

ES POSIBLE IMPLEMENTAR UN MODELO DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO QUE PERMITA LOGRAR UNA POLÍTICA ENERGÉTICA SOSTENIBLE?

Ponencia Presentada al Coloquio Energía, desarrollo e instituciones en América Latina
México Noviembre 4 – 7 2003

Sergio Hernando Lopera Castro
Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia
shlopera@perseus.unalmed.edu.co

Resumen

El objetivo de esta ponencia es mostrar que es posible implementar una explotación de petróleo que sea consecuente con una política energética sostenible¹ dado que en el proceso de extracción de petróleo, tal y como se hace hoy, se interpreta la sostenibilidad sólo desde la perspectiva de protección del medio ambiente. Sin embargo, el agotamiento de reservas no es tomado en cuenta. Esto es debido a que según la economía liberal el mercado traerá el desarrollo tecnológico necesario para la creación de sustitutos energéticos. Sin embargo, la evidencia empírica muestra que el mercado por si solo no garantiza un uso racional de los recursos agotables.

Nosotros mostramos que una política energética sostenible puede ser lograda si parte de la renta petrolera se invierte en: La sustitución de reservas de petróleo agotadas por una fuente energética renovable, el pago de los impactos causados sobre la atmósfera por gases producto de la combustión de derivados del petróleo, el pago de otros impactos ambientales diferentes de la contaminación por emisión de gases, el pago de la protección del capital natural crítico y el pago de los impactos sobre el bienestar humano.

Para lograr esto proponemos un indicador de sostenibilidad para el caso de la producción de petróleo en un yacimiento. Este indicador se inscribe en la tradición Neoclásica que propone una gestión de los recursos no renovables según los preceptos de la llamada ley de Hartwitch. Este indicador calcula la sostenibilidad como la diferencia entre el ahorro y las depreciaciones de los capitales manufacturado y natural. Nosotros consideramos cuatro tipos distintos de ahorro, un primer componente del ahorro en reservas bajo tierra un segundo en fuentes de

¹ En el caso de recursos agotables el concepto de sostenibilidad no aplica para un recurso en particular, sino que debe pensarse la sostenibilidad en un sentido más amplio del recurso y sus sustitutos. Así para el caso del petróleo sería más conveniente hablar del rol que puede jugar el petróleo en un esquema de sostenibilidad energética, tal como lo proponemos en el título de este trabajo.

energía renovable, un tercero en un fondo de capital y un cuarto tipo de ahorro en capital humano.

Para calcular la depreciación del petróleo extraído, nosotros usamos el concepto de costo de uso propuesto por El serafy (1989). Para el calculo de esta variable utilizamos la tasa de valoración del presente en vez de tasa de interés. En este sentido, el avance hacia una política energética sostenible en estos países implica invertir parte de la renta que ahorran en los fondos de capital (creados en principio para evitar la Enfermedad Holandesa) en fuentes de energía renovable que sustituyan las reservas de petróleo agotadas.

1. Introducción

En este trabajo buscamos aportar elementos que permitan avanzar en la respuesta a la pregunta de sí es posible un modelo de extracción de petróleo que conduzca a una política energética sostenible. Esta pregunta surge a partir del análisis de dos elementos que son en esencia contradictorios. De un lado, a partir de los lineamientos propuestos por el Consenso de Washington² los contratos petroleros han venido siendo cambiados, con el argumento de hacerlos más competitivos en un contexto globalizado. Así, la no existencia de obstáculos a la inversión traerá, según El consenso, inversión, crecimiento y desarrollo. En este sentido, se ha argumentado que el aumento de exportaciones de crudo permitirá pagar la deuda externa de los países forma más rápida.³ De otro lado, es cada vez más evidente la necesidad de hacer una explotación de petróleo que tome en cuenta su carácter agotable⁴ y los efectos de su combustión sobre el medio ambiente, es decir pensar su gestión desde una perspectiva sostenible.

2 Este *consenso* propone las siguientes medidas: - disciplina presupuestaria; - cambios en las prioridades del gasto público (de áreas menos productivas a sanidad, educación e infraestructuras); - reforma fiscal encaminada a buscar bases imponibles amplias y tipos marginales moderados; - liberalización financiera, especialmente de los tipos de interés; - búsqueda y mantenimiento de tipos de cambio competitivos; - liberalización comercial; - apertura a la entrada de inversiones extranjeras directas; - privatizaciones; - desregulaciones; - garantía de los derechos de propiedad.

3 En el caso colombiano, por sólo citar uno, las cifras hablan por si solas y hoy el país se encuentra con una mayor deuda, creciendo a una tasa bastante modesta y en condiciones de desarrollo similares a las de hace 20 años. Veamos: En 1990, el 33% del presupuesto total del Estado era destinado a inversiones, en el 2000 solamente se destina el 15%. Contrariamente, en 1990 se destinaba el 10% del presupuesto total del Estado al servicio de la deuda, en el 2000 se destinaba del orden del 33%. Lo paradójico es que la deuda pública ha pasado de 12'453.442 millones de pesos en 1991 a 75'443.058 millones de pesos en 1999. Es decir, ha aumentado el 625% en 9 años. Ver Cabera, Gonzalez (2000).

En el primer caso los resultados empíricos son bastantes reveladores, pues no obstante los países han abierto sus fronteras a la inversión y flexibilizado sus modelos contractuales, sus deudas han aumentado incluso en aquellos casos donde las exportaciones de materias primas han aumentado de forma sensible. La tabla 1 muestra el aumento de la deuda externa de 1990 a 2001 para algunos países.

Tabla 1 variación de la deuda externa de 1990 a 2001 para algunos países.

País	Deuda 1990 (Millones dólares)	Deuda 2001 (Millones dólares)	Aumento porcentual respecto a 1990
Brasil	119 877	226 067	88%
Argentina	62.730	140 681	123%
México	104 431	154 447	48%
Chile	19 227	38 520	100%
Colombia	17 993	33 180	84%
Filipinas	29 955	52 164	74%
India	83 800	98 400	17%

Es evidente que el proceso de apertura económica no ha conducido a un alivio de la deuda externa de la mayoría de los países, por el contrario ésta se ha incrementado de forma bastante importante empujada principalmente por el endeudamiento privado. Es de anotar que muchos de los países en desarrollo exportadores de materias primas siguen dependiendo de forma importante de las exportaciones de este tipo de productos y sus deudas externas siguen en aumento, incluso en el caso en el cual los volúmenes de exportación de estos productos han aumentado de forma importante.

4 Recordemos que Hotelling propone en 1931 una gestión según la cual la cantidad del recurso puede ser asimilado a un stock de capital bajo tierra. Así, el objetivo del propietario del recurso será maximizar el valor presente neto de su stock. De esta manera, si el propietario extrae rápidamente las reservas de la mina, hará caer el precio a cero. Contrariamente, si extrae las reservas lentamente, el precio se hará mayor y por ende los ingresos serán más importantes. De otro lado, como según el modelo de Hotelling para propietario de las reservas éstas no son otra cosa que un capital bajo tierra, su tasa de producción estará determinada por la tasa de interés del mercado. Así, esta es alta para el propietario de las reservas será más atractivo extraerlas a una tasa alta con fin de obtener capital que pueda colocar en el mercado financiero. De otro lado si la tasa de interés es baja, para el propietario de reservas es más atractivo dejar las reservas bajo tierra y así la tasa de producción será baja. el modelo de gestión de recursos

En lo que concierne a la explotación de recursos naturales y agotables, no existe una idea unificada⁵. Así, para Goodland et Ledec (1987) El desarrollo sostenible implica que los recursos minerales no renovables sean explotados de tal forma que no se impida el acceso a ellos por parte de las generaciones futuras. Así el desarrollo sostenible implica que la extracción de los recursos energéticos no renovables sea realizada a tasas lo suficientemente bajas, de tal forma que se garantice la transición ordenada a fuentes de energía renovable. (Pezzey, 1989, pag. 56-57)

Según Solow (1986) para garantizar un consumo constante en el tiempo, una sociedad debe invertir las rentas obtenidas de la explotación de recursos agotables en capital reproducible. Esto se puede interpretar como el ahorro de una cantidad definida de capital (definido de manera apropiada) que es mantenido intacto. Por otro lado, el consumo se puede interpretar como la tasa de interés sobre el patrimonio. (Pezzey, 1989, p 59).

Para Pearce (1976) el criterio de sostenibilidad requiere que las condiciones de acceso al recurso sean iguales para cada generación. Según este autor el desarrollo sostenible implica:

a) Limitar las tasas de extracción de recursos de tal manera que se mantengan por debajo de las tasas de regeneración natural, en el caso de un recurso renovable; y, por debajo de las tasas de sustitución en el caso de un recurso no renovable⁶.

b) La utilización del medio ambiente de tal manera que las tasas de emisión de desechos sean inferiores a las tasas de asimilación del ecosistema⁷.

5 En general el informe Brundtland nos habla de manera implícita sobre el uso de los recursos cuando nos propone la siguiente definición de desarrollo sostenible : "Development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs."

6 Según Pearce (1998) deben cumplirse tres condiciones: 1) que la elasticidad de sustitución entre el capital natural y el capital manufacturado sea mayor que uno, ó 2) que la elasticidad de sustitución sea igual a 1 y que la parte del capital manufacturado en el PNB sea mayor que la del capital natural, ó 3) que el cambio técnico sea de tal magnitud que su efecto sobre la tasa de descuento pueda desprejarse.

7 Según Pearce(1976) es difícil lograr tasas sostenibles en el caso de los recursos agotables, ya que los "seguidores de la sostenibilidad " tienden a pensar en términos de la sustitución de un stock de un recurso agotable por uno renovable. Se piensa igualmente que la sostenibilidad es algo positivo, y que por tanto se debe optimizar la tasa de uso. Pearce concluye que en estos términos la sostenibilidad puede implicar el uso de los servicios ambientales en un gran espacio de tiempo y en teoría de forma infinita. (Pezzey, 1989, p 59)

Un proceso de extracción de petróleo que este inscrito en una política energética sostenible se podría implementar siguiendo las dos acciones siguientes⁸:

La primera consiste en garantizar la llamada “regla del capital constante”. Esta se puede implementar siguiendo las tres vías complementarias o alternativas siguientes:

- a) Regulando la tasa de extracción de petróleo con el fin de no sobrepasar una cierta tasa límite que permita la substitución del petróleo por fuentes de energía renovable.
- b) Invirtiendo las rentas de la actividad petrolera en el desarrollo de fuentes de energía renovable.
- c) Invertir las rentas de la actividad petrolera en un fondo de inversiones de capital. Es decir mantener el capital constante⁹.

La segunda acción es garantizar que el proceso de producción de petróleo sea realizado garantizando la protección del medio ambiente de tal manera que se disminuya al máximo su deterioro, en términos neoclásicos esta política se interpreta como el pago de los servicios del medio ambiente. En la implementación de esta política se puede tomar en cuenta “la conservación del capital natural crítico”. Este concepto será discutido en forma detallada más adelante.

Para efectos de este trabajo asumimos como criterio de sostenibilidad aquel que propone garantizar la conservación de una cantidad constante del recurso, partiendo del hecho que los capitales natural y manufacturado son complementarios y no sustitutos¹⁰.

8 Turner (1988) dice que no tiene sentido hablar de sostenibilidad de recursos no renovables (incluso si el reciclaje fuese importante). Según este autor de todas formas cualquier tasa de extracción positiva agotará un stock finito. (Pezzey 1989 pag 60). Sin embargo Pearce (1998) propone que la sostenibilidad de un recurso agotable puede lograrse si se garantiza un consumo “per capita” constante.

9 Ver Solow R. (1992), *A almost practical step toward sustainability*, fortieth anniversary Resource for the Future, 8 October, Washington.

10 En el caso de recursos agotables el concepto de sostenibilidad no aplica para un recurso en particular, sino que debe pensarse la sostenibilidad en un sentido más amplio del recurso y sus substitutos. Así para el caso del petróleo sería más conveniente hablar

La discusión se va a desarrollar de la siguiente forma: Inicialmente plantearemos la noción de sostenibilidad de la cual partimos. Luego proponemos una metodología para implementar un modelo de extracción de petróleo que conduzca a una gestión energética sostenible. En este caso proponemos una metodología para calcular la sustitución de petróleo por electricidad obtenida de fuentes renovables y por aceite de palma africana. También proponemos los montos a invertir por barril con el fin de garantizar la descontaminación del aire, el pago de los impactos ambientales y la protección del capital natural crítico.

2. Nuestra concepción de la sostenibilidad.

Tal como lo señalamos en la introducción, en el caso de los recursos naturales, no existe una idea unificada sobre la forma de explotación de los mismos con miras a lograr una gestión sostenible de ellos. Sin embargo debe tenerse en cuenta que cualquier tipo de gestión debe garantizar la utilización de los recursos naturales evitando su agotamiento y degradación, de tal forma que no se impida el acceso a ellos por parte de las generaciones futuras. Existen diversas interpretaciones del concepto de desarrollo sostenible que están en la base del concepto de gestión sostenible. Veamos la clasificación que nos propone Olivier Godard (1994), este autor clasifica las concepciones sostenibilidad en tres principales:

Sostenibilidad muy débil de Solow : En esta concepción, un esquema de crecimiento es sostenible si él permite conservar de manera indefinida la capacidad productiva de las sociedades humanas. Teniendo en cuenta que el capital no se limita a los equipos productivos, sino que él comprende también los activos que contribuyen a generar bienestar en el futuro tales como saber y activos naturales (Solow, 1992). El planteamiento de esta visión es que el capital natural, a excepción de los activos únicos, es sustituible por capital artificial manufacturado.

del rol que puede jugar el petróleo en un esquema de sostenibilidad energética, tal como lo proponemos en el título de este trabajo.

Sostenibilidad débil : esta concepción no se diferencia mucho de la primera, salvo que tiene en cuenta las restricciones que imponen los límites físicos a la sustitución entre capital natural e artificial. Así, la preocupación por respetar estas restricciones hace que finalmente estemos en el mismo paradigma que en el caso de sostenibilidad muy débil : Conservar las cantidades totales de capital artificial y natural.

Sostenibilidad Fuerte : En este caso la sustitución entre capital natural y artificial se plantea como imposible. Así, toda degradación del capital natural exige entonces su restitución teniendo en cuenta sus especificidades físicas y el hecho que desde el punto de vista ético estamos obligados a transmitir a nuestros descendientes el capital natural intacto (Costanza et Daly, 1992). De esta manera, en esta visión se presenta un salto conceptual bastante importante con respecto a otras corrientes de desarrollo sostenible: la imposibilidad de sustituir los capitales natural y manufacturado¹¹.

No obstante, la diferencia conceptual entre las nociones de sostenibilidad débil y fuerte, es posible encontrar un punto de convergencia entre ellas. En efecto tal como lo muestra Victor (1991), el cuarto principio operacional propuesto por Costanza et Daly (1992) corresponde al llamado de Pearce y Turner(1990) en el sentido de garantizar un stock constante de *capital natural*¹². En efecto, para Costanza y Daly (1992) los recursos naturales no renovables deben ser explotados a una tasa igual a la creación de sustitutos renovables. De otro lado, para Pearce y Turner(1990) una condición necesaria para el desarrollo sostenible es garantizar que el capital natural se mantenga constante. Sin embargo, para estos autores el capital natural es sinónimo de recursos del medio ambiente.

11 Nosotros definimos el capital natural de la forma siguiente : “el conjunto de recursos “elaborados” por la naturaleza en el pasado y los cuales pueden ser transformados en bienes y servicios presentes – y futuros-”.

12 El concepto de capital natural es una extensión de la noción tradicional de capital que se utiliza en economía, el cual es generalmente definido como capital manufacturado (hecho por el hombre). El elemento común entre las nociones de capital manufacturado y natural es que ambos son entendidos como un stock de algo que produce un flujo de bienes y servicios. El capital natural puede dividirse en dos grandes categorías renovable y no renovable. Sobre este asunto veáse : PRUGH T.(1999), Natural Capital and Human Economic Survival, Ecological Economics series, Florida, pag 49.

Nosotros pensamos que más que hablar de desarrollo sostenible debemos hablar de sostenibilidad, de otro lado es necesario considerar que este concepto depende de la forma como se piense el asunto de la sustitución entre capitales natural y manufacturado. Para avanzar en la diferenciación entre estos dos tipos de capitales proponemos recordar la tres precisiones propuestas por Pearce y Turner (1990):

- 1) El capital manufacturado no es independiente del capital natural, este último es necesario para formar el primero.
- 2) El capital natural realiza otras funciones tales como: ser soporte para la vida, ser multifuncional. Estas funciones no son realizadas por el capital manufacturado.
- 3) Como consecuencia de las dos características anteriores no es posible siempre sustituir el capital natural por manufacturado¹³.

Nosotros proponemos partir de un concepto de sostenibilidad que propone garantizar que el capital natural se mantenga constante¹⁴. Según Pearce y Turner (1990) para garantizar que la cantidad de capital natural se mantenga constante se deben tener en cuenta que más capital natural puede significar mayor resistencia a los *shocks* y por ende una sociedad más sostenible. Adicionalmente, las consideraciones de equidad intergeneracional exigen que la cantidad del recurso sea mantenida de tal forma que se asegure de forma amplia un igual acceso a este por parte de las diferentes generaciones. Por otro lado, la preservación del capital natural es consistente con la visión del mundo que reconoce los derechos de otras especies a coexistir con los humanos.

13 Estas tres precisiones son bastante similares a las que proponen Costanza y Daly(1992) :

- 1) Estos capitales son complementarios en vez de sustitutos.
- 2) El capital manufacturado esta hecho de recursos naturales (capital natural).
- 3) El proceso de producción es realmente un proceso de transformación de materia y energía.

14 Nosotros partimos aquí del planteamiento de Pearce y Turner (1990).

Nosotros consideramos que para lograr la sostenibilidad en la explotación de un recurso natural se tienen que cumplir tres condiciones¹⁵:

a) Limitar las tasas de extracción de recursos de tal manera que se mantengan por debajo de las tasas de regeneración natural en el caso de un recurso renovable, y por debajo de las tasas de sustitución en el caso de un recurso no renovable¹⁶.

b) La utilización del medio ambiente de tal manera que las tasas de extracción sean inferiores a las tasas de asimilación del ecosistema.

c) Garantizar que las condiciones económicas y sociales de la región y del país, dependiendo de la escala del proyecto, mejoren respecto a las condiciones iniciales.

Si tales reglas son respetadas estaríamos garantizando que la cantidad de recursos renovables y la capacidad de asimilación del medio ambiente y el bienestar económico y social no disminuyan. Así los recursos naturales estarán disponibles en cualquier período futuro con el fin de sostener la economía. La idea según la cual la cantidad de recursos debe mantenerse constante en el tiempo esta implícita en las reglas que Pearce y Turner (1990) han usado para plantear el problema de la protección del medio ambiente y la gestión de recursos naturales¹⁷.

3. Como explotar el petróleo de tal forma que se logre una política energética sostenible.

El llamado cuarto principio de la escuela termodinámica propone que los recursos no renovables sean explotados a tasas menores o iguales a la tasa de implementación de sustitutos renovables

15 Recordemos que para Pearce y Turner (1990) las dos primeras son condiciones necesarias para el desarrollo sostenible. Para nosotros son simplemente condiciones necesarias para la sostenibilidad.

16 Según Pearce (1998) deben cumplirse tres condiciones: 1) que la elasticidad de sustitución entre el capital natural y el capital manufacturado sea mayor que uno, ó 2) que la elasticidad de sustitución sea igual a 1 y que la parte del capital manufacturado en el PNB sea mayor que la del capital natural, ó 3) que el cambio técnico sea de tal magnitud que su efecto sobre la tasa de descuento pueda despreciarse.

17 Puede verse claramente que las nociones de sostenibilidad fuerte y débil coinciden en la necesidad de conservar un stock constante de capital natural. Así, el principio operacional propuesto por Costanza y Daly(1992) corresponde a la proposición de Pearce y Turner 1990 conservar la cantidad de capital natural constante, especialmente en el caso de recursos no renovables.

Costanza y Daly (1992). Veamos como un modelo de extracción sostenible de un recurso renovable puede ser asimilado a uno no renovable.

Los modelos de explotación sostenible para un recurso renovable exigen mantener unas tasas de explotación por debajo de una cota impuesta por la tasa de renovación del recurso. Así, en el caso de una población de peces, la tasa de crecimiento natural debe ser:

$$r = b - m$$

donde

r : tasa de crecimiento natural

b : natalidad

m : mortalidad

Si X es el tamaño de la población, entonces el cambio de la población en el tiempo será:

$$X' = dx/dt = r*x$$

Entonces $X(t) = X(0)e^{r*t}$

Empíricamente encontramos que:

$$X' = r(x)*X$$

Donde : r(x) disminuye si X aumenta ya que $r(x) = X'/X$

Así, el cambio de la población en el tiempo será:

$$X' = r*X(1-X/K)$$

Donde :

K: capacidad de carga o nivel de saturación

Sin embargo, en el caso de recursos agotables es evidente que, la tasa de crecimiento del recurso es cero¹⁸; sin embargo, si existen recursos sustituibles; así que se puede hablar de tasa de sustitución. En el caso del petróleo, la aplicación del cuarto principio operacional propuesto por la escuela termodinámica¹⁹ tiene como propósito garantizar que la tasa de extracción no rebase ni

18 Aquí se supone que estamos hablando de unas reservas conocidas y definidas. Sin embargo, las reservas pueden aumentar más no puede pensarse que esto implique una tasa de crecimiento del recurso diferente de cero. Esto debido, a que desde el punto de vista físico nada ha sido creado.

19 Cuando hablamos de la escuela termodinámica de la economía nos referimos a aquella corriente teórica que tiene sus orígenes en los trabajos de N. Georgescu-Roegen, F. Soddy, S. Poldisky entre otros. De esta corriente es la revista Ecological Economics en la cual publican autores como H. Daly, R. Costanza y J.M. Alier entre otros.

la tasa de sustitución por otras formas de energía renovables, ni la tasa de asimilación del ecosistema. Así, la tasa de extracción puede escribirse de la siguiente manera:

$$dq/dt \leq dE_{re}/dt$$

y

$$dq/dt \leq dq_{ac}/dt$$

Donde,

q : volumen extraído.

E_{re} : Energía renovable equivalente.

q_{ac} : volumen de asimilación crítico.

En el caso del petróleo podemos materializar los tres principios propuestos por Costanza (1992)²⁰ de la siguiente manera:

a) La aplicación de una tasa, destinada a hacer inversiones en fuentes de energía renovable, en este caso existen tres posibilidades:

- Que la tasa sea pagada por los países productores y las empresas petroleras : esto hará disminuir su renta petrolera.
- Que la tasa pagada por los países consumidores: en este caso los países consumidores que se benefician de *la renta petrolera absoluta*²¹, deben repercutir el costo de agotamiento en los consumidores.
- Que la tasa sea pagada a la vez por los países productores y los países consumidores, en este caso la tasa puede ser compartida entre ambos tipos de países. Los primeros introducirán una tasa en los productos petroleros, en tanto que los segundos ahorrarán parte de su renta para financiar el agotamiento del petróleo.

20 Estos son: a) **La introducción de una tasa** destinada a la reducción o eliminación de la destrucción del *capital natural no renovable*²⁰. El principio consiste en invertir el producto de la tasa en la sustitución de capital natural no renovable por capital natural renovable. Esta tasa debe repercutir en los consumidores a través del precio, b) **La aplicación del principio de quien contamina paga** aplicado a los productos potencialmente peligrosos, con el fin de incorporar el costo de incertidumbre en los daños ecológicos y los costos de daños desconocidos, c) **La implementación de un sistema de tarificación ecológica** destinado a permitir a los diferentes países una de las siguientes posibilidades: - Negociar individualmente o en bloques sus políticas de protección del medio ambiente,- Aplicar las dos políticas precedentes, sin obligar a los productores a trasladarse al extranjero con el fin de mantener su competitividad.

21 En el sentido que ha sido definido por Angelier (1976). Para este autor la renta absoluta estará compuesta por la suma de las rentas de los procesos de : extracción, transporte, refinación y distribución.

b) La aplicación del principio de precaución al agotamiento de recursos no renovables puede tener como principio el lema siguiente: *quien agota paga la substitución del recurso agotado*.

c) El sistema de tarificación ecológica por país : en este caso es claro que una política sostenible debe garantizar el pago del agotamiento, pero también el pago del deterioro ambiental económico y social; así como la protección del *capital natural crítico*. Así, las tarifas ecológicas pueden ser introducidas bajo la forma de costos ecológicos en un proyecto de explotación de petróleo.

Para los yacimientos de petróleo nuestro problema será:

- a) Encontrar las inversiones necesarias que garanticen la substitución de petróleo por una forma de energía renovable E_{re} .
- b) Establecer unos criterios para la protección del capital natural crítico.
- c) Establecer unos criterios para garantizar el pago de los *servicios ambientales* tales como la contaminación del aire causada por las emisiones de gas contaminante, del suelo y de las aguas causadas por los desechos líquidos y sólidos.
- d) Establecer las retribuciones por impactos causados por la explotación del recurso sobre la economía y las condiciones de vida locales.

Si la extracción de petróleo se hace por debajo del volumen de asimilación crítico q_{ac} , es necesario determinar las funciones medioambientales críticas, es decir, aquellas funciones ambientales que sirven de soporte a la vida. De otro lado, en lo que concierne a la sustitución de petróleo por una fuente de energía renovable consideramos que el petróleo puede ser sustituido por los siguientes tipos de energía: Eólica, solar, biomasa e hidroeléctrica. Nuestro objetivo no es discutir los detalles concernientes con la implementación de un proyecto de energía renovable. Esto, debido a que consideramos que es suficiente con la determinación del monto de inversión

necesario para garantizar la sustitución de la cantidad de petróleo agotado, pues los detalles sobre la implementación de un proyecto de energía renovable daría para hacer otro trabajo tan extenso como éste.

Para avanzar en el desarrollo de una metodología que permita proponer una explotación de petróleo en el marco de una política sostenible debemos construir un indicador para caracterizar la explotación con el fin de saber que tan lejos estamos de la sostenibilidad en el sentido de conservación de la cantidad de recurso. En este sentido proponemos construir un *indicador de sostenibilidad* para determinar si el proceso de extracción de petróleo conduce a una política energética sostenible o no. De esta manera, proponemos utilizar el resultado de la *ley de Hartwick* (1977)²². Esta *ley* puede escribirse de la manera siguiente:

$$S(t) - \delta K(t) \geq 0 \quad (1)$$

Donde,

S(t) : Ahorro

$\delta K(t)$: depreciación del capital total²³

22 Hartwick propone invertir los ingresos de los recursos agotables en capital productivo, si se quiere garantizar un consumo constante per capita. Matemáticamente, se puede escribir: $dC/dt = -\delta f_x K$; donde: x : producción total, C : Consumo, K : Capital, $f_x = dx/dk$, δ : Depreciación del capital.

23 El capital es un concepto que ha suscitado bastantes controversias, así, una definición general de capital será: *Conjunto de bienes producidos en el pasado que intervienen en la producción presente-y futura- de otros bienes* (ver Guerrien 1996). Para Herfindahl y Kneese (1974) el capital es un elemento que aporta un flujo de servicios productivos con el tiempo y que dirige el proceso de producción. Estos autores anotan que esta definición no concierne solamente al capital manufacturado sino que la tierra y el trabajo también satisfacen esta definición. Para Marx, el Capital designa ante todo una relación social, la relación entre los propietarios de los medios de producción y los que no los poseen.

Para los Neoclásicos el capital no es otra cosa que un factor de producción, el cual puede ser introducido en la función de producción neoclásica de tipo Cobb-Douglas como un agregado que representa el conjunto de entradas (materias primas, energía, servicios prestados por los equipos fijos, etc.). Recordemos que esta representación del capital fue objeto de la llamada polémica de Cambridge que se refería al significado del capital como argumento de la función de producción neoclásica y sobre las conclusiones que pueden obtenerse a partir de esta representación. El cuestionamiento de fondo era el hecho de intentar representar los aspectos macroeconómicos a partir de razonamientos de tipo macroeconómico, sin preocuparse por el problema de la agregación.

Este punto fue reconocido por los defensores de tal representación (Solow y Samuelson) quienes zanjaron la controversia proponiendo tomar tal representación como “una forma aproximativa” de modelar la realidad.

El capital también es tomado como un conjunto de activos, que toma la forma de títulos, derechos de propiedad, detentados por individuos (o por la sociedad). Este tipo de capital es el origen de remuneraciones específicas tales como intereses, dividendos o ganancias.

Prugh (1999) nos propone clasificar el capital de la forma siguiente²⁴:

- a) Capital natural²⁵: compuesto del renovable y del no renovable.
- b) Capital manufacturado o capital hecho por el hombre.
- c) El capital humano también llamado capital cultural. El se compone del conocimiento colectivo, las competencias, la acumulación de datos, de la ciencia y del conocimiento.

Para este autor el capital natural es una extensión de la noción tradicional de capital manufacturado. Estos dos tipos de capital tienen como elemento común la idea de una acumulación que produce un flujo de bienes y de servicios. (Prugh, 1999).

De esta forma si se supone que estos capitales son sustituibles, entonces podremos escribir el capital total K de la forma siguiente:

$$K = K_m + K_h + K_n$$

Donde,

K_m : Capital manufacturado.

K_h : Capital humano.

K_n : Capital natural.

Partiendo de la ecuación (1) proponemos construir un indicador de tipo microeconómico basado en el principio de conservación del capital natural total, que permita caracterizar la extracción de petróleo con el propósito de saber que tan lejos se encuentra ésta de una política energética sostenible. Este indicador se construye como la diferencia entre cuatro tipos de ahorro y cuatro depreciaciones. Veamos:

$$Z = ((E_1 + E_2 + E_3 + E_4) / Y_1) - (\delta_{N1} K_{N1} / Y_1 + \delta_{N2} K_{N2} / Y_1 + \delta_{N3} K_{N3} / Y_1) - \delta_h K_h(t) / Y_1 \quad (2)$$

24 Ekins et al (2003) propone cuatro tipos de capital : manufacturado, humano, social/organizacional y natural.

25 Ekins et al (2003) le adjudican al capital natural las cuatro funciones siguientes: a) Provisión de recursos para la producción, b) Absorción de desechos de producción, c) Soporte a la vida, d) Contribución al bienestar humano.

Donde,

E_1 : Ahorro en forma de reservas bajo tierra

E_2 : Ahorro en forma de energía renovable.

E_3 : Ahorro en forma de capital manufacturado.

E_4 : Ahorro en forma de capital humano.

Y_1 : Valor de las reservas totales del yacimiento.

δ_{N1} : Depreciación del capital natural por efecto de agotamiento de reservas.

δ_{N2} : Depreciación del capital natural por impacto de las emisiones de CO_2

δ_{N3} : Depreciación del capital natural por otros impactos sobre el medio ambiente.

δ_h : Depreciación del capital humano.

Este indicador nos permite evaluar si los recursos (naturales, de capital, humanos, tecnológicos etc.) que son utilizados en el proceso de producción se están compensando total o parcialmente. Así, si $Z = 0$ los recursos utilizados estarán siendo compensados totalmente. De esta manera, habría un ahorro que pasará a las generaciones futuras sea bajo la forma de otros recursos, sea bajo la forma de capital. Si $Z < 0$ se estará creando un déficit en los recursos que le corresponderían a las generaciones futuras. Finalmente, si $Z > 0$ la actual generación estaría actuando de forma altruista y estará dejando a las generaciones futuras mayor cantidad de recursos de los que recibió de la generación anterior.

Nuestro problema es entonces encontrar los valores de δ_M , δ_{N1} , δ_{N2} , δ_{N3} , δ_h . Estos valores pueden ser obtenidos a partir de un proceso de simulación del flujo de caja para la explotación de un yacimiento de petróleo²⁶. Para calcular estos valores proponemos el procedimiento siguiente :

26 Nótese que en el cálculo de las depreciaciones lo que buscamos es encontrar cual es el capital que es necesario invertir con el fin de sustituir el capital agotado o el recurso agotado según sea el caso, esto no implica necesariamente que se esté suponiendo que existe sustitución entre capitales en el sentido que lo entienden los economistas neoclásicos. Esto, ya que por ejemplo, invertir una parte de la renta petrolera para sustituir la energía agotada por energía renovable no implica sustitución entre capitales manufacturado y natural. Igual sucede con el pago de los servicios ambientales en aquellos casos en que el deterioro sea reversible.

3.1 Calculo de la depreciación del capital natural por agotamiento de petróleo.

Para el calculo de la depreciación del capital natural por agotamiento de petróleo, proponemos utilizar el concepto de costo de uso construido por El Serafy (1989). Según este autor, el valor capitalizado (para el año n) de una fuente de ingresos constante y finita R será :

$$\sum_0^n R^* = R[1 - (1/(1+r)^{n+1})]/(1/(1+r))$$

Donde,

r : tasa de interés

n : numero de años

Si de otro lado consideramos, que X es el valor capitalizado de una fuente constante de ingresos cuyo valor es:

$$\sum_0^\infty X^* = X / (1/(1+r))$$

Utilizando la relación:

$$\sum_0^n R^* = \sum_0^\infty X^*$$

Podemos entonces escribir:

$$X/R = 1 - (1/(1+r)^{n+1})$$

La relación X/R depende de dos valores :

- El tiempo de duración de las reservas (n) que no es otra cosa que la relación entre la cantidad total de reservas y la tasa de extracción.
- La tasa de descuento (r).

Según El Serafy(1989), si se fija la tasa de descuento en 5% y si se extrae el recurso en 10 años, entonces solo se deberá considerar como ganancias el 42% de los ingresos totales. Inversamente, si el recurso se extrae en 50 años, el porcentaje de ingresos que podrán ser considerados como ganancias, será el 92%.

En resumen, si r aumenta, la relación X/R se aproxima a 1. Contrariamente si r disminuye esta relación se aproxima a cero. Así, podemos definir el costo de uso del recurso de la manera siguiente :

$$1 - X/R = (1 / (1 + r)^{n+1})$$

Para El Serafy (1989) esta ecuación representa el factor de depreciación del yacimiento mineral, y puede ser utilizada como un indicador de escasez del recurso. Proponemos calcular la tasa de depreciación por agotamiento de petróleo δ_{N1} a partir de esta ecuación, pero utilizando la tasa de preferencia por el presente t_{vp} en vez de la tasa de interés r . Esta tasa de preferencia por el presente puede ser calculada para cada año, si se conoce el volumen de petróleo extraído por año y las reservas totales del yacimiento. Pensamos que cuando se trata de la depreciación anual unitaria de un recurso natural como el petróleo, es más realista utilizar el t_{vp} que la tasa de interés del mercado r .

En la figura 1 mostramos cuatro curvas de depreciación unitaria: la primera calculada con una tasa de interés r igual a 4%, y las otras calculadas con tasa de preferencia por el presente t_{vp} iguales a VE_i/Y_1 , donde VE_i designa el volumen extraído durante el año i y Y_1 las reservas totales. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$\delta_{N1} K_{N1} / Y_1 = \sum_{i=1}^n ((\delta_{N1i} * VE_i) / Y_1)$$

con $\delta_{N1i} = (1 / ((1 + t_{vp})^{ni+1}))^{27}$,

Donde,

n_i : relación reservas/ producción para el año i

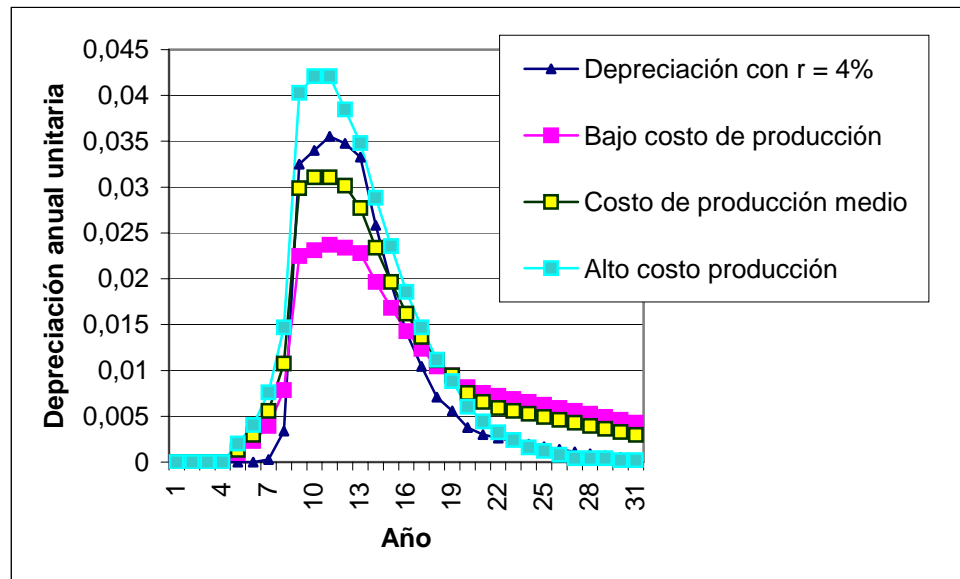
V.E.i : Volumen extraído durante el año $i = ((K_o * A) / \mu_o) * (dp/dl)^{28}$

t_{vp} : tasa de valoración del presente = VE_i/Y_1 .

27 Esta ecuacion es equivalente a la propuesta por El Serafy (1989) para el calculo del costo de uso.

28 Donde K_o : Permeabilidad efectiva al petroleo, A : area de flujo total, μ_o : viscosidad del petroleo y dp/dl : cambio de presión con distancia.

Figura 1. Curvas de depreciación calculadas con t_{vp} y $r = 4\%$ ²⁹.



Es claro que las curvas de depreciación unitaria trazadas con la tasa de valoración del presente t_{vp} siguen la misma trayectoria que aquella trazada con la tasa de interés r del 4%. En la figura vemos que a medida que aumenta el costo de extracción, las curvas de depreciación construidas con t_{vp} se parecen a aquella construida con la tasa de interés r . por las razones anteriores calcularemos la depreciación del petróleo agotado con t_{vp} , esto debido a que esta variable nos da información sobre la disminución de las reservas en el tiempo y por esta razón es más próxima a la realidad que la tasa de interés del mercado.

3.3 El calculo de la depreciación de los capitales naturales δ_{N2} y δ_{N3} y el capital natural crítico como instrumento de políticas ambientales.

Sabemos que la evaluación tanto de los costos de los impactos medioambientales como de la protección del capital natural critico son difíciles de determinar ya que ellos dependen de condiciones geográficas y geológicas bastantes específicas³⁰. Por ejemplo, ¿ quien puede estimar

²⁹ Los costos de levantamiento en dolares por barril considerados son los siguientes : 4 ,5 (bajo) ; 6,5 (medio) y 9 (alto).

³⁰ En la literatura podemos encontrar algunos valores para el costo de la degradacion medioambiental del capital natural bastante disimiles. Por ejemplo: 6 centavos de dolar por barril de petroleo en el Este de Venezuela (Fuente: El Nacional junio 21 1998), Una Ecotasa de 10 dolares por barril de petroleo propuesta por Alan Lipietz (1998) para disminuir el consumos de gasolina e

el costo de la disminución del patrimonio genético si no sabemos siquiera cual es ese patrimonio ?. De otro lado, ¿ quien puede evaluar el costo de las funciones de soporte a la vida si no conocemos cuales son las existentes ?. Sin embargo, es posible avanzar en la determinación de los costos de los impactos ambientales si éstos son divididos de la forma siguiente:

$$C_{meT} = C_{gases/bpe} + C_{oca} + C_{pcc}$$

Donde,

C_{meT} : Costo medioambiental total.

$C_{gases/bpe}$: Costo de descontaminación por efecto de emisión de gases producto de la combustión del petróleo extraído.

C_{oca} : Otros costos ambientales

C_{pcc} : Costo de protección del capital natural crítico.

Para calcular cada uno de estos costos proponemos proceder de la forma siguiente:

Asumir que el costo de descontaminación por efecto de emisión de gases producto de combustión del petróleo extraído ($C_{gases/bpe}$) es igual al costo de CO_2 por barril de petróleo equivalente³¹.

$$C_{co2/bpe} = f_{tgases/bpe} * C_{tco2}$$

Donde,

$C_{co2/bpe}$: Costo del CO_2 por barril de petróleo equivalente.

$f_{tco2/bpe}$: toneladas CO_2 por barril de petróleo equivalente.

C_{tco2} : Costo por tonelada de CO_2

Para calcular el valor de $C_{co2/bpe}$ proponemos tomar un petróleo crudo de 25API y asumir que una tonelada de petróleo es igual a 7 barriles; así, el valor del factor de conversión entre toneladas de gases y barriles equivalentes de petróleo será:

$$f_{tco2/bpe} = 0,0001132 \text{ toneladas de } CO_2/bep$$

incentivar le entrada al mercado de energias limpias. Ver Lipietz A. (1998) “Economie politique des Eco taxes”, Rapport au Conseil d’Analyse économique du premier ministre, avril 16.

31 Esto debido a que el CO_2 es el gas que se emite en mayor porcentaje de la combustión de un barril de petróleo y el mayor responsable del calentamiento global.

De otro lado, si tomamos el costo de la tonelada de CO₂ C_{tco2} igual a 29 dólares³³, tendremos que el costo CO₂ por barril de petróleo equivalente $C_{\text{co2/bpe}}$ es igual a 0,0033 dólares.

De otro lado, el costo de los daños ocasionados por otras actividades de la industria petrolera sobre el medio ambiente (C_{oca}) estará entre 0,009 y 3,47 dólares por barril³⁴, si las propiedades petrofísicas de la formación que contiene hidrocarburos varían entre los rangos siguientes:

Espesor de la formación geológica	(h)	:	10 - 30 metros.
Porosidad mediana del yacimiento	(ϕ)	:	10 - 30 %.
Buzamiento del yacimiento	(θ)	:	70° – 20°
Factor de recuperación de petróleo	(Er)	:	25 - 55%
Saturación de aceite	(So)	:	55 – 90%
Producción media por pozo		:	300 – 1000 barriles/día
Tamaño del yacimiento		:	50, 200, 1000 millones de barriles.

Nosotros proponemos 0,217 dólares por barril como un valor de referencia C_{oca} , ya que es el valor de las inversiones realizadas en protección ambiental por la *BP exploration Colombia*³⁵ para los yacimientos de Cusiana y Cupiagua y como vemos se mantiene en el rango que obtuvimos para este tipo de costos ambientales. Así, la suma de $C_{\text{co2/bpe}}$ y C_{oca} será igual a 0,2203 dólares por barril.

Para definir el costo total de las inversiones en protección ambiental es necesario determinar cuanto hay que invertir en la protección del capital natural crítico. Pero sabemos que la valoración de la protección del capital natural crítico implica definir las funciones

32 Si $F_{\text{tco2/bpe}} = 0,8$ toneladas de CO₂/1000tep. Recordemos que bep : barril equivalente de petróleo y tep : tonelada equivalente de petróleo.

33 A propósito del valor de una tonelada de CO₂ hay bastantes discusiones. Nosotros tomamos el valor obtenido a partir del modelo Poles desarrollado por IEPE. Sin embargo, hay que recordar que el banco mundial propone un valor por tonelada de CO₂ entre 3 y 17 dólares.

34 Estos valores se obtienen calculando la cantidad de barriles por hectárea a partir de los datos presentados y asumiendo un valor para protección ambiental igual a 2000 dólares por hectárea. Este último es propuesto Costanza et al (1997) como el valor de la funciones ambientales para la selva tropical.

35 Ver Cecodes indicadores BP EXPLORATION COMPANY (COLOMBIA) LTD en : <http://www.cecodes.org.co/Indicadores/bp/inbp.htm>

medioambientales críticas que deben ser mantenidas. Entre éstas podemos enunciar las siguientes:

- Aquellas que no pueden ser substituidas en términos de bienestar generacional por alguna otra función, medioambiental o no.
- Aquellas para las cuales las pérdidas son irreversibles.
- Aquellas para las cuales las pérdidas están por encima de un valor mínimo³⁶.

Así, podemos definir el capital natural crítico como el conjunto de recursos medioambientales que a una escala geográfica dada asegura las funciones medioambientales vitales y para las cuales no existe ningún sustituto en términos de capital manufacturado o humano Noël y O’connor (1998)³⁷.

Para Noël (2000) hacen parte del capital natural crítico:

- a) El patrimonio genético.
- b) El capital natural de soporte a la vida.
- c) Los elementos cuya función medioambiental no puede ser substituida a un costo aceptable.

Así, en el caso de la extracción de petróleo la cuestión será determinar el costo que tiene la protección de cada uno de estos componentes del CNC. El calculo de la inversión necesaria para proteger el CNC depende de cada proyecto en particular. Sin embargo, es posible encontrar un rango a partir del cual se pueda luego avanzar hacia la determinación de valores más precisos dependiendo de las condiciones geográficas y geológicas dadas.

Proponemos asumir que durante la ejecución de un proyecto petrolero se interviene entre un 10 y un 25% del área total del mismo. Ahora, si asumimos que el valor propuesto Costanza et al (1997) de US \$2000 dólares por hectárea es el necesario para garantizar la protección del capital

36 Ver Ekins (2003).

37 Para Ekins (2003) el CNC es la cantidad de capital, que realiza estas funciones críticas, que no puede ser substituida por otras cantidades de medio ambiente o de otros capitales que realicen las mismas funciones Ekins (2003, pag 174). Para Turner (1993) El capital natural crítico son las partes vitales del medio ambiente que contribuyen a los sistemas de soporte a la vida, la biodiversidad y otras funciones necesarias definidas como especies y procesos claves (De Groot, 2003, pag 189).

natural crítico en zonas tropicales, entonces podremos decir que el costo por hectárea variará entre 200 y 500 dólares, o 0,0036 y 0,0089 dólares por barril. Sin embargo, si acogemos como costo de protección del CNC el 50% de la inversión reportada por la *BP exploración Colombia* para la protección del medio ambiente en Colombia que fue igual a 0,217 dólares por barril producido, entonces tendríamos un valor de 6076 dólares por hectárea³⁸, o 0,11 dólares por barril. Así, la inversión por barril necesaria para garantizar la protección del capital natural crítico puede situarse en un rango entre 0,0036 y 0,11 dólares por barril. Esta inversión estará destinada a garantizar el mantenimiento de las funciones ambientales críticas. Para efectos del ejercicio que aquí nos proponemos y teniendo claro que estos costos deben ser determinados para cada proyecto específico proponemos tomar el valor más alto del intervalo (0,11³⁹ dólares por barril) como el valor a ser introducido en el flujo de caja del proyecto petrolero. De esta forma, el costo total de protección del medio ambiente C_{Tme} será:

$$C_{Tme} = 0,2203 + 0,11 = 0,3303 \text{ dólares/barril.}$$

3.4 Calculo de la depreciación del capital Humano.

En general cuando las empresas petroleras (y mineras) se plantean el asunto del desarrollo sostenible, tienen la tendencia a pensar que éste se reduce a la protección del medio ambiente local y en el mejor de los casos a la definición de una serie de medidas que buscan sustituir al estado en lo que tiene que ver con políticas de protección social.

Normalmente se busca garantizar: la Satisfacción de las necesidades humanas como salud, educación y saneamiento básico. La inversión en capital humano puede ser calculada de la forma siguiente:

38 Asumiendo que dicha inversión fue toda realizada en el campo Cusiana que posee 700 millones de barriles y un área superficial de 12500 hectáreas, lo cual daría un promedio de 56000 barriles por hectárea.

39 Este valor se supone solo como una primera aproximación que bien puede ser modificada. Ya que el valor del costo de uso del medioambiente es bastante variable, pues se pueden obtener datos que van desde 0,06 hasta 10 dólares por barril producido, que es el valor propuesto para la Ecotasa propuesto por Alan Lipietz. Para el caso de Venezuela se reporta un valor de depreciación del capital natural igual a 6 centavos de dólar por barril, (ver El Nacional Julio 21 1998). En el caso de Colombia podría servir de base el valor que *BP co* reporta como inversiones en la protección del medio ambiente en Colombia que fue de 0,217 dólares por barril. Así el valor de 0,46 que asumimos el doble de lo que invirtió B.P. en protección del medio ambiente.

Supongamos:

- Un valor de ingreso por cabeza de 20000 dólares que corresponde a un país desarrollado. – Una inversión en salud saneamiento básico y educación igual al 10% del PIB es decir 2000 dólares por habitante.

Así, si tomamos una densidad poblacional de 41 habitantes por kilómetro cuadrado es decir 0,41 habitantes por hectárea (que es el valor que reporta el DANE para Colombia) y un valor de 56 000 barriles por hectárea⁴⁰. Tendremos que la inversión en dólares por barril para estos tres rubros es:

$$C_{SES\text{B}} = 2000 \text{ (dólares/Habitante)} * 0,41 \text{ (Habitantes/hectárea)} / 56000 \text{ barriles/hectárea}$$
$$C_{SES\text{B}} = 0,015 \text{ dólares/barril}^{41}$$

De esta forma el costo total por barril que es necesario invertir para protección del medio ambiente y garantizar el mantenimiento del capital natural será :

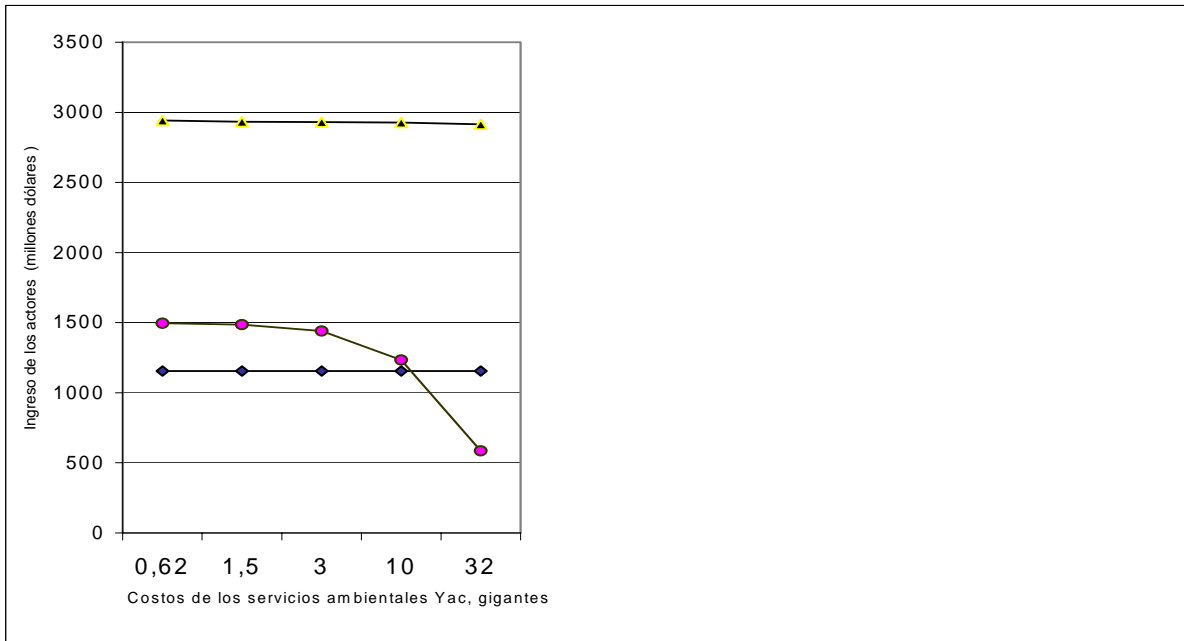
$$C_{TME} + C_{SES\text{B}} = 0,3303 + 0,015 = 0,3453 \text{ dólares/barril}$$

Si analizamos el impacto que tienen los costos de protección ambiental sobre los ingresos de cada uno de los actores que participan del negocio petrolero en Colombia, para dos tamaños de yacimiento tendremos los resultados siguientes:

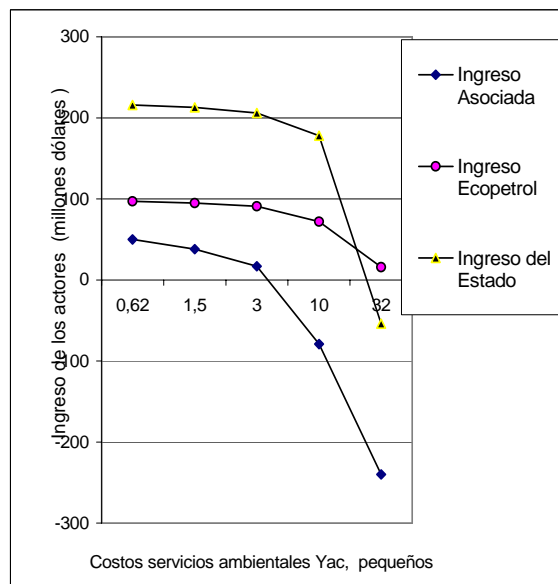
40 Este valor es el obtenido para el yacimiento Cusiana que posee 700 millones de barriles y tiene una extensión de 125 kilómetros cuadrados, o 12500 hectáreas.

41 Obsérvese que estos valores son bastante bajos que no obstante los valores de inversión en saneamiento básico, salud y educación son bastante altos(como consecuencia de haber supuesto un valor de ingreso por habitante bastante alto), ya que el volumen de petróleo por hectárea es importante.

Figura 2 Variación de los ingresos de los actores con el aumento de los costos de los servicios



ambientales para yacimientos grandes y pequeños



En esta figura observamos que en el caso de yacimientos gigantes, los ingresos de la empresa asociada y del estado no varía de manera importante, incluso si el costo de los servicios llega a ser hasta 32 dólares por barril. Sin embargo los ingresos de Ecopetrol disminuyen de forma importante, debido a la manera como se distribuye la producción de petróleo entre los actores. En

el caso de yacimientos pequeños la variación de los ingresos de los actores es bastante más sensible al aumento de los costos de los servicios ambientales. Sin embargo, por debajo de 3 dólares/barril, el ingreso de los actores no disminuye en forma considerable. Por lo tanto, es claro que un costo de protección del medioambiente del orden de 0,3453 dólares por barril no causará un cambio importante en los ingresos de los actores que participan en el negocio⁴² y por el contrario generará un gran beneficio en términos de protección del medio ambiente y el bienestar humano. Sin embargo, como veremos más adelante las inversiones necesarias en dólares por barril para sustituir las reservas de petróleo agotados si afectan notoriamente los ingresos de los actores.

A esta altura de la discusión y conociendo la forma de calcular cada uno de los valores de las depreciaciones para cada uno de los capitales, podemos estudiar como aplicar esta metodología para encontrar el monto de las inversiones necesarias en los diferentes tipos de capitales que permitirán implementar una extracción de petróleo que conduzca a una política energética sostenible.

A continuación proponemos hacer este ejercicio para dos tamaños de yacimiento, gigante y pequeño, cuyo costo de levantamiento por barril es de 6,5 dólares.

4. Una aplicación práctica: una política de producción petrolera enmarcada en un modelo de sostenibilidad energética.

Para analizar la aplicación de esta política, primero debemos calcular el indicador de sostenibilidad propuesto en la ecuación 2. Proponemos hacer este calculo para el caso de dos yacimientos: uno gigante (700 MMB) y otro pequeño(44,7MMB).

42 Obsérvese que los ingresos de los actores no se afectan de manera imporante incluso en el caso en que este valor llegue a triplicarse.

Para calcular el indicador de sostenibilidad proponemos introducir los costos y las depreciaciones presentados antes en el flujo de caja del proyecto petrolero. Así, para el cálculo de la depreciación del petróleo extraído proponemos utilizar la ecuación siguiente:

$$\delta_{NI} K_{NI} / Y_1 = \sum_{i=1}^n ((\delta_{NIi} * VE_i) / Y_1),$$

con $\delta_{NIi} = (1 / ((1 + t_{vp})^{ni+1}))$

Si consideramos que las reservas de petróleo agotadas pueden ser sustituidas por electricidad de fuentes renovables y por aceite de palma africana, el monto total de reservas substituidas puede ser calculado asumiendo los criterios siguientes:

- Eficiencia del proceso de conversión energético del combustible medido en kWh (η) igual a 27%

- Costos de electricidad renovable⁴³:

Tecnología de bajo costo = 0,0083 dólares/kWh.

Tecnología de mediano costo = 0,055 dólares /kWh.

Tecnología de alto costo = 0,167 dólares/kWh.⁴⁴

El cálculo de la substitución de reservas se hace a partir de la ecuación siguiente:

$$R_{Sub} = (100/R_{extr}) * K * (1/C_{ER}) * (1/bet)$$

Donde:

R_{Sub} : Porcentaje de reservas substituidas con respecto a las reservas de petróleo inicial.

43 Estos valores son asumidos después de estudiar varios reportes en los cuales se presentan costos para producción de energía eléctrica por diversas fuentes renovables. Entre estos reportes invitamos al lector consultar las siguientes fuentes : BIRRAUX M. C. LE DEAUT J.Y. (2001), L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables, Rapport No 3415 ASAMBLEE NATIONALE , No 94 SENAT. 348 p. Université de la Rioja, Iberdrola Ingeniería Consultoria (1998). *Projet : Opportunities For Biomass To Energy Projects In La Rioja (Spain) And Tuscany (Italy)*, :<http://www.unirioja.es/dptos/daa/web2/Temp/text/home.htm> (Page consultée avril 24 / 2002).

44 Todos estos valores se calcularon tomando como base un número total de horas igual a 262 800, que equivalen a 30 años.

Rextr : Reservas producidas.

K : Capital invertido en la sustitución.

C_{ER} : Costo de implementación del kW de energía renovable en un proyecto con 30 años de vida útil.

bet : equivalencia entre kW y barriles de petróleo y cuyo valor es igual a 450 kWh por barril de petróleo.

Así la ecuación para sustitución de reservas quedará de la forma siguiente :

$$R_{Sub} = 0,222 * K / (R_{extr} * C_{ER})$$

En el tabla 2 presentamos los resultados concernientes a las reservas substituidas y la cantidad de energía total (SET) para dos tamaños de yacimiento. Entendemos por reservas substituidas, el potencial de energía expresado en kWh implementado con las inversiones realizadas gracias al precio de depreciación del petróleo agotado. La cantidad energético total designa la suma de las reservas de petróleo substituidas y las reservas de petróleo bajo tierra para un horizonte de producción de 30 años. Los resultados que encontramos son los siguientes:

Tabla 2 Porcentaje de reservas de petróleo sustituidas por electricidad renovable y por aceite de palma para dos tamaños de yacimientos.

Yacimiento pequeño (44,7 MMB, costo de levantamiento 6,5 dólares/barril)	
Tipo de recurso sustituto	Reservas de petróleo substituidas (Porcentaje)
Electricidad renovable de alto costo (0,167)	14%
Electricidad renovable de mediano costo (0,055)	43%
Electricidad renovable de bajo costo (0,0083)	284%
Aceite de Palma	148%
Yacimiento Grande (670 MMB, costo de levantamiento 6,5 dólares/barril)	
Tipo de recurso sustituto	Reservas de petróleo substituidas (Porcentaje)
Electricidad renovable de alto costo (0,167)	10%
Electricidad renovable de mediano costo (0,055)	32%
Electricidad renovable de bajo costo (0,0083)	212%
Aceite de Palma	94%

Para el cálculo de las depreciaciones de los restantes capitales naturales y del capital humano proponemos introducir bajo la forma de costo un valor igual a 0,3453 dólares/barril⁴⁵.

Si calculamos el flujo de caja del proyecto petrolero introduciendo estos valores obtendremos que las inversiones necesarias para lograr una política energética sostenible son las siguientes:

Tabla. Montos a invertir para lograr una producción de petróleo que permita una política energética sostenible⁴⁶

Tamaño de Yacimiento	Monto a invertir (millones de dólares)				
	Sustitución de Petróleo por una Energía Renovable	Descontaminación Atmosférica	Protección Ambiental	Protección del Capital Natural Crítico	Protección del Capital Humano
Yacimiento Pequeño (44,7 MMB)	160 (3,57 US\$/bl)	0,1341 (0,003 US\$/bl)	9,834 (0,22 US\$/bl)	4,917 (0,11 US\$/bl)	0,671 (0,015 US\$/bl)
Yacimiento Gigante (670 MMB)	1314 (1,944US\$/bl)	1,791 (0,003 US\$/bl)	130,597 (0,22 US\$/bl)	65,299 (0,11 US\$/bl)	8,9042 (0,015 US\$/bl)

En esta tabla se observa claramente que la inversión mayor y la que afectaría de forma importante la rentabilidad del proyecto serían las inversiones en sustitución de reservas. La cifra entre paréntesis de la tabla 2 corresponde a la inversión necesaria en dólares por barril. Se puede constatar, a excepción del monto destinado a sustitución del petróleo agotado, que dichos montos son bastante bajos, pues se mantiene por debajo de 10 centavos de dólar por barril para todos los casos.

Estos resultados permiten ver que es posible implementar una producción de petróleo enmarcada en una política energética sostenible basada en el cuarto principio operacional propuesto por

45 Recordemos que este valor corresponde a la suma de inversión en capital humano $C_{SESB} = 0,015$ dólares/barril, costo de protección del capital natural crítico = 0,11, Costo de descontaminación por efecto de emisión de gases producto de la combustión del petróleo extraído $C_{gases/bpe} = 0,0033$ dólares por barril, Otros costos ambientales $C_{oca} = 0,217$ dólares por barril.

46 para dos tipos de yacimientos y un costo medio de levantamiento de petróleo igual a 6,5 dólares por barril.

Costanza y Daly(1992). Sin embargo la respuesta a la pregunta planteada en el título de este trabajo, será afirmativa o negativa dependiendo de:

- a) Los precios internacionales del petróleo.
- b) Los costos de instalación de un kWh de energía renovable
- c) Los criterios fiscales de los países
- d) El potencial de fuentes de energía renovable de estos mismos países.

El costo de inversión necesario para garantizar una explotación de petróleo en el marco de una política energética sostenible se puede implementar a partir de la creación de una tasa tal como la propuesta por Costanza (1992). Este resultado nos muestra que si se aplica este criterio, es decir si se introduce la tasa de agotamiento y los costos de reparación de los daños causados por el uso de los servicios ambientales, en el precio internacional del petróleo, los países mas favorecidos serán aquellos que pueden sustituir las reservas de petróleo por una fuente de energía renovable de bajo costo, tal como la electricidad de grandes proyectos hidroeléctricos o por aceite de palma africana o por otra fuente cuyo costo de sustitución sea del orden de 0,01 dólares por kWh. En este sentido, los países para los cuales las únicas opciones posibles son las energías renovables costosas, tales como la fotovoltaica, serán los más afectados ya que el sobre costo que deben pagar será muy elevado.

En el caso colombiano, un proceso de extracción durable es posible, si se reemplazan las reservas de petróleo agotadas por energía eléctrica de grandes hidroeléctricas teniendo en cuenta que el potencial hidroeléctrico colombiano es según la UPME de 93 GW. Este es un potencial que de ser desarrollado permitiría un consumo por habitante equivalente al que tiene Francia hoy, el cual es aproximadamente ocho veces mayor que el de Colombia.

Por último, es necesario precisar que los países latinoamericanos deben tratar de avanzar en la implementación de una gestión petrolera que se enmarque en una política energética sostenible que tome en cuenta no sólo la protección del medioambiente y la atenuación de los impactos económicos y sociales, sino también la sustitución de las reservas agotadas por fuentes de energía renovable. En este sentido podemos dividir los países de la región en dos grupos : países

como México y Venezuela poseedores de importantes reservas y el resto de países cuyas reservas son modestas.

En el caso de los países poseedores de grandes reservas, una política de explotación sostenible de los mismos es necesaria en aras de garantizar que la actual riqueza agotable pueda ser sustituida por otra que sea renovable. De otro lado, una política de este tipo estaría encaminada a hacer la economía del país lo menos dependiente posible del recurso petrolero. En el escenario actual de precios los países exportadores de petróleo pueden ya iniciar una política de extracción de petróleo enmarcada en una política energética sostenible si destinan una parte de su renta a proyectos de energía renovable. Teniendo en cuenta que tanto Venezuela como México tienen la industria petrolera organizada en forma vertical⁴⁷, ellos estarían en condiciones de disponer de una parte de la renta para financiar proyectos de sustitución del petróleo agotado por energías renovables.

En el caso de los países que disponen de reservas modestas, es fundamental tratar de mantener la política de extracción petrolera dentro de unos límites razonables; es decir, no pretender que las economías sean cada vez más dependientes de las exportaciones petroleras. Sería un gran error hacer de un recurso escaso y agotable el pivote central de la economía tal como la ha pretendido los últimos años el gobierno colombiano⁴⁸. Es necesario que la política petrolera de los países con reservas modestas se enmarque en una política energética global que tome en cuenta los criterios de sostenibilidad que hemos enunciado antes.

Finalmente, queremos señalar que aquel sueño de los años 70, de sembrar el petróleo, es posible hoy en el marco de una política energética sostenible tal como la que hemos presentado en esta ponencia. Es bastante evidente que una política petrolera basada en el paradigma del mercado puede ser óptima desde el punto de vista económico, pero puede llegar a ser bastante nefasta desde el punto de vista social, ambiental y de economía local.

47 Recordemos que PDVSA dispone de estaciones de servicio incluso al interior de los Estados Unidos y que PEMEX mantiene el monopolio de la distribución de productos al interior de México.

48 En efecto, como consecuencia del hallazgo de importantes reservas concentradas en pocos yacimientos, la política petrolera colombiana de los últimos 10 años se ha encaminado en este sentido. El gobierno central y la empresa estatal consideran que en un escenario optimista el país podría estar produciendo 1 500 000 barriles diarios para el año 2010, por esta razón han encaminado todos los esfuerzos a la flexibilización del modelo contractual colombiano, buscando atraer mayor capital privado a la actividad exploratoria en el país.

Conclusiones

En este trabajo hemos desarrollado una discusión sobre la posibilidad de implementar un programa de extracción de petróleo en el marco de una política energética sostenible desde el punto de vista de la conservación de la cantidad de energía. De otro lado, hemos propuesto un indicador de sostenibilidad a partir del cual se puede determinar si un programa de extracción de petróleo obedece a una estrategia energética sostenible. Hemos aplicado estas ideas con el fin de mostrar que es posible realizar un proyecto de extracción de petróleo basado en el cuarto principio operacional propuesto por Costanza y Daly (1992) si se cumplen las condiciones siguientes:

- Que el precio internacional del petróleo sea suficientemente alto para que garantice que el valor pagado por el costo de uso del petróleo agotado permita sustituir una parte importante de las reservas producidas.
- Que el costo de implementación del kWh de electricidad renovable sea suficientemente bajo como para garantizar la mayor sustitución de reservas posible.
- Que la utilización del medioambiente sea pagada, y que se hagan las inversiones necesarias para garantizar la protección del capital natural crítico.
- Si se quiere tener participación de capital privado en un proyecto de explotación petrolera, se debe garantizar un beneficio económico positivo y por lo tanto el precio de depreciación debe ser menor que aquel que hace cero su renta.
- Introducir la depreciación del petróleo en el flujo de caja de un proyecto petrolero permite saber si el ritmo de agotamiento del yacimiento es sostenible o no. En este sentido el precio de depreciación es un buen criterio de base para calcular el valor de la tasa aduanera propuesta por Costanza para los recursos no renovables.

- El precio del petróleo en el mercado internacional es inferior al precio que se debe pagar si tienen en cuenta tanto la depreciación del capital natural como los servicios del medio ambiente. Sin embargo, la magnitud de estos valores puede cambiar en función de las características geológicas del yacimiento.

- La aplicación del «principio de precaución» al agotamiento de recursos naturales puede expresarse como *el que agota paga la sustitución del recurso agotado*. Así, la aplicación de una tasa de agotamiento al petróleo buscará hacer efectivo el cuarto principio operacional de Costanza y Daly(1992) que consiste en limitar la extracción del petróleo a la tasa de creación de sustitutos energéticos.

- La energía hidroeléctrica de grandes centrales es, técnicamente hablando, la mejor opción, desde el punto de vista económico, para sustituir las reservas de petróleo agotadas, debido a que su costo de instalación es el más bajo. Así, para que las energías eólica y fotovoltaica sean opciones posibles, sus precios de instalación del kWh deben situarse alrededor 0,01 dólares. Sin embargo, si el precio internacional del petróleo aumenta de manera importante estas energías pueden ser opciones posibles. De otro lado, es importante aclarar que es necesario analizar el impacto que sobre el medioambiente pueden tener cada una de estas fuentes de energía, pues nuestro análisis toma en cuenta el solamente el aspecto económico. Así, el análisis del impacto sobre el medio ambiente puede llevar a que la opción más económica no sea la mejor.

En el caso de los países latinoamericanos es pertinente analizar las condiciones bajo las cuales se puede implementar un esquema de explotación petrolero enmarcado en una política energética sostenible. Este esquema debe permitir que aquellos países que son grandes productores puedan garantizar la sustitución de las reservas agotadas por energías renovables en el largo plazo. De otro lado, los países poseedores de reservas modestas deben evitar que éstas sean extraídas en un lapso de tiempo corto a fin de evitar que sus economías sean cada vez más dependientes de un recurso escaso y agotable. En este sentido, para estos países cobra vigencia aquella vieja consigna de sembrar el petróleo.

En el caso particular de Colombia, un programa de extracción sostenible de petróleo es posible si una parte importante de la renta petrolera que va al Estado se invierte en la construcción de grandes centrales hidroeléctricas y el cultivo de palma africana. Sin embargo, es necesario analizar el impacto ambiental de este tipo de proyectos antes de tomar cualquier decisión.

Finalmente la respuesta a la pregunta planteada en el título de este trabajo es afirmativa, pero es necesario estudiar el caso de cada país con el fin de evaluar el potencial de sus fuentes de energía renovable y de saber si sus costos permitirán la sustitución de petróleo agotado por electricidad renovable.

Bibliografía

- ALVAREZ C. G. (2000a), « Recursos, Paz y Desarrollo Sostenible », Segundo Congreso Universitario por la Paz, Santa Marta, 10 p.
- ALVAREZ C. G.(2000), *Economía y Política Petrolera*, INDEPAZ/USO/UNIVERSIDAD NACIONAL, Santa fé de Bogotá, 207 pp.
- AMIX J,BASS D. M. and WHITING R.L. (1960), *petroleum Reservoirs Engineering : physical properties*. New York Toronto London, McGraw-Hill, 610 p.
- AMUNDSEN (1992), *Théorie des Ressources épuisables et rente pétrolière, économique*, Paris, 245 p.
- ANGELIER J. P. (1976), *La Rente Petroliere: Eléments pour une interprétation théorique de la structure des prix des produits de l'industrie pétrolière internationale.*, Editions du centre National de la Recherche scientifique, Paris, 162 p.
- AUTY R.M.(1990), *Ressource –Based Industrialization*, Clarendon press Oxford, New York 294p.
- AYOUB A.(1993), *Le pétrole: Economie et Politique* , Cahier 93-11, Groupe de Recherche en Economie de l'énergie et des ressources naturelles (GREEN), Université de LAVAL, QUEBEC- CANADA. 33p.
- BARNETT H J., MORSE C. (1963), *Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resource Availability*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, for Resources for the Future.
- BRUNDTLAND G. H. (1992), *Nuestro futuro común*, Comisión Mundial del medio Ambiente y del Desarrollo. 84-206-9574-2.
- CABRERA G.M. (2000), GONZALEZ J.I., *El desmanejo de la deuda pública : informe preparado para la Contraloría General de la República*, 41p.
- COSTANZA R. (1992), *Three General Policies To Achieve Sustainability*, Second Conference of the International Society for Ecological Economics (ISEE), "Investing in Natural Capital," Stockholm, Sweden, August 3.
- COSTANZA R. DALY H. E. (1992), "Natural Capital and sustainable development " *Conservation Biology*, vol 6. No 1, p 37-46.
- COSTANZA R (1994) "Three general policies to achieve sustainability », in line <http://dieoff.org/> [page consultée 13 mars 2001].

- DALY H.E.(1986), « Thermodynamique and Economic concepts as related to resource use policies», *Land Economics* Vol. 62 (3), 319-322.
- ECOLOGICAL ECONOMICS (1997), "Forum on Gesurgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz". 22 (3) Septembre.
- EL SERAFY S (1989), «The proper calculation of income from depletable Natural resources, Environmental accounting for sustainable development », in Environmental accounting for sustainable development, The world Bank, Washington D.C., , pages 10-18.
- FAUCHEUX S., NOËL J.F. (1995), «La Théorie des Ressources Epuisables: Chapitre 3 » In *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*, Paris, Armand Colin, 87–122.
- GEURGESCU-ROEGEN N. (1971), La ley de la entropía y el proceso económico, en Economía, Ecología y Ética, Daly H. (compilador), 1980, Fondo de Cultura Económica/Economía contemporánea, México, 1989, p 61-72.
- GODARD O. (1994), Le développement durable : paysage intellectuel, in *Natures - Sciences - Sociétés*, 1994, 2, 14p.
- GRAY, L.C. (1914), "Rent under the Assumption of Exhaustibility". *Quarterly Journal of Economics*, 28, 466-489
- HARTWICK J.M. (1977), «Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources», *American Economic Review*, vol 67, no 5, pp.972-974.
- HOTELLING H. (1931), «The Economics of Exhaustible Resources». *Journal of Political Economy*, 39, 137-175.
- KRAUTKRAEMER J, (1998), «Nonrenewable resources scarcity », *Journal of Economic Literature*, Vol XXXVI, pages 2065-2107.
- LAHERRERE J. (2000), « Vers un déclin de la production Pétrolière », *Colloque énergie et développement durable*, Bruxelles, 2000.
- MARTINEZ Alier. J. (1997) « Deuda ecologica y deuda externa», *Economia Politica* No 14, Septembre.
- MEADOWS D., RANDERS J (1972),*The Limits to growth*. Universe books, New York.
- NAREDO J.M., VALERO A (1999), *Desarrollo Económico y Deterioro Ecológico*, Fundación Argentaria, Madrid.
- NOËL J. F.(2000), Le capital naturel un nouvel objet des politiques environnementales, Institute national des Sciences et Techniques Nucléaires : Univesité de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.
- NOËL J.F., O'CONNOR M. (1998), «Strong Sustainability and Critical Natural Capital», in Faucheux S., O'connor (ed) valuation for Sustainable Development, Edward Elgar Cheltenham.
- PEARCE D. (1998) «Capital theory and measurement of sustainable development : an indicator of 'weak' sustainability » in : *Essays on Ecological Economics and Environment* Edward Elgar, 220 p
- PEARCE D. And TURNER R. K. (1990), *Economics Of Natural Resources and the Environment*, New York, Harsvester Wheatsheaf, 308 P.
- PEZZEY J., Economic Analysis of Sustainable Growth and Sustainable Development, Environment Department Working Paper n'15, World Bank, Washington DC, 1989.
- PRUGH T.(1999), Natural Capital and Human Economic Survival, Ecological Economics series, Florida.
- SALMI J. (1996), «Economics of sustainability: Neoclassical Viewpoint», *Seminar on environmental, economics*, University Helsinki, janvier. [En ligne]. <http://www.hkkk.fi/oppimateriaali/semmat/sus.html> (page consultée le 12 janvier 2000).
- SOLOW R.(1974),"Intergenerational Equity and Exhaustible Resources", *Review of economic studies (Symp.)*, 1974, pp.29-46.
- VICTOR P. A. (1991), "Indicators of sustainable development: some lessons from capital theory "*Ecological Economics*, vol 4., p 191-213.