

Documentos CEDE

ISSN 1657-7191 edición electrónica

Estimación de la senda óptima de extracción para un recurso natural no renovable: caso de estudio para la actividad carbonífera a cielo abierto en el centro del departamento del Cesar, Colombia

Jorge Andrés Perdomo Calvo
Ana María Jaramillo Pérez
Juan Carlos Mendieta López



MARZO DE 2010

Serie Documentos Cede, 2010-9
ISSN 1657-7191

Marzo de 2010

© 2010, Universidad de los Andes–Facultad de Economía–Cede
Calle 19A No. 1 – 37, Bloque W.

Bogotá, D. C., Colombia

Teléfonos: 3394949- 3394999, extensiones 2400, 2049, 3233

infocede@uniandes.edu.co

http://economia.uniandes.edu.co

Ediciones Uniandes

Carrera 1ª Este No. 19 – 27, edificio Aulas 6, A. A. 4976

Bogotá, D. C., Colombia

Teléfonos: 3394949- 3394999, extensión 2133, Fax: extensión 2158

infeduni@uniandes.edu.co

Edición, diseño de cubierta, pre prensa y prensa digital:

Proceditor Ltda.

Calle 1ª C No. 27 A – 01

Bogotá, D. C., Colombia

Teléfonos: 2204275, 220 4276, Fax: extensión 102

proceditor@eth.net.co

Impreso en Colombia – *Printed in Colombia*

El contenido de la presente publicación se encuentra protegido por las normas internacionales y nacionales vigentes sobre propiedad intelectual, por tanto su utilización, reproducción, comunicación pública, transformación, distribución, alquiler, préstamo público e importación, total o parcial, en todo o en parte, en formato impreso, digital o en cualquier formato conocido o por conocer, se encuentran prohibidos, y sólo serán lícitos en la medida en que se cuente con la autorización previa y expresa por escrito del autor o titular. Las limitaciones y excepciones al Derecho de Autor, sólo serán aplicables en la medida en que se den dentro de los denominados Usos Honrados (Fair use), estén previa y expresamente establecidas; no causen un grave e injustificado perjuicio a los intereses legítimos del autor o titular, y no atenten contra la normal explotación de la obra.

**ESTIMACIÓN DE LA SENDA ÓPTIMA DE EXTRACCIÓN PARA UN RECURSO
NATURAL NO RENOVABLE: CASO DE ESTUDIO PARA LA ACTIVIDAD
CARBONÍFERA A CIELO ABIERTO EN EL CENTRO DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR-
COLOMBIA**

Jorge Andrés Perdomo Calvo*†,
jor-perd@uniandes.edu.co

Ana María Jaramillo Pérez‡
am.jaramillo73@uniandes.edu.co

Juan Carlos Mendieta López‡,
jmendieta@uniandes.edu.co

Resumen: la economía de los recursos naturales, permite conocer la forma como se extrae sosteniblemente un recurso natural renovable y no renovable. De esta forma, el presente estudio con información financiera y sobre costos totales de producción (estimados mediante un modelo de datos panel con efectos aleatorios), para siete principales empresas explotadoras de carbón en el centro del departamento del Cesar, contrasta la senda óptima de extracción actual y la sostenible que incluye el valor monetario de las externalidades ambientales y sociales generadas por la actividad minera a cielo abierto. Asimismo, determina la presión impuesta al recurso dado que las firmas no internalizan los costos ambientales en su función de beneficios. Lo anterior, es realizado a partir de modelos de decisión de Markov y técnicas de programación dinámica propuestas por Bellman (1957). Así, se evidenció que la mejor decisión tomada por parte de las firmas multinacionales, establecidas en la zona, es extraer todas las reservas disponibles del recurso en el menor tiempo posible, antes de culminar la concesión. Como consecuencia, del amplio nivel de reservas, que conlleva a bajos costos de extracción, y gracias a los favorables precios de mercado enfrentados por la industria en su momento.

Palabras clave: explotación de carbón a cielo abierto, departamento del Cesar-Colombia, economía de los recursos naturales, senda de extracción óptima, recurso natural no renovable, externalidades ambientales y sociales, función de costos de producción, modelos de datos panel, efectos aleatorios, desarrollo sostenible, ecuaciones de Bellman, programación dinámica.

Clasificación JEL: C23, C61, L72, Q01, Q56.

* Corresponde a los autores. Agradecemos, muy especialmente la valiosa colaboración y aportes a este trabajo, al grupo de análisis económico del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT); Miguel Mendoza, Mildred Méndez, Isabel Álvarez, Jaime Arias. También a nuestro grupo de trabajo Leonardo García, Diana Cardona, Olga Rodríguez, María Clara Hurtado y Johoner Correa.

† Facultad de Economía, Universidad de los Andes, Colombia, e-mail: jor-perd@uniandes.edu.co

‡ Facultad de Economía, Universidad de los Andes, Colombia, e-mail: am.jaramillo73@uniandes.edu.co

‡ Profesor investigador (jmendieta@uniandes.edu.co), facultad de Economía, Universidad de los Andes, Colombia. Centro de Estudios sobre Desarrollo Económico (CEDE); A.A. 4976, Bogotá, D.C.; Colombia. URL: <http://economia.uniandes.edu.co>

**OPTIMAL PATHS ESTIMATION FOR THE EXTRACTION OF RESOURCES
NONRENEWABLE: A CASE TO OPENCAST COAL MINING PROJECTS AT THE MIDDLE
OF THE CESAR-COLOMBIA**

Jorge Andrés Perdomo Calvo,
jor-perd@uniandes.edu.co

Ana María Jaramillo Pérez
am.jaramillo73@uniandes.edu.co

Juan Carlos Mendieta López,
jmendiet@uniandes.edu.co

Abstract: The natural resources economics, allows to get to know the shape sustainable extractions to opencast coal mining projects at the middle of the Cesar-Colombia. Thus, this study with financial information and total productions cost (estimated by means of panel data model with random effects), from seven multinationals firms into region, it compared the current optimal paths extractions and sustainable that it include the measures of environmental and resources value. Meantime, the Markov decision models and dynamic programming through Bellman equation it helped at the evidenced to estimated optimal paths. Therefore, best decision for company the it's extract all coal now like consequence of the low cost, favorable prices and level high of the reserve stock.

Key words: Extractions to opencast coal mining projects, Colombia, natural resources economics, optimal paths extractions, natural resources nonrenewable, environmental and social externalities, cost productions functions, data panel models, random effects, sustainable development, Bellman equation, dynamic programming.

JEL Classification: C23, C61, L72, Q01, Q56.

Introducción

La crisis energética iniciada en 1973 generó la necesidad de encontrar un sustituto energético al petróleo, fue así como se empezó a desarrollar la minería de carbón a cielo abierto en la costa del Caribe colombiano; Especialmente en los departamentos de la Guajira, Cesar y Córdoba (Hoz, 1998, 5), este auge permitió al carbón posicionarse como “el segundo producto nacional de exportación”. En relación con lo anterior, la explotación carbonífera en la zona se dio por la cercanía a puertos de exportación, altos niveles de reservas y estándares de calidad que presenta el mineral.

De este modo, para el año 2003 el departamento del Cesar alcanzó una producción de 19 millones de toneladas, correspondientes al 40% del total Nacional (Bonet, 2007), situación que continua actualmente. De acuerdo con la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), la producción carbonífera en el departamento entre 1994 y 2005 pasó de representar el 8% al 46% de la producción nacional. Asimismo, el comportamiento de la actividad, permitió que el producto interno bruto (PIB) del departamento del Cesar creciera a tasas superiores a las observadas en el PIB nacional durante 1990 y 2004, Bonet (2007).

Por otro lado, el índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI) medido como el porcentaje de población por debajo de la línea de pobreza, la tasa de analfabetismo y el porcentaje de asistencia escolar presentan niveles inferiores a los promedios nacionales, Bonet (2007). Es así, como los indicadores sociales mencionados entre 1990 y 2004 no mostraron avances, a pesar de los altos niveles de producción, empleos, regalías, salarios y utilidades operacionales del carbón generados para el departamento del Cesar.

El potencial carbonífero en la zona es considerable, de 1'878.210 hectáreas disponibles para títulos mineros existen 496.318 hectáreas concesionadas por títulos; de estas, 40.188 hectáreas están en exploración, 2.715 en construcción y montaje, 444.570 en solicitud y trámite y únicamente 8.845 están en periodo de explotación (Gobernación del Cesar, 2008). De este modo, las reservas de carbón en el Cesar son amplias, generando un riesgo ambiental y social dado que los aumentos en la actividad minera a cielo abierto incrementan la presión sobre los recursos naturales; debido a que, a nivel ambiental es frecuente encontrar altos niveles de contaminación por la liberación de residuos durante la extracción y transporte del carbón, presentando cambios y alteraciones en morfológicos en la alteración del paisaje, ocasionando degradación en los ecosistemas aledaños, pérdida de fauna y flora endémica (Yushi, Hong, & Fuqiang, 2007).

Igualmente, ocurren daños sociales relacionados con problemas de salud, evidenciados mediante enfermedades ocupacionales de los mineros, poblaciones aledañas y accidentes presentados en las minas por las precarias condiciones de trabajo (Yang, 2007). Finalmente, Según Bonet (2007), la problemática económica se refleja en índices de corrupción que impiden la compensación por la pérdida del recurso no renovable con inversión en salud, educación e infraestructura.

Dada la complejidad de la problemática que gira en torno a la actividad minera se realiza este trabajo con el objetivo de estimar una senda de extracción óptima para el mineral, con el fin de conocer la forma de explotar sosteniblemente el recurso en el centro del

departamento del Cesar. Específicamente, se estimó la función de costos de la actividad carbonífera en la zona; mediante ésta, especificar la función de beneficios del sector y por medio de ecuaciones de Bellman estimar la senda óptima de extracción.

De este modo, será posible formular posibles escenarios involucrando los costos de las externalidades sociales y ambientales de la actividad, y a la luz de los resultados brindar recomendaciones de política. Es así como este trabajo pretende demostrar que los bajos costos de producción de la actividad generan una presión de las firmas sobre el recurso que no permite su desarrollo sostenible.

Así, se evidenció que las firmas multinacionales establecidas en la zona la mejor decisión que pueden tomar es extraer todas las reservas disponibles del recurso en el menor tiempo posible, antes de culminar la concesión. Como consecuencia del amplio nivel de reservas, que conlleva a bajos costos de extracción, y gracias a los favorables precios de mercado enfrentados por la industria en su momento.

Con el fin dar cumplimiento del objetivo, el documento se encuentra dividido en siete secciones: la primera corresponde a la introducción; en la segunda, se desarrolla la revisión bibliográfica de los estudios empíricos y teóricos de las sendas óptimas de extracción, con recursos naturales no renovables. La tercera y cuarta sección, especifican el marco teórico y metodológico del presente trabajo respectivamente, las fuentes de información está en la quinta sección. El análisis y la descripción de resultados en la sexta sección, en la séptima sección las conclusiones del estudio y las recomendaciones de política.

I. Estudios sobre sendas óptimas de extracción para recursos naturales renovables y no renovables

El interés por el uso sostenible de los recursos naturales empieza en 1931 con el estudio de Hotelling (*The economics of exhaustible resources*, nombre en inglés). Gran parte de los trabajos realizados sobre sendas óptimas de extracción para recursos naturales no renovables, encuentran resultados donde el empresario maximiza los ingresos descontados de forma teórica. Sin embargo, pocos autores han desarrollado trabajos empíricos y generalmente solo se ha evidenciado con el caso del petróleo, tomándolo como el único recurso natural no renovable para realizar el respectivo análisis. De igual manera, la teoría propuesta por Bellman no ha sido muy desarrollada debido al nivel de complejidad que implican los cálculos matemáticos.

Así, Pindyck (1978) incluye variabilidad en las reservas de petróleo para el análisis de exploración y explotación de recurso natural no renovable, con estructura de mercado monopolística y competencia perfecta. A través del planteamiento de un Hamiltoniano, demuestra la maximización de los ingresos presentes y futuros del empresario, el autor indica que cuando aumentan los niveles de extracción disminuyen las actividades exploratorias exitosas de petróleo.

Es por esto, que el nivel deseado de sus reservas depende de la estructura de costos de extracción; si éstos no dependieran de la cantidad de inventario, los productores evitarán las

actividades exploratorias para dedicarse a explotar. Igualmente, establece la relación inversa entre costos y nivel de reservas, porque los empresarios determinarán simultáneamente el nivel de exploración y explotación, que permita igualar sus ingresos marginales con los costos marginales. El autor demuestra que si la dotación inicial de reservas es pequeña, el precio seguirá una tendencia en forma de U, contrario a lo demostrado por Hotelling (1931).

De este modo, Pindyck, para examinar las características de la solución competitiva y monopolística, emplea datos de petróleo para la región pérmica en Texas durante 1965-1974. Entre éstos están, 7.170 millones de reservas, costo de extracción por barril de 1,25 dólares para 1966, función de demanda $q=660-20p$ (q es la cantidad de petróleo en barriles y p su precio en dólares), tasa de descuento de 5%, precio promedio del petróleo de 3 dólares y una producción de 600 millones de barriles. Se simuló repetidamente el modelo planteado, variando las condiciones iniciales de precio y nivel de actividad exploratoria, hasta que la condición terminal y el promedio de los ingresos llegaron a cero simultáneamente. Estas deducciones son importantes para el presente estudio, porque proporciona el marco teórico y metodológico para encontrar la senda de extracción actual de carbón en condiciones de oligopolio, dado que las siete empresas carboníferas estudiadas para el departamento del Cesar tienen esta estructura de mercado.

Chapman (1987) calculó una senda de producción de petróleo para el caso de estructura de mercado monopólica y competencia perfecta. El autor utiliza un problema de programación dinámico continuo, donde el objetivo es maximizar el valor presente de las ganancias. Toma un nivel de reservas en el mundo de 1.189 trillones de barriles, función inversa de demanda lineal $p=75-2,5q$, asumiendo un costo de producción de 20 dólares por barril y tasa anual de descuento del 10%.

De lo anterior, el autor calcula que el plan socialmente óptimo inicia produciendo 22 billones de barriles al año; decreciendo hasta llegar al año 64, donde el recurso se agota. El monopolista inicia con una extracción de 11 billones de barriles al año y se mantiene en ese punto por muchos años y agota el recurso en el año 118. Asimismo, define tres tipos de productores: impaciente, miope y óptimo, cada uno extrae diferentes cantidades durante 36, 54 y 64 años respectivamente; periodo de tiempo que les genera un valor social neto por 5,74 trillones de dólares al impaciente, 6,02 al miope y 6,03 al óptimo. Esto, le permite concluir que las "sendas de producción difieren considerablemente del óptimo, generando ganancias esencialmente equivalentes¹".

Los resultados encontrados por Chapman (1987), coinciden con las decisiones de políticas de Pindyck (1978). El análisis de los diferentes productores es bastante interesante, sin embargo al igual que Pindyck no incluyen el efecto de la incertidumbre por posibles hallazgos, lo que puede alterar el valor del óptimo sustancialmente. No obstante el estudio de Chapman es relevante en este estudio para proveer el marco teórico y metodológico necesario en la estimación de la senda de extracción de Carbón.

Chappel & Dury (1994) bajo estructura de mercado monopólica y costos marginales crecientes, analizan teóricamente la explotación óptima de un recurso natural no renovable.

¹ Chapman, D. (1987, 7).

Los resultados muestran que el monopolista extraerá el recurso hasta donde los costos marginales sean superiores a los ingresos marginales. Los autores, demuestran que en la solución de estado estacionario, las reservas del recurso pueden no acabarse y los niveles óptimos de agotamiento surgen cuando la maximización de beneficios futuros descontados, a través de un Hamiltoniano, permiten elegir la extracción máxima del recurso en el menor tiempo posible. Infortunadamente, el trabajo realizado por Chappel & Dury, no muestra cifras concretas para un caso específico con el objetivo de dar recomendaciones de política; es más valioso enfocarse en ejercicios empíricos, como lo realiza el presente trabajo.

Con respecto a las externalidades de la actividad carbonífera a cielo abierto, Yang (2007) explica que China es uno de los más grandes productores de carbón en el mundo, enfrentando altos niveles de contaminación generados por la minería, poniendo en riesgo el medio ambiente y salud de sus ciudadanos. Entre los problemas más importantes a nivel ambiental mencionan, contaminación y escasez de fuentes de agua, ampliación de terreno baldío, desertificación y hundimiento del suelo que genera intrusiones de agua marina. En cuanto a la salud, un incremento de las enfermedades ocupacionales como: pulmonares, pérdida de audición, trastornos musculares y reumatismo entre otros; generando graves consecuencias, *“cada año, aproximadamente el 80% de las muertes por accidentes en minas carboníferas ocurren en China, debido al mal estado de las medidas de seguridad²”*.

Estos problemas generan costos sociales y ambientales que según Yushi et al. (2007), se deben incluir en el precio para internalizar las externalidades de la actividad minera. En conclusión, el precio del carbón aumentaría en 23,1% después de internalizar todos los costos asociados a la actividad. De este modo, la importancia de esta investigación radica en la implementación de datos empíricos para la actividad carbonífera en el centro del departamento del Cesar en Colombia, y como se hubiese comportando las firmas para extraer el recurso al momento de internalizar los principales costos de las externalidades ambientales y sociales en la región. Estos resultados, en Colombia permitirán hacer recomendaciones de política.

II. Asignación inter-temporal eficiente de recursos naturales no renovables

La actividad de extracción de carbón nacional e internacional puede fundamentarse desde la perspectiva o estudio de la economía de los recursos naturales no renovables. Definidos, como “aquellos cuya tasa de regeneración o crecimiento es nula o por lo menos es insignificante en una escala humana³”. Esto implica que la explotación y utilización desmesurada llevará al agotamiento del recurso en el futuro.

Por lo tanto, “la economía de los recursos naturales trata de encontrar herramientas para la asignación inter-temporal eficiente de recursos⁴”. Entre los instrumentos numéricos desarrollados para evidenciar el problema, se encuentran la programación dinámica

² Yang, Y. (2007,3).

³ Maldonado, J. (2008, 90).

⁴ Maldonado, J. (2008, 11).

propuesta por Bellman (1957); basada en el principio de optimalidad⁵. "Es así, como las medidas que se toman para la conservación del recurso natural no renovable (RR.NN) dependen de su escasez, física o económica; es decir, económicamente un recurso es escaso cuando a precio cero la demanda es superior a la oferta.

De esta forma, el estado físico del recurso, cambios y avances tecnológicos pueden afectar sus niveles de reservas, Maldonado (2008). Según Conrad (1999), el modelo de extracción de un recurso no renovable (carbón), plantea maximizar los beneficios futuros del monopolista descontados en el tiempo (t), que en este estudio se refiere a las principales empresas explotadoras en el Cesar. Por esto, propone reservas costo-dependientes, en otras palabras, los costos de extracción aumentan con el tiempo cuando disminuyen las reservas.

$$\text{Max}_x \sum_{t=0}^T \delta^t (p_t x_t - C(x_t, s_t)) \quad \text{s.a.} \quad s_{t+1} = s_t - x_t \quad (1)$$

Así, en la ecuación uno es representada la función de recompensa o beneficio enfrentada por las multinacionales carboníferas en el Cesar, cuyo objetivo es maximizarla (Max) sujeta (s.a) a la variación de las reservas de carbón del siguiente periodo (s_{t+1}). Donde, p_t describe el precio del carbón en un determinado periodo t , x_t la cantidad extraída de carbón en el momento t , $C(x_t, s_t)$ la función de costos de producción del empresario; que depende negativamente del nivel de reservas (s_t) disponibles y el nivel de extracción de carbón (x_t). Esta ecuación, es descontada a través del tiempo (t) con valor presente a través del factor de descuento (δ^t)⁶.

Asimismo, $p_t x_t$ designa el ingreso generado por las empresas mineras en el tiempo de operación; en esta misma ecuación puede observar como las firmas maximizan sus beneficios de acuerdo al comportamiento del precio internacional del carbón y sus costos de producción, decidiendo periodo a periodo la cantidad del mineral que deben explotar para obtener la mayor ganancia posible antes que los precios desciendan o se incrementen los costos de producción; por una disminución en las reservas o internalización del valor monetario de las externalidades ambientales y sociales, generadas por la actividad.

$$\mathcal{L} = \sum_{t=0}^T \delta^t \{p_t x_t - C(x_t, s_t)\} + \delta \lambda_{t+1} (-x_t + s - s_{t-1}) \quad (2)$$

Por otra parte, para resolver analíticamente la ecuación uno es planteado el Langragiano (\mathcal{L}) (véase ecuación 2), debido a que la maximización de beneficios se encuentra sujeta a la evolución de la variable de estado, en este caso el inventario de las reservas de carbón en el centro del Cesar. Donde \mathcal{L} , describe la ecuación de evolución para cada periodo del horizonte de análisis y λ_{t+1} representa el precio sombra del carbón en el periodo posterior ($t + 1$).

⁵ Una política óptima tiene la propiedad que cualquier primera decisión en el estado inicial, las posteriores restantes deben constituir en una política óptima con respecto al estado resultante de la primera decisión.

⁶ $\delta = \frac{1}{1+\rho}$, donde ρ es la tasa de descuento empleada en el problema o costo de oportunidad del inversionista en este caso equivale a la tasa de interés internacional Libor.

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_t} = 0, \quad (2a) \quad \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial s_t} = 0, \quad (2b) \quad \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\delta \lambda_{t+1})} = 0, \quad (2c), \text{ desde } t = 0, \dots, T$$

De la misma forma, en las ecuaciones 2a, 2b y 2c son expuestas las condiciones de primer orden de \mathcal{L} con respecto al cambio en la extracción del mineral (∂x_t), variación de las reservas de carbón (∂s_t) y oscilación de su precio sombra los periodos posteriores ($\partial(\delta \lambda_{t+1})$). Resultando, la condición de maximización para la cantidad extraída, la evolución de las reservas y los multiplicadores, en cada periodo de tiempo.

$$\frac{[P_t - C_x(\cdot)] - [P_{t-1} - C_x(\cdot)]}{[P_{t-1} - C_x(\cdot)]} = \delta + \frac{C_s(\cdot)}{[P_{t-1} - C_x(\cdot)]} \quad (3)$$

Finalmente, de las condiciones de primer orden se encuentra la función que permite deducir el comportamiento de los mineros, al maximizar los beneficios descontados en el tiempo (véase ecuación 3). Donde, $C_x(\cdot)$ y $C_s(\cdot)$ representan la derivada de los costos totales de producción de carbón con respecto al nivel de su extracción y la cantidad de reservas, respectivamente. Por consiguiente, el termino $[P_t - C_x(\cdot)]$ representa el punto donde la industria carbonífera maximiza los beneficios, dado que en ese momento los ingresos marginales (P_t , expresado en el precio) igualan los costos marginales $C_x(\cdot)$ de la actividad carbonífera.

De esta manera, el lado izquierdo de la ecuación tres muestra la tasa de crecimiento de esta renta para cada momento t . Como un todo, esta ecuación es conocida como la condición de optimalidad convergiendo a la regla de Hotelling (1931) cuando $C_x(\cdot) = 0$ y $C_s(\cdot) = 0$, que busca la maximización del bienestar derivado de la extracción de un RR.NN. Si $\frac{[P_t - C_x(\cdot)] - [P_{t-1} - C_x(\cdot)]}{[P_{t-1} - C_x(\cdot)]} > \delta + \frac{C_s(\cdot)}{[P_{t-1} - C_x(\cdot)]}$, es mejor no extraer una unidad de carbón durante ese periodo y esperar al siguiente para obtener mayores beneficios. Cuando $\frac{[P_t - C_x(\cdot)] - [P_{t-1} - C_x(\cdot)]}{[P_{t-1} - C_x(\cdot)]} < \delta + \frac{C_s(\cdot)}{[P_{t-1} - C_x(\cdot)]}$ "es mejor extraer esa unidad de recurso ahora, venderla y destinar ese beneficio a la actividad alternativa que renta ρ ". Para evidenciar lo anterior, en el marco metodológico se encuentra expuesta la técnica en recursos naturales no renovables que permite analizar las posibles decisiones de políticas a tomar por parte de un empresario a través del principio de optimalidad de Bellman y los modelos de decisión de Markov.

⁷ Maldonado, J. (2008, 95).

III. Metodología analítica

Con el objetivo de confrontar la senda actual de extracción carbonífera, a continuación se describe la metodología aplicada; de acuerdo con la información disponible sobre costos de producción de extracción para siete diferentes firmas carboníferas y reservas del mineral durante cinco años (2004-2008) en la región. Estos datos, fueron deflactados a precios constantes de 2007; así, en primer lugar se especificó la función de costos de la actividad en el departamento del Cesar a estimar, mediante un modelo de datos panel con efectos aleatorios; debido a que la información presentan dimensión de espacio (para cada una de las siete firmas) y tiempo (2004-2008).

A. Datos panel

Una forma de datos tipo panel, es aquella que registra información sobre un grupo particular de individuos o firmas a través de distintos momento en el tiempo. En este trabajo, se refiere a la siete empresas carboneras para la cuales se tiene información sobre costos, producción y reservas de carbón entre 2004 y 2008. Asimismo, los modelos de datos panel pueden ajustarse a estimadores insesgados y eficientes de acuerdo si su estructura corresponde a efectos fijos, aleatorios o mínimos cuadrados ordinarios.

Para el caso particular del Cesar la función de costos se ajustó a una estructura de efectos aleatorios, es decir que existe una función de heterogeneidad no observada entre el error (ε_{it}) a través del tiempo y los individuos (firmas). Lo anterior, se evidenció mediante la prueba Hausman donde se probaron los estimadores de efectos fijos contra los aleatorios. Para más detalles de este tema véase Greene (2008, 208-209) y Rosales, Perdomo, Morales y Urrego (2010, 371-373).

$$costos_{it} = \gamma producción_{it}^{\beta} Reservas_{it}^{-\alpha} \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$Lncostos_{it} = Ln\gamma + \beta LnProducción_{it} - \alpha LnReservas_{it} + Ln\varepsilon_{it} \quad (5)$$

Así, las ecuaciones cuatro y cinco definen el modelo panel de efectos aleatorios para los costos de producción de carbón a cielo abierto, estimado mediante mínimos cuadrados generalizados. Donde γ , β y α representan las constantes de la función; el signo negativo que acompaña a α indica la relación inversa entre el nivel de reservas de carbón y los costos de su extracción. En otras palabras, a medida que aumentan las cantidades de las reservas del mineral disminuyen sus costos para extraerlo. Igualmente, en la ecuación cinco $Lncostos_{it}$, $LnProducción_{it}$ y $LnReservas_{it}$ representan los logaritmos naturales para las variables de estudio; de cada firma (i) en el tiempo (t).

B. Ecuaciones de Bellman y programación dinámica discreta⁸

Una vez especificada la función de costos y de acuerdo con Pindyck (1978), Chapman (1987) y Chappel & Dury (1994), se espera que cuando disminuyen las reservas disponibles del mineral en el departamento, sus costos de extracción aumenten; también, una relación positiva anualmente entre el nivel de producción de carbón y los costos de su extracción.

⁸ Para más detalles de la metodología véase Miranda (2002).

Adicionalmente, con la información de los precios internacionales del recurso durante los cinco años de estudio (t), puede plantearse la función de beneficios (π_t) para las siete empresas analizadas (i), de la siguiente manera (véase ecuación 6 y 7):

$$\pi_{it} = p_t \text{producción}_{it} - C_{it}(\text{reservas}_{it}, \text{producción}_{it}) \quad (6)$$

$$\text{Max}_{\text{producción}_{it}} \sum_{t=1}^{40} \delta^t \{p_t \text{producción}_{it} - C_{it}(\text{reservas}_{it}, \text{producción}_{it})\} \text{ s.a } \text{reservas}_{it+1} = \text{reservas}_{it} - \text{producción}_{it} \quad (7)$$

De lo anterior, se tiene la descripción necesaria para articular un modelo de decisión tipo Markov de estado discreto⁹, en estos procesos, “la distribución de probabilidad del estado en el siguiente periodo, condicional en la información disponible actualmente, depende sólo del estado actual y de la acción actual del agente”, Maldonado (2008). Asimismo, los agentes mineros buscarán extender las decisiones tomadas en cada periodo durante el horizonte de análisis; que los lleven a maximizar el valor presente de los beneficios descontando por el factor $\delta = \frac{1}{1+\rho}$.

$$V_t(t) = \text{Max}_{\text{producción}_{it}} \{p_t \text{producción}_{it} - C_{it}(\text{reservas}_{it}, \text{producción}_{it}) + \delta V_{t+1}(\text{reservas}_{it} - \text{producción}_{it})\} \quad (8)$$

Este modelo puede ser analizado mediante la programación dinámica propuesta por Bellman (1957), representado en la ecuación siete. Permitiendo así, estimar la senda óptima de extracción del recurso minero (carbón); por lo tanto, la función de valor óptimo ($V_t(t)$), a solucionar con programación dinámica, a través del horizonte de análisis permitirá equilibrar las recompensas actuales con las esperadas por las compañías carboníferas que operan el centro del Cesar.

En la ecuación ocho, p_t es el precio del carbón en el periodo t ; en pesos colombianos del 2007, producción_{it} la extracción o producción de carbón en millones de toneladas para la firma i en el momento t , δ el factor de descuento, $C_{it}(\text{reservas}_{it}, \text{producción}_{it})$ la función de costos de la empresa i en términos de su cantidad extraída del recurso y nivel de reservas para el año t . El horizonte de análisis serán 40 años, porque este es el tiempo disponible de los empresarios para extraer el carbón una vez obtienen los permisos necesarios ante las autoridades legales que les acredita el contrato de concesión minero.

De este modo, se simulará la función de recompensa para los 40 años con el fin de obtener las decisiones de política óptimas que los empresarios del carbón deberán tomar año a año para maximizar sus beneficios futuros descontados. Por esta razón, se emplea recursión hacia atrás como algoritmo de solución a la programación dinámica planteada en la ecuación de Bellman de la expresión ocho; donde se resuelve un problema estático para cada periodo. Es decir, a partir de las soluciones para $V_{40}(40)$ y producción_{i40} es posible calcular $V_{39}(39)$ y producción_{i39} , repitiendo el mismo procedimiento consecutivamente. “Dadas las condiciones del modelo se obtendrán al menos una secuencia de políticas óptimas después de exactamente T iteraciones”¹⁰.

⁹ Dado que la variable de estado (reservas de carbón) tiene un espacio y número de elemento finitos, Maldonado, J. (2008, 152). En este caso, se refiere a un horizonte finito; año a año durante los 40 años de análisis.

¹⁰ Maldonado, J. (2008, 162).

Es así, como se obtendrá el nivel óptimo de extracción actual de carbón para el centro del departamento del Cesar, que al contrastarlo con la senda sostenible de extracción (donde son internalizados el valor monetario de las externalidades ambientales y sociales generadas por la actividad) permitirá conocer si la presión impuesta por la actividad minera sobre el carbón es realizada de manera sostenible o por el contrario lo que se busca es agotar el recurso en el menor tiempo posible de acuerdo a los posibles bajos costos de producción y el buen comportamiento de los precios internacionales del mineral; y con estos resultados, brindar recomendaciones de política.

IV. Proceso de recolección de los datos

En esta sección se detalla la recolección de información secundaria, empleada para estimar las relaciones de costos de producción y ecuaciones de Bellman expuestas en la metodología de analítica. Los datos sobre costos de producción, extracción y reservas de carbón se obtuvieron para las siete empresas carboníferas más importantes, entre las que se destacan Drummond, Norcarbon, Consorcio Minero Unido, Prodeco Carboandes, Carbones la Jagua y Compañía de Carbones del Cesar.

Esta información fue proporcionada por Benchmark (base de datos asociadas a la Facultad de Administración de Empresas de la Universidad de los Andes), donde a partir de los resultados de pérdidas y ganancias para cada empresa, se obtuvo los costos totales por año de producción entre 2004 y 2008. Tomados como la suma de los costos de ventas, los gastos operacionales compuestos por los de administración y los gastos en ventas, gastos no operacionales y la depreciación.

Estos gastos anuales, corresponden a un nivel de producción por empresas, ésta información se tomó del informe Distritos Mineros: Exportaciones e infraestructura de transporte elaborado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Es importante mencionar que la producción de Drummond LTDA en los cuatro años de análisis corresponde al 72% de la producción del departamento. Sin embargo, en promedio cada una de las siete empresas mencionadas produce 4'151.199 de toneladas anuales que les genera unos costos de producción anuales de 576.026 millones de pesos aproximadamente.

El precio de mercado para el recurso, se tomó del boletín estadístico de minas y energía 2003-2008, elaborado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). En este periodo, en promedio una tonelada de carbón se vendió a 194.887 pesos. El nivel de reservas de carbón en el departamento, se obtuvo del anuario estadístico El Cesar en cifras, publicada por la Gobernación de la región; en promedio, la zona cuenta con 329 millones de toneladas de carbón para ser extraídas (véase cuadro 1). Los precios de mercado reportados y costos totales de producción por tonelada se deflactaron a precios constantes del 2007.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas para la información primaria.

Estadísticas Descriptivas					
Variable	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Número de Observaciones
Producción	4'151.199	7'296.359	0	2,29E+07	35
Costos	576.026,1	919.659,2	6.195,332	3'866.424	35
Precio	194.886,8	14.934,36	174.630,5	216.254,5	35
Reservas	3,29E+08	5,90E+08	0	2,00E+09	35

Fuente: cálculo de los autores.

El factor de descuento (δ) equivale a 94%, con el cual fueron descontados los ingresos futuros a partir del promedio para la tasa Libor (ρ) de 6,38%¹¹ efectiva anual entre 2004 y 2008. A partir de un trabajo en el área de estudio, elaborado por la Universidad de los Andes en convenio con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), se obtuvieron los costos de las externalidades sociales, económicas y ambientales generadas por la actividad carbonífera en el centro del Cesar, aproximadamente 14.712 pesos por tonelada de carbón extraída; equivalente a 264'605.317 de pesos, por las 17.896 toneladas del recurso explotadas entre 1997 y 2009.

De este modo, se cuenta con la información y datos necesarios para evidenciar, mediante estimaciones de datos panel con efectos aleatorios y ecuaciones de Bellman con programación dinámica discreta empleando recursión hacia atrás como algoritmo de solución, el componente teórico expuesto en la asignación inter-temporal eficiente de recursos naturales no renovables. Por consiguiente, la ecuación de máximo valor de Bellman permitirá encontrar la senda óptima de extracción de carbón para las siete empresas carboníferas más significativas en el centro del departamento del Cesar, Colombia. A continuación, son expuestas las estimaciones del presente trabajo.

V. Resultados obtenidos mediante la aplicación de datos panel con efectos aleatorios, ecuaciones de Bellman y programación dinámica discreta

Esta sección presenta los resultados obtenidos y su respectivo análisis de los modelos y funciones especificadas en la metodología analítica. Inicialmente fue estimado la función de costos de extracción carbonífera para las siete principales empresas de carbón en la zona; mediante un modelo de datos panel con efectos aleatorios (véase prueba de Hausman en el Anexo I), los resultados se presentan en el cuadro 2.

$$costos = exponencial^{16.4560} \frac{Producción^{0.9952}}{Reservas^{1.0040}} \quad (9)$$

¹¹ $\delta = \frac{1}{1+0,0638}$

Cuadro 2. Estimación de la función de Costos.

Variable dependiente	Logaritmo natural de los costos totales	
Variables independientes	Coeficientes	
Logaritmo Natural Reservas	-1,004023	***
Logaritmos Natural de la Producción anual	0,9951993	***
Intercepto	16,45851	***
No. de observaciones	31	
Prob > chi2	0,0000	
Variable estadísticamente significativa al (*) 10%, (**) 5% y (***) 1%, respectivamente; estimaciones realizadas en Stata.		

Fuente: cálculo de los autores.

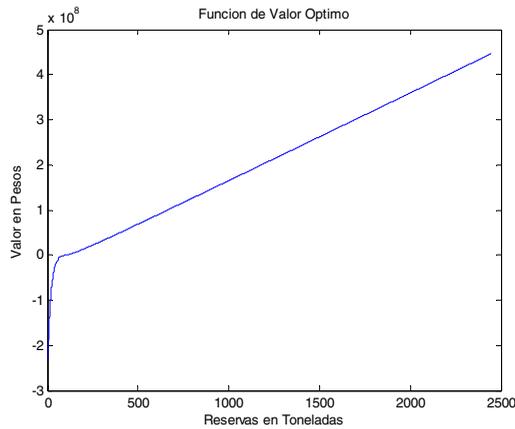
De acuerdo con los resultados, en el cuadro dos, a medida que aumenta la producción de carbón en uno por ciento los costos de extracción crecen en 0,9952%; dejando constantes las demás variables (*Ceteris Paribus*). Por un incremento de uno por ciento en los niveles de las reservas en el centro del Cesar los costos de producción disminuyen en 1,0040%; *Ceteris Paribus* el logaritmo natural de extracción. El intercepto del modelo representa los costos fijos de producción del recurso para la empresas estudiadas entre el 2004 y 2008. De este modo, la función de costos en la función de valor óptimo está representada en la ecuación nueve.

A. Ecuaciones de Bellman y programación dinámica discreta para la senda de extracción sin incluir el costo de las externalidades

La explotación carbonífera en gran escala a cielo abierto, genera consecuencias a nivel social, económico y ambiental traduciéndose en costos que la sociedad debe asumir. Por consiguiente, el gráfico uno exhibe los resultados de la función de valor óptimo de Bellman (véase en el Anexo II la programación en Matlab), en la ecuación 10, sobre los 40 años de análisis para el sector carbonífero en el centro del departamento; sin incluir el valor de las externalidades ambientales, sociales y económicas, concebidas por la actividad, en la función de costos de producción de la ecuación nueve.

$$V_t(t) = \text{Max}_{\text{producción}_{it}} \left\{ p_t \text{producción}_{it} - \text{exponencial}^{16.456} \frac{\text{Producción}_{it}^{0.9952}}{\text{Reservas}_{it}^{1.0040}} + \delta V_{t+1}(\text{reservas}_{it} - \text{producción}_{it}) \right\} \quad (10)$$

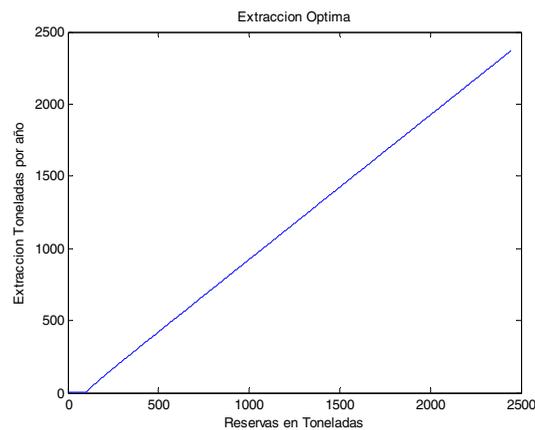
Gráfica 1. Función de valor óptimo $V_t(t)$.



Fuente: cálculo de los autores.

En la gráfica uno, se observa que aumentos en los niveles de reservas carboníferas incrementan la función de valor ($V_t(t)$) en millones de pesos, para el centro del Cesar; debido, a la relación inversa entre la cantidad encontrada del mineral y sus costos de extracción, de acuerdo al signo negativo que acompaña a 1,0040 en el modelo del cuadro dos. Esto, permite incrementar representativamente los beneficios de las compañías establecidas en la región, como lo muestra la pendiente positiva en la gráfica uno a lo largo del horizonte de análisis.

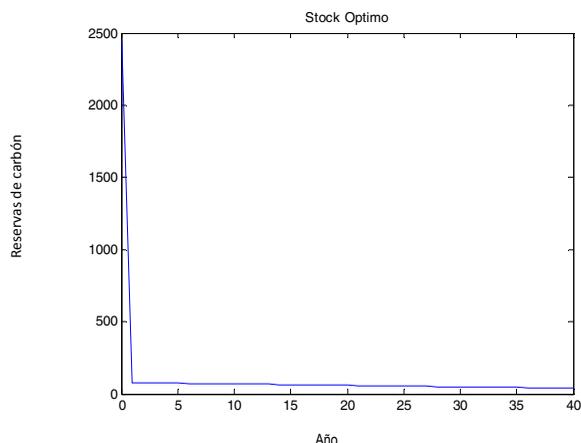
Gráfica 2. Nivel de Extracción óptimo para las firmas.



Fuente: cálculo de los autores

Igualmente, la gráfica dos muestra el monto óptimo extraído de carbón, en toneladas, por cada firma con el fin de maximizar la función valor ($V_t(t)$) o sus beneficios económicos derivados de la actividad; tomando como referencia, la variable de estado inicial (reservas del mineral), los 2.448 millones de toneladas con las que cuenta el departamento al inicio del periodo de estudio. Lo anterior, como consecuencia del amplio nivel de reservas que conlleva a bajos costos de extracción y gracias a los favorables precios de mercado enfrentados por la industria en su momento. Ante esto, la mejor decisión que pueden tomar las firmas es extraer todas las reservas disponibles del recurso en el menor tiempo posible, antes de culminar la concesión; como puede observarse con la pendiente negativa de la gráfica tres.

Gráfica 3. Cantidad óptima de reservas del mineral.



Fuente: cálculo de los autores.

Adicionalmente la gráfica tres, en otras palabras, muestra que las firmas pretenden agotar las reservas antes de finalizar los 40 años de la concesión; de acuerdo con las condiciones de los costos y precios actuales. Este comportamiento es normal en cualquier privado cuyo objetivo es maximizar sus ganancias; no obstante, esta conducta puede conducir a una reducción en la oferta de bienes y servicios ambientales, otras actividades económicas (agrícola y ganadera), estatus de salud humana y presiones sociales; porque la explotación de carbón a cielo abierto incide y genera directa e indirectamente las externalidades señaladas.

B. Ecuaciones de Bellman y programación dinámica discreta para la senda de extracción incluyendo los costos de las externalidades ambientales, económica y sociales

Una vez estimado el valor económico total (VET) de las externalidades ocasionadas por la actividad carbonífera a cielo abierto, el VET de 14.712 pesos por tonelada es incluido en la función de costos de producción para la industria¹². Representado el gasto en que debieron incurrir previamente las compañías antes de ejecutar los proyectos, con esta nueva cifra los costos fijos se incrementan y los nuevos resultados de la función de costos de producción carbonífera son expresados en la ecuación 11.

$$costos = exponencial^{34.8392 + \frac{Producción^{0.9952}}{Reservas^{1.0040}}} \quad (11)$$

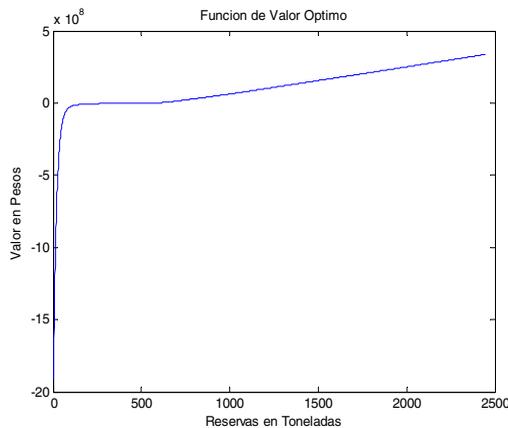
Por consiguiente, el gráfico cuatro exhibe los resultados de la función de valor óptimo de Bellman (véase en el Anexo III la programación en Matlab), en la ecuación 12, sobre los 40

¹² Véase más detalles en Valoración económica ambiental en la zona carbonífera del Cesar que comprende los municipios de Becerril, Agustín Codazzi, Chiriguana, El Paso y La Jagua de Ibirico, Convenio de cooperación Científica entre el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) y la Universidad de Los Andes (2010).

años de análisis para el sector carbonífero en el centro del departamento; incluyendo el valor de las externalidades ambientales, sociales y económicas, concebidas por la actividad.

$$V_t(t) = \text{Max}_{\text{producción}_{it}} \left\{ p_t \text{producción}_{it} - \text{exponencial}^{34.8392} \frac{\text{Producción}_{it}^{0.9952}}{\text{Reservas}_{it}^{1.0040}} + \delta V_{t+1} (\text{reservas}_{it} - \text{producción}_{it}) \right\} \quad (12)$$

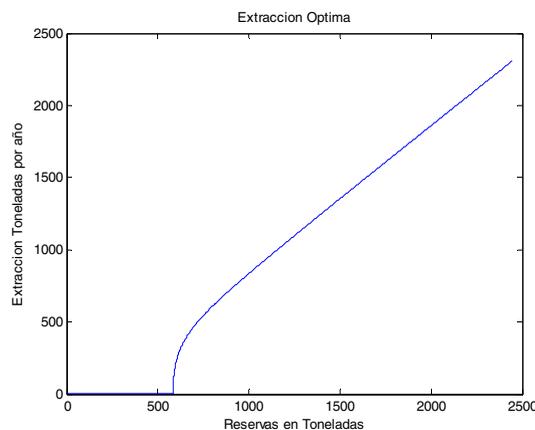
Gráfica 4. Función de valor óptimo $V_t(t)$.



Fuente: cálculo de los autores.

Igualmente, la gráfica cuatro muestra que aumentos en los niveles de reservas carboníferas incrementan la función de valor ($V_t(t)$) en millones de pesos, sin embargo la tendencia cambia sustancialmente respecto a la gráfica uno. Las firmas incurren en pérdidas económicas por debajo de 100 toneladas en el inventario del mineral, por encima de este valor y hasta las 2.500 toneladas sus beneficios comienzan a ser positivos a medida que se incrementan las reservas de carbón. No obstante, la pendiente en la gráfica cuatro es inferior a la inicial en la gráfica uno; dado que las ganancias del sector decrecen sustancialmente cuando es incluido el VET en los costos de producción, pero el negocio continúa siendo económicamente viable o rentable bajo el criterio de extracción sostenible.

Gráfica 5. Nivel de Extracción óptimo para las firmas.

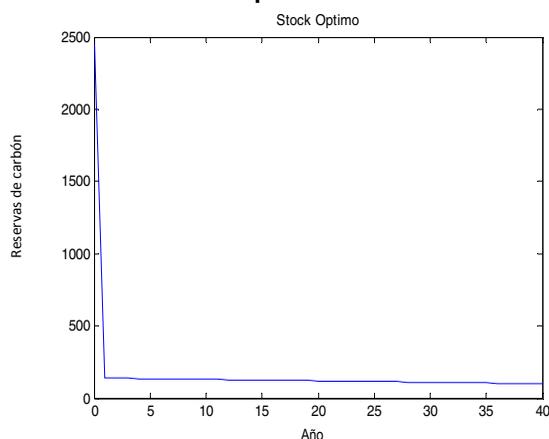


Fuente: cálculo de los autores.

Continuando con el análisis, la gráfica cinco muestra el monto óptimo extraído de carbón, en toneladas, por cada firma con el fin de maximizar la función valor ($V_t(t)$) o sus beneficios económicos derivados de la actividad; tomando como referencia, la variable de estado inicial (reservas del mineral), los 2.448 millones de toneladas con las que cuenta el departamento al inicio del periodo de estudio y los nuevos costos de producción incluyendo el VET.

De igual forma, la pendiente varía de acuerdo con la gráfica dos, exponiendo que la extracción óptima para las compañías es igual cero por debajo de 500 toneladas en reservas de carbón. Ante esto, la mejor decisión que pueden tomar las firmas es extraer las reservas disponibles por encima de 500 toneladas del recurso; en un tiempo más prolongado sin agotarlo antes de culminar la concesión. Como puede observarse con la pendiente negativa de la gráfica seis, que se extiende a más de 40 años preservando mayor cantidad del mineral durante el cierre. Diferente a la gráfica tres que lo óptimo es agotar el mineral a sus niveles más bajos antes de la clausura.

Gráfica 6. Cantidad óptima de reservas del mineral.



Fuente: cálculo de los autores.

Estos resultados, muestran como pueden la firmas realizar una producción de carbón a cielo abierto sostenible cuando son incluidos previamente el valor monetario de las externalidades generadas por la actividad en la zona de estudio. Lo anterior, evidencia que deben ser reforzados los estudios de impacto y planes de manejo ambiental con un análisis económico ambiental que ayude a determinar previamente la viabilidad del proyecto; y obtener así, los verdaderos valores económicos de las externalidades para realizar medidas de compensación, mitigación y restauración de los bienes y servicios ambientales, actividades económicas y degradaciones sociales potencialmente afectados por un proyecto carbonífero en una determinada zona del país.

Asimismo, la evidencia muestra que actualmente las firmas carboníferas perciben ganancias sustanciales dado los bajos costos de producción y buen comportamiento del precio internacional del carbón durante el 2004 a 2008, que los incentiva a agotar el mineral en el menor tiempo posible de forma insostenible, y responsabilizar a futuras generaciones de los problemas ocasionados en la zona.

Finalmente, en las ecuaciones de Bellman expuestas el ingreso para las empresas es equivalente a $p_t \text{producción}_{it}$ reflejando así el mayor número de empleos, regalías e ingresos

fiscales al Gobierno generados por el sector, debido a que los mismos dependen de estos beneficios; sin embargo la degradación ambiental y mayores niveles de pobreza en la población pueden llegar a superar los beneficios percibidos, incurriendo en la llamada maldición de los recursos naturales en el estudio de la economía de los recursos naturales, por la forma no sostenible en que empresas privadas y públicas explotan los recursos renovables y no renovables.

VI. Conclusiones y recomendaciones de política

Partiendo del propósito principal, revisión literaria y resultados obtenidos en la sección cinco. Finalmente se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones de política, a partir de la evidencia mediante datos panel con efectos aleatorios y ecuaciones de Bellman bajo programación dinámica discreta; para la información secundaria empleada de siete firmas carboníferas durante 2004 a 2008.

A. Conclusiones

Para el análisis estadístico descriptivo, se observó consistencia en los datos obtenidos de las siete empresas (Drummond, Norcarbon, Consorcio Minero Unido, Prodeco Carboandes, Carbones la Jagua y Compañía de Carbones del Cesar, otra). Sin encontrar comportamientos atípicos sobre producción, costos, precios y reservas de carbón en la zona de estudio. Esta información fue proporcionada por Benchmark (base de datos asociadas a la Facultad de Administración de Empresas de la Universidad de los Andes), donde a partir de los resultados de pérdidas y ganancias para cada empresa, se obtuvo los costos totales por año de producción entre 2004 y 2008. Los precios de mercado reportados y costos totales de producción por tonelada se deflactaron a precios constantes del 2007.

En este periodo, en promedio una tonelada de carbón se vendió a 194.887 pesos. El nivel de reservas de carbón en el departamento ascendió a 329 millones de toneladas del mineral. El factor de descuento (δ) equivale a 94%, con el cual fueron descontados los ingresos futuros a partir del promedio para la tasa Libor (ρ) de 6,38% efectiva anual entre 2004 y 2008. A partir de un trabajo en el área de estudio, elaborado por la Universidad de los Andes en convenio con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), se obtuvieron los costos de las externalidades sociales, económicas y ambientales generadas por la actividad carbonífera en el centro del Cesar, aproximadamente 14.712 pesos por tonelada de carbón extraída; equivalente a 264'605.317 de pesos, por las 17.896 toneladas del recurso explotadas entre 1997 y 2009.

Después de obtener consistencia estadística en la información, resaltamos los resultados de las ecuaciones de Bellman bajo programación dinámica discreta. Así, en el cuadro dos, a medida que aumenta la producción de carbón en uno por ciento los costos de extracción crecen en 0,9952%; dejando constantes las demás variables (*Ceteris Paribus*). Por un incremento de uno por ciento en los niveles de las reservas en el centro del Cesar los costos de producción disminuyen en 1,0040%; *Ceteris Paribus* el logaritmo natural de extracción. El intercepto del modelo representa los costos fijos de producción del recurso (13'336.297 peso), sin incluir el valor de las externalidades, para la empresas estudiadas entre el 2004 y 2008. Circunscribiendo el rubro monetario del valor económico total (VET) los costos fijos anuales para cada firma asciende a 115'319.126 pesos.

En la gráfica uno, se observó que aumentos en los niveles de reservas carboníferas incrementan la función de valor ($V_t(t)$) en millones de pesos, para el centro del Cesar; debido, a la relación inversa entre la cantidad encontrada del mineral y sus costos de extracción. Esto, permite incrementar representativamente los beneficios de las compañías establecidas en la región, como lo muestra la pendiente positiva en la gráfica uno a lo largo del horizonte de análisis.

La gráfica dos muestra el monto óptimo extraído de carbón, en toneladas, por cada firma con el fin de maximizar la función valor ($V_t(t)$) o sus beneficios económicos derivados de la actividad; tomando como referencia, la variable de estado inicial (reservas del mineral), los 2.448 millones de toneladas con las que cuenta el departamento al inicio del periodo de estudio. Lo anterior, como consecuencia del amplio nivel de reservas que conlleva a bajos costos de extracción y gracias a los favorables precios de mercado enfrentados por la industria en su momento. Ante esto, la mejor decisión que pueden tomar las firmas es extraer todas las reservas disponibles del recurso en el menor tiempo posible, antes de culminar la concesión.

En la gráfica cuatro se evidenció que aumentos en los niveles de reservas carboníferas incrementan la función de valor ($V_t(t)$) en millones de pesos, sin embargo la tendencia cambia sustancialmente respecto a la gráfica uno. Las firmas incurren en pérdidas económicas por debajo de 100 toneladas en el inventario del mineral, por encima de este valor y hasta las 2.500 toneladas sus beneficios comienzan a ser positivos a medida que se incrementan las reservas de carbón. No obstante, la pendiente en la gráfica cuatro es inferior a la inicial en la gráfica uno; dado que las ganancias del sector decrecen sustancialmente cuando es incluido el VET en los costos de producción, pero el negocio continúa siendo económicamente viable o rentable bajo el criterio de extracción sostenible.

En la gráfica cinco fue señalado el monto óptimo extraído de carbón, en toneladas, por cada firma con el fin de maximizar la función valor ($V_t(t)$) o sus beneficios económicos derivados de la actividad; tomando como referencia, la variable de estado inicial (reservas del mineral), los 2.448 millones de toneladas con las que cuenta el departamento al inicio del periodo de estudio y los nuevos costos de producción incluyendo el VET. Donde, la pendiente varía de acuerdo con la gráfica dos, exponiendo que la extracción óptima para las compañías es igual cero por debajo de 500 toneladas en reservas de carbón.

Ante esto, la mejor decisión que pueden tomar las firmas es extraer las reservas disponibles por encima de 500 toneladas del recurso; en un tiempo más prolongado sin agotarlo antes de culminar la concesión. Como puede observarse en la pendiente negativa de la gráfica seis, que se extiende a más de 40 años preservando mayor cantidad del mineral durante el cierre. Diferente a la gráfica tres que lo óptimo es agotar el mineral a sus niveles más bajos antes de la clausura.

Estos resultados, muestran como pueden la firmas realizar una producción de carbón a cielo abierto sostenible cuando son incluidos previamente el valor monetario de las externalidades generadas por la actividad en la zona de estudio. Lo anterior, evidencia que deben ser reforzados los estudios de impacto y planes de manejo ambiental con un análisis económico ambiental que ayude a determinar previamente la viabilidad del proyecto; y obtener así, los verdaderos valores económicos de las externalidades para realizar medidas de compensación, mitigación y restauración de los bienes y servicios ambientales, actividades económicas y degradaciones sociales potencialmente afectados por un proyecto carbonífero en una determinada zona del país.

Asimismo, la evidencia muestra que actualmente las firmas carboníferas perciben ganancias sustanciales dado los bajos costos de producción y buen comportamiento del precio internacional del carbón durante el 2004 a 2008, que los incentiva a agotar el mineral en el menor tiempo posible de forma insostenible, y responsabilizar a futuras generaciones de los problemas ocasionados en la zona.

Finalmente, en las ecuaciones de Bellman expuestas el ingreso para las empresas es equivalente a $p_t \text{producción}_{it}$ reflejando así el mayor número de empleos, regalías e ingresos fiscales al Gobierno generados por el sector, debido a que los mismos dependen de estos beneficios; sin embargo la degradación ambiental y mayores niveles de pobreza en la población pueden llegar a superar los beneficios percibidos, incurriendo en la conocida o llamada maldición de los recursos naturales en el estudio de la economía de los recursos naturales, por la forma no sostenible en que empresas privadas y públicas explotan los recursos renovables y no renovables.

B. Recomendaciones de política

A partir de las conclusiones anteriores y resultados obtenidos en el aparte cinco, se presentan algunas indicaciones que potencialmente se puedan tener en cuenta en el fortalecimiento de los estudios y planes de manejo ambiental; que actualmente presentan las empresas mineras a las autoridades competentes. Para esto, inicialmente deben realizarse evaluaciones económicas de los proyectos carboníferos ex antes a su ejecución.

De esta forma, en los análisis costo beneficio de los estudios ex antes debe incluirse el valor económico total de las externalidades más relevantes, que potencialmente puede generar el desarrollo de la actividad en una determinada región de Colombia. Con esta información puede evidenciarse la viabilidad económica o no del proyecto, igualmente ayuda a contar con los verdaderos valores monetarios para no sobrestimar o subestimar pagos por medidas de compensación, mitigación, restauración y conservación de los recursos ambientales, actividades económicas e implicaciones sociales involucrados.

Lo anterior, ayuda a lograr un desarrollo sostenible de la actividad con el fin de evitar que generaciones futuras, en las zonas afectadas, deban ser responsables de daños irreversibles sobre los bienes y servicios ambientales ocasionado antes, durante y después de ejecutar un proyecto carbonífero. Impidiendo pasivos ambientales y agotamiento total de los recursos renovables o renovables explotados, en otras palabras promoviendo un desarrollo sostenible.

Aprovechando las bondades de los resultados, obtenidos con las ecuaciones de Bellman, se pueden buscar mecanismos que afecten significativamente los costos de producción; con el fin de corregir comportamientos insostenibles o presión sobre un determinado recurso, por parte de las firmas encargadas de ejecutar las actividades. Promoviendo de esta forma el desarrollo sostenible y evitando la llamada maldición de los recursos naturales en el estudio de la economía de los recursos naturales.

Referencias

- Bellman. (1957). Dynamic programming. Princeton, N.Y.: Princeton University press.
- Bonet, J. (2007). Minería y Desarrollo económico en el Cesar. Cartagena: Banco de la Republica (CEER).
- Chapman, D. (1987). Computation Techniques for intertemporal allocation of natural resources. American journal Agricultural Economics , 134-142.

- Chappel, D., & Dury, K. (1994). On the Optimal Depletion of a Nonrenewable Natural Resource Under Conditions of Increasing. *SIAM review* , 102-106.
- Chiang, A. (1992). *Elements of dynamic optimization* . New York: McGrawhill.
- Conrad, J. (1999). *Resource Economics*. New York: Cambridge University Press.
- Valoración económica ambiental en la zona carbonífera del Cesar que comprende los municipios de Becerril, Agustín Codazzi, Chiriguana, El Paso y La Jagua de Ibirico, Convenio de cooperación Científica entre el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) y la Universidad de Los Andes (2010).
- Dasgupta, P., & Heal, G. (1974). The optimal Depletion of exhaustible resources. *The review of economic studies* , 3-28.
- Elard, F., & León, D. (2006). La importación del carbón en el desarrollo. *Revista del Instituto de investigaciones FIGMMG* , 9 (18), 91 - 97.
- Energy information administration. (2009). *Coal supply disposition and prices*.
- Gobernación del Cesar. (2008). *Gestión de la Secretaría de Minas; Cifras de la Minería*.
- Greene, William. (2008), *Análisis Econométrico*, Quinta edición, Madrid: Prentice Hall.
- Hotelling, H. (1931). The Economics of exhaustible resources. *Journal of political economy* .
- Hoz, J. V. (1998). *La economía del Carbón en el Caribe Colombiano*. Cartagena: Banco De la Republica (CEER).
- INGEOMINAS, Subdirección del recurso del subsuelo. (2001). *Texto conciliado del nuevo código de minas*. Bogotá.
- Long, V. *the theory of the mining firm and the optimal extraction of a non-renewable resource*. Australia National university.
- Maldonado, J. (2008). *Economía de recursos naturales: aplicación de la economía computacional a la solución de problemas dinámicos*. Bogotá: Colección Cede 50 años.
- Ministerio de Minas y energía. (2005). *Distritos Mineros: Exportaciones e infraestructura de transporte*. Bogotá.
- Miranda, M., & Fackler, P. (2002). *Applied computational economics and finance*. Massachusetts: MIT Press.
- Munasingghe, M. (2004). *Environmental Macroeconomics - Basic Principles*. Sri Lanka: International Society for Ecological Economics.
- Pindick, R. (1978). The optimal exploration and production of nonrenewable resources. *Journal of political economy* , 841-861.
- Renzoni, G. (2006). *Tareas para el desarrollo del carbón en Colombia*. Bogotá: Ministerio de Minas y energía, INGEOMINAS.
- Rosales, R. Perdomo, J.A., Morales, C. y Urrego, A. (2010), *Fundamentos de econometría intermedia: teoría y aplicaciones*. CEDE (Centro de Estudios Sobre Desarrollo Económico), Facultad de Economía, Universidad de los Andes.
- Unidad de Planeación Minero energética. (2007). *Plan Nacional de Desarrollo Minero 2007- 2010: gestión pública para propiciar la actividad minera*. Bogotá: Editorial Scripto Ltda.
- Unidad de Planeación Minero Energético. (2002). *Plan Nacional de desarrollo Minero 2002-2006*. Bogotá.
- Yang, Y. (2007). *Coal Mining and Environmental Health in China*.
- Yushi, M., Hong, S., & Fuqiang, Y. (2007). *The true cost of Coal*. China.

Anexos

Anexo I. Resultados en Stata de la estimación de los modelos panel con efectos aleatorios, prueba de Hausman, para la función de costos incluyendo y sin contener el gasto de las externalidades

Regresión función de costos con efectos aleatorios sin incluir el valor de las externalidades.

```
. xtreg lncostos lny lnr, re

Random-effects GLS regression              Number of obs   =        31
Group variable: mina                      Number of groups =         7

R-sq:  within = 0.4616                    Obs per group:  min =         4
        between = 0.0063                  avg           =         4.4
        overall = 0.0007                  max           =         5

Random effects u_i ~ Gaussian              Wald chi2(2)    =       11.83
corr(u_i, X) = 0 (assumed)                 Prob > chi2     =        0.0027
```

lncostos	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
lny	.9951993	.2947874	3.38	0.001	.4174266	1.572972
lnr	-1.004023	.3166319	-3.17	0.002	-1.62461	-.3834357
_cons	16.45851	2.038942	8.07	0.000	12.46226	20.45477
sigma_u	.97611776					
sigma_e	.14850553					
rho	.97737737	(fraction of variance due to u_i)				

Regresión función de costos con efectos aleatorios incluyendo el valor de las externalidades.

```
. xtreg lncostos2 lny lnr, re

Random-effects GLS regression              Number of obs   =        31
Group variable: mina                      Number of groups =         7

R-sq:  within = 0.4616                    Obs per group:  min =         4
        between = 0.0063                  avg           =         4.4
        overall = 0.0007                  max           =         5

Random effects u_i ~ Gaussian              Wald chi2(2)    =       11.83
corr(u_i, X) = 0 (assumed)                 Prob > chi2     =        0.0027
```

lncostos2	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
lny	.9951997	.2947878	3.38	0.001	.4174263	1.572973
lnr	-1.004023	.3166324	-3.17	0.002	-1.624611	-.3834348
_cons	35.85226	2.038945	17.58	0.000	31.856	39.84851
sigma_u	.97611764					
sigma_e	.14850575					
rho	.9773773	(fraction of variance due to u_i)				

Prueba de Hausman para comparar estimadores de efectos fijos contra efectos aleatorios.

```
. hausman betas

----- Coefficients -----
      |      (b)      (B)      (b-B)      sqrt(diag(V_b-V_B))
      |      betas      .      Difference      S.E.
-----+-----
      |      1.030497   .9951993   .0352973   0.0222618
lny  |
      |      -1.07838  -1.004023  -.0743575   0.0206916
lnr  |
-----+-----

      b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg
      B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg
Test:  Ho: difference in coefficients not systematic
```

$$\begin{aligned} \text{chi2}(2) &= (b-B)' [(V_b-V_B)^{-1}] (b-B) \\ &= 0.94 \end{aligned}$$

Estadísticas descriptivas.

```
. xtsum y costos r
```

Variable		Mean	Std. Dev.	Min	Max	Observations
y	overall	4151199	7296359	0	2.29e+07	N = 35
	between		7716816	544033.7	2.16e+07	n = 7
	within		832707.5	2080231	6165659	T = 5
costos	overall	576026.1	919659.2	6195.332	3866424	N = 35
	between		939952.8	10751.83	2566351	n = 7
	within		257301.9	94836.08	1876099	T = 5
r	overall	3.29e+08	5.90e+08	0	2.00e+09	N = 35
	between		6.20e+08	4.46e+07	1.73e+09	n = 7
	within		8.93e+07	7.95e+07	5.99e+08	T = 5

Anexo II. Programación en Matlab de la senda de extracción para los empresarios sin el costo de las externalidades

Se introducen los parámetros del modelo.

```
%Parámetros del Modelos
precio=194887; %precio mineral
sbar=2448; %stock
beta=0.9951993;
alfa=1.004023;
delta=0.94; %factor de descuento
gama=14055298;
```

Se especifican los espacios de la variable de acción, de estado y el tamaño de los vectores.

```
S=(1:sbar)'; %variables de estado posibles
X=(1:sbar)'; %extracciones posibles
n=length(S); %número de estados posibles
m=length(X); %número de acciones posibles
```

Se construye la matriz de recompensa.

```
f=zeros(n,m);
for i=1:n
    for j=1:m
        if X(j)<=S(i)
            f(i,j)=(precio*X(j))-(gama*X(j).^beta/S(i).^alfa);
        else f(i,j)=-inf;
        end
    end
end
end
```

Se construye la matriz de transición.

```
g=zeros(n,m);
for i=1:n
    for j=1:n
        snext=S(i)-X(j);
        g(i,j)=getindex(snext,S);
    end
end
end
```

Empaquetamiento del Modelo.

```
clear model
model.reward =f;
model.transfunc =g;
model.discount =delta;
```

Resolución del Modelo.

```
[v,x,pstar]=ddpsolve(model)
%simulacion dinamica
sincial=sbar;
nper=40;
spath=ddpsimul(pstar,sincial,nper);
```

Graficando los resultados.

```
figure (1); plot(S,v);
title('Función de Valor Optimo')
xlabel('Reservas en Toneladas')
ylabel('Valor en Pesos')
figure(2); plot(S,x);
title('Extracción Optima')
xlabel('Reservas en Toneladas')
ylabel('Extracción Toneladas por año')
figure (3); plot(0:nper,S(spath));
title('Stock Optimo')
xpath=-diff(spath);
figure (4);plot(0:(nper-1),xpath,'g:')
title('Diferencia de stock')
```