan un deterioro del medio ambiente y de los recursos naturales, es necesario establecer un esquema de licencias ambientales que regulen la explotación de los recursos. Sin embargo, la evolución de los criterios de licenciamiento se ha dado en detrimento de la preservación del medio ambiente, pues su aprobación ha sido cada vez menos rigurosa. Por ejemplo, entre 1994 y 2005, de un total de 19 047 solicitudes de licencias ambientales se negó apenas el 3%. La deficiencia fundamental del esquema de licenciamiento radica en que los estudios presentados ignoran aspectos relacionados con las condiciones hídricas y geológicas de la región. Dichas condiciones pueden desembocar en que la apuesta por estas actividades falte tanto al principio constitucional de prevención y precaución como a los derechos referentes a un ambiente sano (Fierro, 2014).

Frente a esto, ¿qué enseñanzas pueden dejar a Colombia los resultados de nuestro estudio? El objetivo del presente trabajo fue conocer los factores que influyen en la determinación de la DMAP por reducir la exposición a las externalidades ambientales negativas del *fracking*. Pese a las limitaciones de la metodología propuesta, las derivaciones de los resultados presentados en la sección anterior pueden ser útiles para establecer una distribución de costos esperados (Ready, 2010).

13 Véase una clasificación por países y criterios especificados en <http://epi.yale.edu/epi>

Se encuentra que la categoría que presenta mayor efecto económico, en cuanto a la proximidad a la fuente de contaminación (*Recurso\_hídrico*), es precisamente la que más preocupa en el país. De acuerdo con los resultados, esta categoría implica un aumento en la disponibilidad a pagar que varía entre US\$2216 y US\$3160. Lo anterior puede interpretarse como el efecto de la exposición a fuentes de recursos hídricos contaminadas como producto del *fracking*. Ahora, dada la naturaleza de los estudios primarios considerados, la cifra corresponde al efecto estimado para una vivienda.

Según Rosenberger y Loomis (2003), una vez estimada la metarregresión, para conocer un aproximado del impacto agregado de la variable de interés sobre la dependiente es necesario multiplicar el efecto predicho por el número total de unidades, en este caso, de viviendas. Se tiene entonces que para un total de 9185 viviendas (que corresponde al promedio considerado por las investigaciones usadas en la metarregresión), el efecto económico de la exposición a la contaminación de fuentes de agua, como producto del *fracking*, varía entre US\$20 319 808 y US\$28 977 814. Luego, dentro de este rango debería esperarse que se encuentre el efecto local de dicha externalidad en Colombia, y es deseable que este monto sea un punto de referencia para la estimación de los costos ambientales asociados a la explotación de HNC, así como en la inversión que se realice en los municipios cuyos pobladores se vean afectados por los perjudiciales efectos de la actividad sobre el medio ambiente. No obstante, estos valores deben ser tomados únicamente como referencia, y no como valores que resultan de una transferencia de beneficios o costos, pues como se mencionó anteriormente, una transferencia no es conducente cuando la actividad de *fracking* podría ser inminente pero aún no comienza a implementarse en Colombia.

## Conclusiones

El trabajo presentado fue un esfuerzo por evaluar monetariamente las principales externalidades asociadas con la explotación de HNC. Del ejercicio desarrollado, un análisis de metarregresión en el que se tuvo en cuenta tanto la correlación de los resultados de un mismo estudio como la de una misma región, el resultado más sobresaliente es, sin duda, el efecto positivo (en signo) y significativo de la contaminación de recursos hídricos y de la presencia de vertederos de residuos peligrosos sobre la DMAP por alejarse de los centros de operación. No es un resultado menor que en las regresiones presentadas, la región geográfica tuviese influencia sobre los resultados de las investigaciones analizadas. Además, se hallan indicios de que factores metodológicos como la especificación del modelo pueden influenciar las estimaciones obtenidas. Sin embargo, estos resultados son apenas un primer paso en busca de determinar con precisión y robustez los costos económicos globales de las implicaciones ambientales del *fracking*, objetivo que deberá alimentarse en el futuro con estudios basados en observaciones primarias, una vez se dé la explotación formal en Colombia, y que superen las limitaciones de la metodología planteada en este trabajo.

Trabajos posteriores deberán tener en cuenta otras variables de fundamental importancia, así como la posible relación entre ellas. En un principio, trató de incorporarse a este estudio, como una categoría de impacto adicional, el efecto del aumento del tráfico pesado en las zonas aledañas a los pozos de explotación. Chu, Krupnick, *et al.* (2014) abordan este problema y encuentran que por pozo de HNC explotado, en el periodo de un mes, hay un aumento de 2 % en accidentes de camiones y vehículos pesados en los condados donde se lleva a cabo la actividad, en comparación con aquellos en los que no. Lamentablemente, la naturaleza de estos modelos no los hace comparables con las categorías de impacto aquí analizadas. Otro aspecto que podría considerarse en el futuro es, sobre la base de la complejidad de la estructura hídrica, cómo los residuos de la explotación de HNC podrían eventualmente alcanzar fuentes de agua para consumo humano o para otros usos, y estudiar la manera de evitar que esto ocurra.

También es de importancia, una vez estimados los costos totales de las externalidades, compararlos con los beneficios que pueda traer la práctica. Entre estos se cuentan la generación de empleo, el

aumento del presupuesto municipal y departamental vía regalías, etc. La diferencia entre los costos en cuestión y los de la explotación convencional de hidrocarburos, así como la indagación sobre su carácter temporal o permanente también debe ser identificada en el futuro.

La explotación de HNC es una práctica que ha provocado acalorados debates entre la industria, las comunidades, los Estados nacionales y otros grupos de interés. Tal coyuntura requiere un esfuerzo conjunto desde diversos ámbitos del conocimiento para desentrañar rigurosamente sus consecuencias, tanto físicas como sobre el bienestar social, y establecer claros nexos entre estas.

Para los autores, la decisión sobre la exploración y explotación de hidrocarburos no convencionales no debería limitarse a las decisiones de un único análisis costo-beneficio basado en la valoración económica, aunque los valores hallados en estudios secundarios tales como los de la metarregresión planteada en esta investigación, o posibles valoraciones basadas en estudios primarios, son un punto de partida para la toma de decisiones.

Una aproximación integral que tenga en cuenta la valoración biofísica de los efectos del *fracking* sobre el ecosistema es crucial en la toma de decisiones relacionadas con la exploración y explotación de hidrocarburos, máxime cuando es muy probable que los efectos negativos de la explotación de HNC sobre los recursos hídricos sean irreversibles o se mantengan por periodos muy largos. Consideraciones tales como el principio precautelatorio, la comparación temporal de los flujos de beneficios con horizontes de tiempo relativamente limitados con los costos ambientales que se expresan en horizontes de tiempo más largos, incluso sobrepasando ventanas temporales de varias generaciones, sugieren que la actividad extractiva basada en la técnica de perforación horizontal para la fractura hidráulica es una práctica que no se compadece necesariamente con los principios fundamentales de la sustentabilidad ambiental.

Desde el punto de vista de la implementación de políticas dirigidas a atender una demanda energética autónoma en Colombia, los altos costos ambientales asociados con el *fracking* sugieren que prácticas tales como la generación de energías alternativas, como la eólica o la solar, sean más compatibles con las metas tanto de generación de energía como de protección ambiental.

## Referencias

- Barth, J. (2010). *Unanswered questions about the economic impact of gas drilling in the Marcellus shale: Don't jump to conclusions*. Nueva York: J.M. Barth & Associates.
- Braden, J., Feng, X. y Won, D. (2011). Waste sites and property values: a meta-analysis. *Environmental and Resource Economics*, 50, 175-201.
- Cabrera, M. y Fierro, J. (2013). Implicaciones ambientales y sociales del modelo extractivista en Colombia. En J. Garay, *Minería en Colombia. Derechos, políticas públicas y gobernanza* (89-123). Bogotá D. C.: Contraloría General de la República.
- Chu, J., Krupnik, A., Staubli, S., Graham, J., Tang, X., Irving, J., Sellers, S., Crisp, J., Horwitz, D. y Carey, D. (2014). *Exploring the local impacts of shale gas development*. Washington D. C.: Resource for the Future.
- Delgado, M., Guilfoos, T. y Boslett, A. (2014). *The cost of hydraulic fracturing: a hedonic analysis*. Manuscrito.
- Departamento Nacional de Planeación. (2015). *Plan Nacional de Desarrollo 2014-2015 "Todos por un nuevo país"*. Bogotá: autor.
- Di Risio, D. (2012). *Hidrocarburos no convencionales, ¿novedad o el horror potenciado?* Observatorio Petrolero Sur-Oilwatch. Recuperado de <http://www.oilwatchesudamerica.org/documentos/3-documentos/3807-hidrocarburos-no-convencionales-inovedad-o-el-horror-potenciado.html>

- Ellsworth, W. (2013). Injection-Induced Earthquakes. *Science*, 341, 142-149.
- Farber, S. (1997). Undesirable facilities and property values: a summary of empirical studies. *Ecological Economics*, 24, 1-14.
- Fierro, J. (2014). *Riesgos e incertidumbres del fracturamiento hidráulico de yacimientos no convencionales*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Hefley, W. y Wang, Y. (2015). *Economics of shale gas development. case studies and impacts*. Nueva York: Springer.
- Jackson, R., Vengosh, J., Davies, R., Darrah, T., O'Sullivan, F. y Pétron, G. (2014). The environmental costs and benefits of fracking. *The Annual Review of Environment and Resources*, 39, 327-362.
- Klaiber, H. y Gopalakrishnan, S. (2012). *The impact of shale exploration on housing values in Pennsylvania*. Paper prepared for presentation at the Agricultural & Applied Economics Association's 2012 AAEA Annual Meeting, Seattle, Washington, August 12-14, 2012.
- Mohammad, S., Graham, D., Melo, P. y Anderson, R. (2013). A meta-analysis of the impact of rail projects on land and property values. *Transportation Research*, 50, 158-170.
- Muehlenbachs, L., Spiller, E. y Timmins, C. (2014). The housing market impacts of shale gas development. *American Economic Review*, (105), 3633-3659.
- Nelson, J. y Kennedy, P. (2008). The use (and abuse) of meta-analysis in environmental and resource economics: an assessment. *Environmental and Resource Economics*, (42), 345-377.
- Ready, R. (2010). Do landfills always depress nearby property values? *Journal of Real Estate Research*, (32), 321-339.
- Rosenberger, R. y Loomis, J. (2003). *Benefit transfer*. En P. Champ, K. Boyle y T. Brown, *A primer on nonmarket valuation*. Nueva York: Springer Science+Business Media, LLC.
- Simons, R. y Saginor, J. (2006). A meta-analysis of the effect of environmental contamination and positive amenities on residential real estate values. *Journal of Real Estate Research*, (28), 71-104.
- Smith, V. y Huang, J. (1995). Can markets value air quality? A meta-analysis of hedonic property value models. *Journal of Political Economy*, (103), 209-227.
- Throupe, R., Simons, R. y Mao, X. (2013). A review of hydro "fracking" and its potential effects on real estate. *Journal of Real Estate Literature*, (21), 205-232.
- Tollefson, J. (2012). Air sampling reveals high emissions from gas field. *Nature*, 482(7384), 139-140.
- United States Energy Information Administration. (2013). *World shale gas and shale oil resource assessment*. Washington D. C.: Department of Energy.
- United States Energy Information Administration. (2015). *Annual energy outlook 2015 with projections to 2040*. Washington, D. C.: Department of Energy.
- United States Environmental Protection Agency. (2011). *Draft plan to study the potential impacts of hydraulic fracturing on drinking water resources*. Washington, D. C.: Office of Research and Development.
- Wrenn, D., Klaiber, H. y Jaenike, E. (2015). Unconventional shale gas development, risk perceptions, and averting behaviour: evidence from bottled water purchases. Risk perceptions, and averting costs behaviour: evidence from bottled water purchases. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 3(4),779-817