

Costos económicos de las externalidades ambientales del *fracking* *

Pablo Blas Tupac Silva Barbosa **

pb.silva1244@uniandes.edu.co

Universidad de los Andes

Facultad de Economía

Abril de 2016

Resumen

Los resultados de esfuerzos por cuantificar monetariamente las externalidades ambientales derivadas de la explotación de hidrocarburos no convencionales (llevada a cabo mediante la técnica de fracturación hidráulica o *fracking*), muestran una alta variabilidad y que sus costos no están unívocamente determinados. En este documento se desarrolla un análisis de meta-regresión sobre resultados de investigaciones que han abordado el efecto económico de la proximidad a tales zonas, o a aquellas cuyo entorno se ve afectado por consecuencias ambientales atribuibles al *fracking*. Las categorías de impacto analizadas son, contaminación de fuentes de agua, disposición de residuos peligrosos, contaminación del aire y sismicidad inducida. Las dos primeras de ellas tienen el efecto de mayor magnitud y significancia. Se muestra también que aspectos metodológicos y externos a las investigaciones, como son el año de la publicación o la especificación usada, influyen sobre la estimación de los costos.

Palabras clave: externalidades ambientales negativas, *fracking*, análisis de meta-regresión, precios hedónicos.

Clasificación JEL: Q51, Q53.

* Trabajo de grado asesorado por el profesor Fernando Carriazo.

** Agradezco a Fernando por su asesoría, sus valiosas correcciones y su paciencia. Del mismo modo, agradezco a Emilio Depetris-Chauvin por los comentarios al documento en el Seminario de Tesis-PEG y a Juan Guillermo Saldarriaga y Jorge Higinio Maldonado por sus recomendaciones en el proceso de evaluación y sustentación.

1. Introducción

El panorama energético global ha experimentado una reconfiguración, cuya causa reside en la explotación masiva de hidrocarburos no convencionales (HNC). Éstos consisten en petróleo y gas común que se encuentran atrapados en rocas con baja permeabilidad, lo que hace que deban ser explotados por medio de la técnica de perforación horizontal para la fractura hidráulica, o *fracking*. Su potencial ha elevado significativamente, en los últimos años, las reservas de petróleo y gas en países como Canadá, donde las provisiones de este último recurso ascendieron de 62 trillones de pies cúbicos (Tcf) a 388; México, que pasó de contar con 12 Tcf a 681; o China, de 107 Tcf a 1.275. Por su parte, los Estados Unidos es gracias a ellos el mayor productor mundial de gas natural (los HNC triplicaron sus reservas en comparación con los yacimientos convencionales, pasándolas de 272,5 Tcf a 862) y se espera que en el 2017 sea un exportador neto (Energy Information Administration, 2015).

En Colombia, las reservas estimadas en yacimientos no convencionales ascienden a 19 trillones de pies cúbicos (Tcf) de gas y 4.6 mil millones de barriles de petróleo (Ibíd., 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. Algunas de las secuelas de las que hay evidencia son: degradación de reservorios de agua subterránea, contaminación del aire, disposición indebida de residuos altamente peligrosos, sismicidad inducida, entre otras (Barth, 2010). Éstas han llegado al punto de que en Francia, Bulgaria y algunas regiones de España, la técnica del *fracking* se encuentre prohibida, mientras que en Irlanda del Norte y Sudáfrica, entre otros países, se haya declarado moratoria a 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 y demás efectos colaterales. 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 pasa de ser una expectativa, se tiene que el problema de la cuantificación de costos ambientales y comunitarios esperados en el país está totalmente abierto y se hace oportuno, entonces, aproximarse a él de manera rigurosa.

Una forma de cuantificar dichas externalidades 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).

El presente trabajo persigue 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 meta-regresión, con lo que se pretende abordar sistemáticamente la variabilidad 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. Las observaciones y resultados, en total 75 extraídas de 25 estudios realizados en Norteamérica y Europa, integran el cuerpo de datos a usar. El valor agregado del trabajo con respecto a meta-análisis anteriores es la concatenación de las principales implicaciones ambientales de la explotación de HNC, además de la inclusión de ciertas variables que caracterizan el modelo usado por cada una de las investigaciones analizadas y el contexto en que se realizaron (dichas variables se denominan metodológicas y extrínsecas respectivamente).

Este examen es de utilidad para establecer una aproximación a los potenciales costos ambientales de la operación para el país. 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.

El texto está organizado en seis secciones. La primera de ellas es la introducción; en la sección 2 se presenta una revisión de investigaciones afines a los objetivos de este trabajo; la sección 3 describe en detalle la metodología usada para abarcar el problema; en la sección 4 se ilustran los datos a usar y se presentan los resultados de la ejecución del modelo; por último, en

las secciones 5 y 6 se discuten las posibles implicaciones de política pública y se plantean las conclusiones, respectivamente.

2. Revisión de literatura

Las investigaciones relativas al propósito del presente trabajo pueden clasificarse en dos grupos. En uno, están aquellas que le han dado una dimensión económica a la contaminación ambiental producto de la extracción de HNC. En otro, las que han usado el análisis de meta-regresión para analizar la variabilidad en investigaciones que cuantifican monetariamente las externalidades de alguna actividad productiva. Ambas se desarrollan en las correspondientes subsecciones de este numeral.

2.1. Evaluación económica de los costos ambientales de la explotación de HNC

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 usando un panel de ventas de vivienda en 36 condados de Pennsylvania para el período 1995-2012. En el panel se incluyeron 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 que varía entre el 10% y el 22% en el valor de las propiedades que dependen de esta fuente. 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 \$33.214 dólares, en promedio, para cada una de éstas.

Cabe mencionar brevemente otros dos estudios de naturaleza muy similar. Estos son los de Gopalakrishnan y Klaiber (2012) y Delgado, Guilfoos y Boslett (2014), ambos llevados a cabo en Pennsylvania. Los primeros autores encuentran que el impacto de la fase temprana de las operaciones (cuando las secuelas para el medio ambiente y la salud no son aún claras) en el valor de propiedades es negativo y de 3,8%, es decir, \$5.883 dólares, 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 \$6.000 dólares, para aquellas situadas a 3 millas o menos de la zona de operaciones.

Throupe, Simons y Mao (2013) estudian el mismo fenómeno, aunque a diferencia de los estudios anteriores, lo hacen usando el método de valoración contingente. Se indagó a 554

potenciales compradores de vivienda en Texas y Florida, por la influencia de las consecuencias ambientales sobre su decisión de adquirir vivienda y el precio que estaban dispuestos a pagar. Los resultados muestran que la explotación de HNC genera una descenso de entre el 5% y el 15% en el valor de las propiedades, cuando el mercado inmobiliario es robusto. Además, si las ventas son escasas y el mercado presenta fallas, este efecto puede profundizarse en un 10%.

Desde otra perspectiva, Wrenn, Klaiber y Jaenicke (2015) consideran las implicaciones del riesgo percibido en la contaminación de agua para consumo humano, pero no se centran en los efectos sobre el mercado inmobiliario. La hipótesis de los autores, es que la contaminación de la fuente de agua de los hogares implica un aumento significativo en la compra de agua embotellada por parte de estos, ante el riesgo de posibles consecuencias para la salud. Para abarcar el problema, Wrenn et al. (2015) usaron un modelo de triples diferencias, en el que se agregaron datos para el período 2005-2010 de condados de Pennsylvania y Ohio donde se aplicó el *fracking*, además de condados en los que no. La información de las zonas, identificadas con sistemas de información georreferenciada, se vinculó con datos de la compra de agua embotellada por hogar. El resultado de la investigación es que los costos de prevención en condados con alto nivel de explotación de HNC, materializados en la compra de agua embotellada, superaron los \$19 millones de dólares para el año 2010.

Se hace ahora un breve repaso de trabajos que han usado la metodología propuesta en el presente documento.

2.2. Análisis de meta-regresión y valores de propiedad

En la literatura hay varios estudios que han utilizado el análisis de meta-regresión basado en estimaciones hedónicas para aproximar los efectos de cercanía a centros de actividad económica de diversa índole. Entre estos están Mohammad et al. (2013), quienes examinan 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 (reducción del material particulado). Ambas investigaciones usan mínimos cuadrados ordinarios para estimar el modelo que proponen.

Por su parte, Simons y Saginor (2006) adelantaron un meta-análisis 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 fue el de mínimos cuadrados ordinarios, y algunas de sus variables independientes fueron el tipo de contaminación, la región geográfica y las condiciones de mercado. Entre los resultados está 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 \$16.600 dólares 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 arrojan resultados más grandes, 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 500 toneladas y los que reciben más de ese límite. El insumo del meta-análisis es un cuerpo de estudios que contiene información de 15 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 500 toneladas diarias impactan negativamente el precio de las propiedades cercanas, en promedio, en el 13,7% de su valor.

De lo expuesto en las dos últimas subsecciones, se tiene que las consecuencias ambientales de la extracción de HNC se han abarcado desde distintas metodologías, aunque los estimadores no muestran concordancia entre estudios. Además, el análisis de meta-regresión 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 meta-regresión 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 por el contrario, 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 meta-regresión para evaluar este fenómeno, el presente trabajo intenta llenar ese vacío en la literatura. A continuación se describe la metodología usada y el modelo formulado con sus respectivas variables.

3. Modelo teórico

El análisis de meta-regresión consiste en el uso de datos e información preexistente que proviene de contextos distintos al del objetivo a estudiar. Se fundamenta en resumir y sintetizar los resultados y las observaciones de determinadas variables en otros estudios, 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, 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, además de que los costos de recolección de datos primarios y el tiempo requerido para compactarlos puede extenderse indeseablemente.

La forma genérica de un modelo de meta-regresión es (Mohammad et al., 2013):

$$p_{ij} = \beta_0 + \sum_k \beta_k x_{ijk} + \varepsilon_i$$

Donde j se refiere a cada observación extraída del estudio i de la revisión; p_{ij} es la variable dependiente; x_{ijk} son las variables independientes del modelo; β_k es el parámetro del modelo ligado con cada variable independiente k (β_0 corresponde al intercepto); y ε_i representa al término del error.

Siguiendo a Braden et al. (2011), el precio de equilibrio en el mercado de propiedades es descrito por una función de precios hedónicos, en la que el valor de una vivienda (P) depende de características estructurales (E), del vecindario (V) y ambientales (A). Es decir:

$$P = f(E, V, A)$$

El fundamento de los estudios que usan el enfoque de precios hedónicos para estimar el impacto de una externalidad ambiental negativa, corresponde a la derivada parcial de P con respecto a A . Dicha derivada equivale a la DMAP por determinada característica ambiental, que en el presente estudio corresponde a la distancia a las fuentes de contaminación estudiadas.

Este documento busca desarrollar un análisis de meta-regresión 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 frente a un cambio marginal de la distancia a la fuente de contaminación, lo que denota el efecto económico de la exposición a ésta, o la DMAP por alejarse.

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.

Además de lo mencionado al comienzo de esta sección, un beneficio de la metodología usada es que el efecto calculado en otros estudios y contextos, resulta útil como una base para establecer cotas, tanto superiores como inferiores, en algún caso específico (Farber, 1997). Así, con el modelo planteado se busca también contribuir al cálculo de estos costos para Colombia a partir de estudios hechos en otras regiones.

Al llevar a cabo un análisis de meta-regresión 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 a usar, que se describen y justifican a continuación.

3.1. Variables sustantivas

Una variable dicótoma caracteriza cada externalidad asociada con la extracción de HNC, con lo que se configuran las categorías de impacto del trabajo. La inclusión de estas categorías se justifica en el Anexo 1, en el que además se reseña su evidencia en distintas regiones donde se ha desarrollado la explotación de HNC. 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. Éstas son, contaminación de fuentes de agua, bien sean subterráneas o superficiales (*Recurso_hidrico*), disposición de residuos peligrosos (*Residuo*), sismicidad

inducida (*Sismo*) y 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.

La variable dicótoma *Caracteristicas_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, 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 para el período examinado por éstos, 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 Pennsylvania. El anterior conjunto de variables se incluye con el objetivo de hallar diferencias regionales en el efecto de las externalidades.

3.2. Variables metodológicas

En esta categoría está el tamaño de la muestra (*Tamano*) de cada estudio, debido a que la variación en éste 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%.

3.3. Variables extrínsecas

Se incluye el año de publicación de cada estudio (*Anio*) y la variable dicótoma *Advertencia*, que 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 describen los datos usados, la estrategia empírica y los resultados del ejercicio estadístico.

4. Estrategia Empírica

Esta sección se divide en cuatro partes. En la primera, se indica la especificación del modelo y el método de estimación utilizado. En la segunda, se muestra cómo se dio el proceso de búsqueda de los datos y el tratamiento que se le dio a éstos, así como las estadísticas descriptivas de las variables propuestas. En la tercera, se desglosan los resultados obtenidos, y en la cuarta se ofrece una interpretación de los mismos.

4.1. Especificación del modelo

Frente a lo que se desarrolló en la sección 3 del documento, el modelo a evaluar toma la siguiente forma:

$$DMAP = \beta_0 + \beta_1 * RecursoHidrico + \beta_2 * Residuo + \beta_3 * Sismo + \beta_4 * PolucionAire + \beta_5 * CaracteristicasVecindario + \beta_6 * Desempleo + \beta_7 * ValorMedio + \beta_8 * Buffer + \beta_9 * West + \beta_{10} * South + \beta_{11} * NoUsa + \beta_{12} * Tamano + \beta_{13} * Panel + \beta_{14} * Semilog + \beta_{15} * lineal + \beta_{16} * Significativo + \beta_{17} * Anio + \beta_{18} * Advertencia + \varepsilon$$

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 mínimos cuadrados ordinarios (MCO) resulta una buena aproximación (Simons y Saginor, 2006). Las cuestiones econométricas inherentes a esta metodología son abordadas y corregidas en la subsección 4.3. A continuación se ilustran los datos que conformaron la muestra.

4.2. Búsqueda de información y construcción de la base de datos

La muestra del estudio está compuesta por 75 observaciones provenientes de 25 investigaciones revisadas (se listan en el Anexo 3). El primer paso del proceso de búsqueda,

consistió en un rastreo en bibliotecas virtuales y plataformas como ScienceDirect, JSTOR, Wiley y SpringerLink, de investigaciones que usaron la metodología de precios hedónicos aplicada a la explotación de yacimientos no convencionales. Algunas de ellas están reseñadas en la primera parte de la sección 2. Sumado a esto, se revisaron los resultados y las referencias consignadas en compendios de estudios sobre las implicaciones económicas del *fracking* en diversas regiones de los Estados Unidos, entre éstos, Hefley y Wang (2015) y Barth (2010). No obstante, como lo reconocen estos autores, la literatura que trata el objeto de estudio propuesto a través de la metodología de precios hedónicos está aún en una etapa incipiente.

En segunda instancia, se recurrió a buscar estudios que calcularon 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 éste (Anexo 1) como criterio de selección. Algunos estudios seleccionados inicialmente no conformaron la muestra, al no poder ser directamente comparables con los demás. Estos se listan en el Anexo 3.

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, o un claro impacto sobre el valor de las propiedades, los autores decidieron archivarlos. La ausencia de estos trabajos, que serían potenciales insumos de la meta-regresión, puede sesgar los estimadores obtenidos.

Retomando la descripción del proceso de formación de la base de datos, una vez consolidado el cuerpo de investigaciones a revisar, se procedió a seleccionar de cada una de ellas la información que las caracterizaba. A partir de ahí se obtuvo el valor de las variables independientes del modelo propuesto y se homogenizaron los datos.

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 otro, el valor medio de las propiedades consideradas en la muestra de cada estudio, como se ilustra en la siguiente ecuación:

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

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

No todas las investigaciones reportan explícitamente el valor de la DMAP. Para aquellas que usan modelos lineales, el coeficiente de esta última variable refleja dicho valor. Para los modelos logarítmicos y semilogarítmicos, se procedió a evaluar, en la media de las variables, la derivada parcial del precio de la vivienda con respecto a la distancia. Algunos estudios usaban el inverso de la distancia, o contemplaban adicionalmente la distancia al cuadrado. Tales características se consideraron en el cálculo de la derivada.

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.

4.3. Estimación del modelo

Usando el método señalado en la subsección 4.1, se evaluó la relación entre la variable dependiente y las variables independientes propuestas, teniendo en cuenta la totalidad de las observaciones de la muestra. Para descartar aquellas que pudiesen 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 era mayores a 1 en valor absoluto, notablemente superiores a los de las demás observaciones de la muestra. Después se calcularon los factores de inflación de varianza, los cuales no dieron indicios de problemas de multicolinealidad apreciable entre las variables independientes.

Tras este análisis primario, se estimó una serie de modelos para evaluar el efecto de ubicarse en el entorno de una fuente de contaminación relacionada directamente con la explotación de HNC. En principio se corrió el modelo propuesto en la sección anterior luego de eliminar las observaciones atípicas recién mencionadas, mediante MCO robustos a heterocedasticidad. Posteriormente se tuvieron en cuenta únicamente las variables sustantivas del modelo, y más adelante, solamente las variables metodológicas y extrínsecas, con el objetivo de indagar sobre la validez externa de los resultados. Este modelo base se muestra en el Anexo 2.

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

<i>Variables Sustantivas</i>			
Variable	Definición	Media	Desv. Est
<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).	2.166,56	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	0,17
<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>Caracteristicas_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 período 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

Variables sustantivas (continuación)

Variable	Definición	Media	Desv. Est
<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

Variables metodológicas

Variable	Definición	Media	Desv. Est
<i>Tamano</i>	Variable continua que se refiere al tamaño de la muestra.	9.171,37	23.996,21
<i>Panel</i>	1 si el estudio usa datos panel, 0 si usa sección cruzada.	0,41	0,5
<i>Semilog</i>	1 si el estudio usa forma funcional semi-logarítmica, 0 si no.	0,68	0,47
<i>Lineal</i>	1 si el estudio usa forma funcional lineal, 0 si no.	0,14	0,35
<i>Significativo</i>	1 si el efecto de la variable de interés es significativo al menos al 10%, 0 si no.	0,72	0,45

Variables extrínsecas

Variable	Definición	Media	Desv. Est
<i>Anio</i>	Variable discreta. Año de la publicación.	2.004,99	9,38
<i>Advertencia</i>	1 si los riesgos relacionados con cada externalidad eran de público conocimiento, 0 si no.	0,73	0,45

Fuente: elaboración propia.

Ahora, como se mencionó en la subsección anterior, se revisaron 25 investigaciones de las que se obtuvieron las 75 observaciones de la muestra. Dicha circunstancia conduce a que exista una correlación entre las distintas estimaciones que se extraen de una misma investigación (Nelson y Kennedy, 2008). Para solucionar este problema, se corre una regresión en la que 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 ligó a la investigación de la cual se obtuvo. En la Tabla 2 se presentan estos resultados. 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*).

Ahora, debe tenerse 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 expuestos en la Tabla 2 se ven afectados por este aspecto. Se realizó entonces un análisis de sensibilidad en el que no se tuvieron en cuenta las regiones de la forma en que se categorizaron en el modelo propuesto. En reemplazo, 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, en *No_Usa*, 3, y en *South*, 4. Esta nueva variable configuró los clústeres. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

En la siguiente subsección se interpretan los resultados de las estimaciones anteriores. Finalmente, se abre paso a las recomendaciones de política pública para Colombia y a las conclusiones.

4.4.Resultados obtenidos

Los resultados del primer modelo planteado, en el que se usan todas las variables independientes propuestas, muestran que la variable *recurso_hidrico* 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

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)
	impacto_relativo	impacto_relativo	impacto_relativo
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)	
caractersticas_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)	
logTamano	-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)
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)
<i>N</i>	71	71	71
<i>R</i> ²	0.5322	0.3716	0.2694

t statistics in parentheses
* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

Fuente: elaboración propia

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 a 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 grandes que las logarítmicas, según el primer modelo propuesto. En éste, 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 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, con lo 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 que el efecto sobre los precios se distribuye en otras variables, y no solamente en la distancia. Los análisis de bienestar que se realicen a futuro y 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.

Ahora se evalúan los resultados obtenidos al correr el modelo mediante MCO con errores estándar corregidos por clústeres, cuando éstos corresponden a la región donde se realizó el respectivo estudio (Tabla 3). En el primer modelo, donde se incluyen todas las variables

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)
	impacto_relativo	impacto_relativo	impacto_relativo
recurso_hidrico	0.115** (4.67)	0.121** (5.32)	
residuo	0.135*** (6.84)	0.158*** (9.11)	
sismo	0.0541 (0.83)	0.102* (2.90)	
contaminacion_aire	0.0109 (0.39)	0.0467*** (8.73)	
caractersticas_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)	
logTamanio	-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)
<i>N</i>	71	71	71
<i>R</i> ²	0.4013	0.2600	0.2694

t statistics in parentheses
* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$
Fuente: elaboración propia

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 éste, la variable *significativo* es positiva y significativa (al 10%), mostrando 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 meta-análisis sobre sitios de disposición de residuos, hallan que aquellos que se encuentran en la National Priority List (listado en el que se señala aquellos vertederos que son extremadamente 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. Según el modelo, las variables independientes, que en este caso son las metodológicas y las extrínsecas, explican a la variable dependiente en un 26.94%.

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. 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, por la naturaleza del modelo presentado (Braden et al., 2011). Tales elementos constituyen los principales resultados del ejercicio estadístico realizado. No obstante, se presenta a continuación una posible interpretación monetaria de las dos categorías de impacto que tuvieron resultados significativos y consistentes a lo largo de los modelos: *recurso_hidrico* y *residuo*. Al ponderar el coeficiente de la primera variable con el valor medio de las viviendas de la muestra, se tiene 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

\$3.160 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 \$2.216 dólares. Por su parte, según los resultados de las regresiones planteadas, la disponibilidad marginal por alejarse de un vertedero de residuos peligrosos es de \$2.601 dólares por hogar.

En la siguiente sección del documento se discuten las implicaciones de política pública para Colombia, relacionando los resultados de esta sección con el momento institucional del país. Posteriormente, en la sexta y última se plantean las conclusiones y se señalan algunos elementos clave, a tener en cuenta en futuros estudios que usen la metodología de precios hedónicos para calcular los costos de la técnica del *fracking*.

5. 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” (Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018).

Es precisamente en el aspecto referente a la contaminación de fuentes de agua donde el caso colombiano cobra importancia. El manejo que se le da a 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 2014¹.

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

¹ Clasificación por países y criterios especificados en: <http://epi.yale.edu/epi>

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 para Colombia los resultados del 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).

Se tiene que la categoría que presenta mayor efecto económico en cuanto a la proximidad a la fuente de contaminación (*recurso_hidrico*), es precisamente la que más preocupa en el país. De acuerdo con los resultados del modelo, esta categoría implica un aumento en la disponibilidad a pagar que varía entre \$2.216 y \$3.160 dólares. 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.

Siguiendo a Rosenberger y Loomis (2003), una vez estimada la meta-regresión, 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 9.185 viviendas (que corresponde al promedio considerado por las investigaciones usadas en la meta-regresión), el efecto económico de la exposición a la contaminación de fuentes de agua, como producto del *fracking*, varía entre \$20.319.808 y \$28.977.814 dólares. Luego dentro de este rango debería esperarse que se encuentre el efecto local de dicha externalidad en Colombia² y es deseable que este monto sea

² Cabe recordar, como se mencionó en la subsección 2.1., que Wrenn et al. estimaron los costos de la exposición a la contaminación del agua producto de la explotación de HNC en 19 millones de dólares (aproximadamente 20.6 millones a dólares del 2015), para los estados en que se lleva a cabo esa actividad; y lo

una punto de referencia, tanto en la definición de un impuesto eficiente a las empresas encargadas de la explotación de HNC, como en la inversión que se realice en los municipios cuyos pobladores se vean afectados por los efectos colaterales de la actividad.

6. Conclusiones

El trabajo presentado fue un esfuerzo por compactar las principales externalidades asociadas con la explotación de HNC. Del ejercicio desarrollado, un análisis de meta-regresión 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 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 de 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 período 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 a 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.

hicieron a través del enfoque de costos de prevención. Lo llamativo de ese resultado, y la pertinencia de nombrarlo nuevamente, es que el monto calculado por estos autores se ubica dentro del intervalo calculado en este estudio.

También es de fundamental importancia, una vez estimados los costos totales de las externalidades, compararlos con los beneficios que pueda traer la práctica. Entre éstos 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 a 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 diversas ramas del conocimiento para desentrañar rigurosamente sus consecuencias tanto físicas como sobre el bienestar social, y establecer claros nexos entre estas dos.

Anexo 1

El objetivo de esta sección es justificar la selección de las categorías de impacto, que a su vez acredita la inclusión de los estudios que no están directamente relacionados con la explotación de HNC. En primer lugar, cabe aclarar que el *fracking* o perforación horizontal para la fractura hidráulica es una técnica de extracción de hidrocarburos no convencionales, que consiste básicamente en la perforación del suelo a, aproximadamente, dos kilómetros de manera vertical y posteriormente otros dos kilómetros horizontalmente. Luego se instala una tubería a través de la cual se inyecta a alta presión una mezcla de agua, arena y ciertos químicos, cuyo volumen varía entre 8.000 y 80.000 metros cúbicos (Jackson et al., 2014). Con lo anterior, se provocan fisuras en las formaciones geológicas, y así el gas atrapado en las rocas fluye hacia el exterior por esta misma tubería.

Diversos autores se han encargado de numerar y sustentar las consecuencias ambientales negativas asociadas con el uso de esta técnica (Jackson et al., 2014; Sovacool, 2014; Barth, 2010). De estos recuentos, las externalidades más documentadas son la contaminación de fuentes de agua, sismicidad inducida, contaminación del aire y disposición indebida de residuos peligrosos, las cuales se reseñan sucintamente a continuación.

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 Pennsylvania (Jackson et al., 2014), encontró que la concentración de metano en estos pozos era 17 veces mayor en comparación a zonas en las que no se lleva a cabo la práctica, a la cual era atribuible este fenómeno.

De otra parte, la sismicidad 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 14 viviendas (Ellsworth, 2013).

Ahora, con respecto a la contaminación del aire, el entorno de los centro de operación de *fracking* se relaciona con una elevada concentración de metano, ácido sulfhídrico y otros componentes, algunos de ellos cancerígenos. Éstos se evidenciaron en los alrededores de pozos de explotación de HNC en el condado de Garfield, en Colorado, mediante un estudio de

muestreo del aire (Jackson et al., 2014). Por último, en lo referente a la disposición de residuos, éstos pueden inyectarse bajo tierra, lo que, como recién se mencionó, 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 metros cúbicos de agua residual, que incluye químicos potencialmente peligrosos para la salud humana (Ibíd., 2014).

Anexo 2

Tabla A1. Estimación mediante MCO robustos a heterocedasticidad (modelo base).

	(1)	(2)	(3)
	impacto_relativo	impacto_relativo	impacto_relativo
recurso_hidrico	0.164** (2.04)	0.152** (2.19)	
residuo	0.135* (1.95)	0.153** (2.19)	
sismo	0.157** (2.22)	0.163** (2.27)	
contaminacion_aire	-0.00679 (-0.23)	0.0123 (0.54)	
caractersticas_vecindario	-0.0318 (-1.66)	-0.0239* (-1.68)	
desempleo	0.0127*** (2.92)	0.00481 (1.05)	
buffer	-0.000437 (-0.19)	0.00153 (0.84)	
west	0.0685*** (3.46)	0.0484** (2.49)	
south	-0.00160 (-0.07)	-0.0171 (-1.13)	
no_usa	-0.0671*** (-2.78)	-0.0511** (-2.36)	
logTamano	-0.000000643 (-0.00)		-0.0137** (-2.42)
panel	-0.00123 (-0.06)		-0.0437** (-2.23)
semilog	0.0399** (2.29)		0.0266 (1.11)
lineal	-0.00643 (-0.23)		0.0206 (0.88)
significativo	0.0673*** (3.29)		0.0420** (2.27)
logAnio	-1.019 (-0.26)		6.399** (2.30)
advertencia	-0.0428* (-1.95)		-0.0428* (-1.87)
_cons	7.541 (0.25)	-0.130* (-1.74)	-48.50** (-2.30)
<i>N</i>	71	71	71
<i>R</i> ²	0.5322	0.3716	0.2694

t statistics in parentheses
 * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$
 Fuente: elaboración propia

Anexo 3

A continuación se listan los estudios que conformaron la muestra del trabajo. Primero, se registran los que hicieron parte de la base de datos final. Luego, aquellos que tuvieron que ser descartados por no ser directamente comparables con los primeros.

A3.1. Estudios sobre los que se construyó la matriz de meta-regresión

Boslett, A., Guilfoos, T., Lang, C. (2015). Valuation of Expectations: A Hedonic Study of Shale Gas Development and New York's Moratorium. *Journal of Environmental Economics and Management*, (77), 14-30.

Bouvier, R., Halstead, J., Conway, K., & Manalo, A. (2000). The Effect of Landfills on Rural Residential Property Values: Some Empirical Evidence. *The Journal of Regional Analysis & Policy*, (30), 23-37.

Boxall, P., Chan, W., & McMillan, M. (2005). The impact of oil and natural gas facilities on rural residential property values: a spatial hedonic analysis. *Resource and Energy Economics* (27), 248-269.

Chamblee, J., Dehring, C., Depken, C., & Nicholson, J. (2015). Water Contamination, Land Prices, and the Statute of Repose. *Journal of Real Estate Economics* (51), 398-414.

Deaton, J., Hoehn, J. (2004). Hedonic analysis of hazardous waste sites in the presence of other urban disamenities. *Environmental Science and Policy* (7), 499-508.

Delgado, M., Guilfoos, T., & Boslett, A. (2014). "The Cost of Hydraulic Fracturing: A Hedonic Analysis". Working Paper.

Gopalakrishnan, S., Klaiber, H. (2013). Is the Shale Boom a Bust for Nearby Residents? Evidence from Housing Values in Pennsylvania. *American Journal of Agricultural Economics*.

Guignet, D. (2012) What do Property Values Really Tell Us? A Hedonic Study of Underground Storage Tanks. *National Center for Environmental Economics*. Working Paper 12-01.

Ham, Y., Maddison, D., Elliott, R. (2013). The valuation of landfill disamenities in Birmingham. *Ecological Economics* (85), 116-129.

Hansen, J., Benson, E., Hagen, D. (2006). Environmental Hazards and Residential Property Values: Evidence from a Major Pipeline Event. *Land Economics* (82), 529-541.

Hite, D., Chern, W., Hitzhusen, F., Randall, A. (2001). Property-value Impacts of an Environmental Disamenity: The Case of Landfills. *Journal of Real Estate Finance and Economics*, (22), 185-202.

James, A., James, J. (2014). . Working Paper

Kiel, K. (1995). Measuring the Impact of the Discovery and Cleaning of Identified Hazardous Waste Sites on House Values. *Land Economics* (71), 428-435.

Kohlhase, J. (1991). The Impact of Toxic Waste Sites on Housing Values. *Journal of Urban Economics* (30), 1-26.

Klaiber, H., Gopalakrishnan, S. (2012). The Impact of Shale Exploration on Housing Values in Pennsylvania. Working paper.

Koster, S., Ommeren, J. (2015). A shaky business: natural gas extraction, earthquakes and housing prices. *European Economic Review* (80), 120-139.

Legget, C., Bockstael, N. (2000). Evidence of the Effects of Water Quality on Residential Land Prices. *Journal of Environmental Economics and Management* (39), 121-144.

Michaels, R., Smith, V. (1990). Market Segmentation and Valuing Amenities with Hedonic Models: The Case of Hazardous Waste sites. *Journal of Urban Economics* (28), 223-242.

Muehlenbachs, L. Spiller, E., Timmins, C. (2013). Shale Gas Development and the Costs of Groundwater Contamination Risk. *Resources for the Future*.

Nelson, A., J. Genereux, M. Genereux. (1992). Price Effects of Landfills on Housing Values. *Land Economics* (68), 359-365.

Reichert, A. K., M. Small and S. Mohanty. (1992). The Impacts of Landfills on Residential Property Values. *Journal of Real Estate Research* (7), 297-314.

Simons, R., Bowen, W., Sementelli, A. (1997). The Effects of Underground Storage Tanks on Residential Property Values in Cuyahoga County, Ohio. *Journal of Real Estate Research* (14), 29-42.

Smolen, G. E., G. Moore and L. V. Conway. (1992). Economic Effects of Hazardous Chemical and Proposed Radioactive Waste Landfills on Surrounding Real Estate Values. *Journal of Real Estate Research* (7), 283-295.

Taylor, L., Phaneuf, D., Liu, X. (2012). Disentangling Property Values Impacts of Environmental Contamination from Locally Undesirable Land Uses: Implications for Measuring Post-Cleanup Stigma. *Journal Urban Economics*.

Thayer, M., H. Albers and M. Rahmatian. (1992). The Benefits of Reducing Exposure to Waste Disposal Sites: A Hedonic Housing Value Approach. *Journal of Real Estate Research* (7), 265-282.

Zabel, J., Guignet, D. (2012). A hedonic analysis of the impact of LUST sites on house prices. *Resource and Energy Economics* (34), 549-564.

A3.2. Estudios revisados que no se ajustaron a los requerimientos planteados

Des Rosiers, F., Bolduc, A., Thériault, M. (1999). Environmental and value. Does drinking water quality affects house prices? *Journal of Property Investment & Finance* (17), 444-463.

Epp, D., Al-Ani, K. (1979). The Effect of Water Quality on Rural Nonfarm Residential Property Values. *American Journal of Agricultural Economics* (61), 529-534.

Farren, M., Weinstein, A., Partridge, M., Betz, M. (2013). *Assessing the Impact of Shale Energy Boom on Ohio Local Housing Markets*. Ohio State University.

Gamper-Rabindran, S., Timmins, C. (2013). Does cleanup of hazardous waste sites raise housing values? Evidence of spatially localized benefits. *Journal of Environmental Economics Management* (65), 345-360.

J. Lore and Associates, Ltd. (1988). *The Effect of Sour Gas Facilities on Land Values in West Central Alberta*. Shell Canada.

Kelsey, T., Adams, R., Milchak, S. (2012). *Real Property Tax Base, Market Values, and Marcellus Shale: 2007 to 2009*. Pennsylvania, Center for Economic and Community Development.

McCluskey, J., Gordon, R. (2001). Estimation of Perceived Risk and Its Effect on Property Values. *Land Economics* (77), 42-55.

McLaughlin, P. (2011). Something in the Water? Testing for Groundwater Quality Information in the Housing Market. *Journal of Agriculture and Resource Economics* (36), 375-394.

Reichert, A. (1997). Impact of a Toxic Waste Superfund Site on Property Values. *The Appraisal Journal* (65), 381-392.

Viscusi, W., Huber, J., Bell, J. (2008). The Economic Value of Water Quality. *Environmental Resources Economics* (41), 169-187.

Throupe, R., Simons, R., Mao, X. (2013). A Review of Hydro “Fracking” and Its Potential Effects on Real Estate. *Journal of Real Estate Literature*, (21), 205-232.

Weber, J., Burnett, J., Xiarchos, I. (2014). Shale Gas Development and Housing Values Over a Decade: Evidence From the Barnett Shale. *USAEE*. Working Paper.

Referencias bibliográficas

Barth, J. (2010). *Unanswered questions about the economic impact of gas drilling in the Marcellus shale: Don't jump to conclusions*. New York, J.M. Barth & Associates.

Braden, J., Feng, X., 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 Garay, J. (2013) *Minería en Colombia. Derechos, políticas públicas y gobernanza*. 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., Carey, D. (2014). *Exploring the Local Impacts of Shale Gas Development*. Washington D.C. Resource for the Future.

Delgado, M., Guilfoos, T., & Boslett, A. (2014). The Cost of Hydraulic Fracturing: A Hedonic Analysis. Working Paper.

Di Rasio, D. (2012). Hidrocarburos no convencionales, ¿novedad o el horror potenciado?. Observatorio Petrolero Sur-Oilwatch.

Ellsworth, W. (2013). Injection-Induced Earthquakes. *Science*, 341, 142-149.

Energy Information Administration (EIA). 2013. *World Shale Gas and Shale Oil Resource Assessment*. Washington D.C., Department of Energy.

Energy Information Administration (EIA). 2015. *Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040*. Washington, D.C., Department of Energy.

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 D.C., Universidad Nacional de Colombia.

Hefley, W., Wang, Y. (2015). *Economics of Shale Gas Development. Case Studies and Impacts*. New York, Springer.

Jackson, R., Vengosh, J., Davies, R., Darrah, T., O'Sullivan, F., Pétron, G. (2014). The Environmental Costs and Benefits of Fracking. *The Annual Review of Environment and Resources*, 39, 327-362.

Klaiber, H., Gopalakrishnan, S. (2012). The Impact of Shale Exploration on Housing Values in Pennsylvania. Working paper.

Mohammad, S., Graham, D., Melo, P., 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., Timmins, C. (2014). The Housing Market Impacts of Shale Gas Development. *American Economic Review*, (105), 3633-3659.

Nelson, J. 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., Loomis, J. (2003). *Benefit Transfer*. En Champ, P., Boyle, K., Brown, T. (2003). *A Primer on Nonmarket Valuation*. New York, Springer Science+Business Media, LLC.

Simons, R., 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., Huang, J. (1995). Can Markets Value Air Quality? A Meta-Analysis of Hedonic Property Value Models. *Journal of Political Economy*, (103), 209-227.

Sovacool, B. (2014). Cornucopia or curse? Reviewing the costs and benefits of shale gas hydraulic fracturing (fracking). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (37), 249-264.

Throupe, R., Simons, R., Mao, X. (2013). A Review of Hydro "Fracking" and Its Potential Effects on Real Estate. *Journal of Real Estate Literature*, (21), 205-232.

Wrenn, D., Klaiber, H., 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*.