



# UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN DINÁMICA DE EXPLORACIÓN DE PETRÓLEO PARA LA ECONOMÍA BOLIVIANA

*S. Marcelo Olivera V.♦  
Francisco Pablo Grigoriu♦♦*

## ABSTRACTO

*El presente trabajo realiza una primera aproximación al análisis de la consistencia de las políticas de explotación petrolera realizadas por el Estado boliviano, bajo el marco regulatorio del sector de hidrocarburos vigente en Bolivia. Para tal efecto, se usan herramientas del modelaje de Sistemas dinámicos y datos históricos de la extracción y exploración de hidrocarburos.*

- 
- ♦ Licenciado en Ciencias Económicas de la Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba – Bolivia, Master of Arts in Economics de la Pontificia Universidad Católica de Chile y Doctorante en el Postgrado de Economía de la Universidad Nacional Autónoma de México.
  - ♦♦ Licenciado en Ciencias Económicas de la Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba – Bolivia, especialista en Macroeconomía Aplicada y Magíster en Economía de la Pontificia Universidad Católica de Chile.



## **I. Introducción**

Es difícil imaginar el funcionamiento de la economía sin considerar el manejo y uso de sus recursos energéticos. Para Bolivia la producción de petróleo representa más de las tres cuartas partes de sus recursos energéticos por lo que desarrollar una política adecuada de exploración, prospección, extracción, transporte, refinación y distribución es fundamental.

El presente trabajo se limita a analizar las primeras 2 etapas de este proceso a través de la utilización de herramientas brindadas por el modelaje de sistemas dinámicos y bases de datos históricos de la producción de petróleo.

Para tal efecto el trabajo se divide en dos partes. En la primera se desarrolla un modelo de optimización dinámica de la extracción óptima de petróleo recurriendo a algunos supuestos simplificadores que permiten manejar lo complejo del tema pero simultáneamente llegar a conclusiones que muestran el comportamiento aproximado de las variables, las formas funcionales y sus posibles implicancias. Los modelos usados en este caso son el modelo de Pindick (1978) y el modelo de Grigoriu – Olivera (2002).

En la segunda parte, se intenta a través de datos empíricos desarrollar el modelo para Bolivia. Lamentablemente la falta de información impide obtener una solución puntual, sin embargo, se realizó una aproximación de la evolución de las variables estudiadas, extracción de petróleo, descubrimientos de yacimientos, reservas acumuladas, y esfuerzos de exploración en el tiempo.

Así en la parte final del trabajo se confrontan los resultados obtenidos con las estrategias de explotación aplicadas por el Estado boliviano y se evalúa la consistencia de las mismas.

La conclusión a la que se arriba es que la política de reducción impositiva cumple con su primer objetivo, atraer inversión extranjera para la exploración petrolera, para así poder certificar las reservas de petróleo en el territorio boliviano.

## **II. Un Modelo Matemático para la Extracción Óptima de Petróleo**

La utilización óptima de petróleo en un país requiere un conocimiento adecuado de los flujos (entendidos como ofertas) y demandas energéticas de la economía que son

cubiertas por esta fuente de energía. Desde este punto de vista, los modelos son una potente herramienta de trabajo que permite manejar eficazmente las políticas de extracción y consumo de este recurso no renovable. El modelo será interpretado desde la perspectiva de un planificador central.

En el presente trabajo se modelará el problema como un proceso de optimización, siendo el objetivo maximizar una función indicadora de eficiencia social. Para simplificar la complejidad del sistema se toman los siguientes supuestos:<sup>1</sup>

Las reservas de petróleo conocidas dependen del esfuerzo de exploración y de la extracción, ambas consideradas variables de control.

Definiéndose:

**R(t)** = Reservas conocidas en el momento t.

**D(t)** = Descubrimientos acumulados desde el momento cero hasta el momento t

**q(t)** = Extracción del recurso en t

**X(t)** = Esfuerzos de exploración en t

Se supondrán las siguientes relaciones:

$$D'(t) = F(x, D); f_x > 0; f_D < 0; D(0) = D_0$$

Esta relación indica que mientras mayor sea el esfuerzo de exploración, mayores serán los descubrimientos, y mientras más se haya descubierto, más difícil es descubrir nuevas reservas. Para simplificar, se supondrá:

$$D'(t) = F(x, D) = aX^d - \beta D$$

$$a > 0 \quad d < 1 \quad \beta > 0$$

---

<sup>1</sup> Basado en el artículo de Robert S. Pindyck: "The Optimal exploration and Production of Nonrenewable Resources", Journal of Political Economy, 1978, Vol. 86, N°5. Pp. 841-857 y en el libro de Gonzalo Edwards G. Introducción al Análisis de Sistemas Dinámicos, Ediciones Universidad Católica de Chile, 2000.

Donde Alfa ( $\alpha$ ) es un parámetro de comportamiento que representa la relación existente entre los esfuerzos de exploración y el hallazgo de nuevos pozos petroleros, elevado a un exponente ( $d$ ) mayor-igual que uno representando la acumulación de conocimiento y el aprendizaje en el proceso de exploración y prospección. Beta ( $\beta$ ) representa la reducción de probabilidades de encontrar nuevos pozos petroleros a medida que se hacen nuevos descubrimientos.

Como las reservas conocidas aumentan según los nuevos descubrimientos y disminuyen conforme se vaya extrayendo el petróleo, dada una reserva inicial, esto se puede escribir:

$$R'(t) = D'(t) - q(t)$$

$$R(0) = R_0$$

$$R_D > 0$$

La función objetivo ó de eficiencia social se restringirá al sector productor de petróleo quedando fuera del análisis el refinado del mismo. El excedente del productor es la función a ser maximizada, entendida como la diferencia entre los ingresos y costos totales de la extracción del recurso no renovable.

Para la especificación del modelo se toman los siguientes supuestos:

El **precio del producto** se toma como una función exógena<sup>2</sup>:

$$P(t) = 40 - 1.2Q(t) - 0.8S(t-1) + 8D_u + \varepsilon(t)$$

Donde :

**P(t)** = Precio del barril en dólares

**Q(t)** = Producción Mundial en Millones de Barriles

**S(t)** = Stock Mundial de petróleo expresado en millones de barriles

**Du** = Representa una Variable Dummy que toma el valor 1 cuando hay crisis en el medio oriente y 0 cuando no hay.

**$\varepsilon$  (t)** = Es La variable estocástica.

---

<sup>2</sup> Modelo extraído del trabajo empírico de José Antonio Ortega, Universidad Autónoma de Madrid, noviembre del 2000.

Todos los estimadores de los parámetros son significativos tanto individual como globalmente al 95 % de nivel de confianza, teniendo un  $R^2 = 0.85$  y una desviación standard de 1.5<sup>3</sup>

Los **costos relevantes** a ser considerados en el modelo son Costos de exploración, perforación, extracción y transporte.

La función de costos de exploración:

$$C_{xp} = \alpha + bX^h(t)$$
$$a > 0 \quad b > 0 \quad h > 0 \quad h < 1$$

Lo cual muestra que una unidad adicional de exploración es cada vez más barata, por la existencia de aprendizaje en el proceso de exploración.

El costo de perforación:

$$C_{pf} = z \cdot M$$

Especificación que muestra una relación lineal directa ( $z$ ) entre el costo y la cantidad de metros perforados (profundidad  $M$ ).

El costo de extracción en cualquier momento del tiempo varía inversamente con el nivel de reservas conocidas.

$$C_{xt} = w/R(t) \cdot q(t)$$

Esto implica que cuando las reservas tienden a cero, se hace restrictiva la producción ya que el costo tendería a infinito, quedando sin aprovechar una parte del yacimiento. Se debe destacar que esta especificación supone un costo medio de producción que no varía según el nivel de extracción.

Costo de transporte: se considera que el mismo es una proporción fija del nivel de producción:

$$C_{tt} = g \cdot q(t)$$

---

<sup>3</sup> El modelo toma como restricción el nivel de cuotas de producción de la OPEP, las cuales mantienen el nivel de precios en un rango que fluctúa entre los 23 y 28 dólares por barril (Brent). De acuerdo a estudios empíricos, si se supera el límite superior en el largo plazo surgen incentivos a desarrollar sustitutos para los combustibles fósiles.

La función de costos por construcción es cóncava, originando un conjunto de posibilidades convexo, lo cual implica que las condiciones de segundo orden para la optimización de beneficios para un máximo se cumplen.

- I. El horizonte de tiempo es fijo e igual a  $T$
- II. La tasa de descuento ( $r$ ) es la tasa social de largo plazo.
- III. El valor residual es cero, ya que la existencia de un residuo de petróleo en el subsuelo no tiene “*valor perse*” por su alto costo de extracción.
- IV. La producción no puede ser mayor que un  $q^{Max}$ , cantidad máxima en un momento dado, debido a las restricciones dadas por la tecnología disponible.
- V. El esfuerzo de exploración no puede ser mayor que un  $X^{Max}$ , ya que un esfuerzo superior a este límite deteriora la rentabilidad del proyecto.

Las definiciones y supuestos anteriores implican el siguiente proceso de Control Óptimo, es decir, la maximización del beneficio neto de la explotación de recursos no renovables para la sociedad, entendido como la diferencia entre los ingresos y costos totales:

$$MAX \cdot J = \int_0^T \left\{ \left[ P(t) * q(t) - \left( a + bX^h(t) + z * M + \left( \frac{w}{R(t)} * q(t) \right) + g * q(t) \right) \right] \right\} * e^{-rt} dt$$

Sujeto a:

$$D'(t) = F(x, D) = \alpha X^d - \beta D$$

$$R'(t) = D'(t) - q(t)$$

$$R'(t) = \alpha X^d - \beta * D - q(t)$$

$$R(0) = R_0$$

$$D(0) = D_0$$

$$0 \leq q(t) < q^{MAX} \quad 0 < X(t) < X^{MAX}$$

$$\alpha > 0; d > 1, \beta > 0, w > 0, g > 0, a, b, h > 0; h < 1, z > 0$$

Este es un problema de control óptimo sin restricciones terminales con dos variables de estado,  $D(t)$  y  $R(t)$ , que describen la situación del sistema en cada momento, y dos variables de control,  $q(t)$  y  $X(t)$ , acompañadas de dos variables de co-estado  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  que muestran la disposición a pagar por una unidad más, es decir representan los precios sombra del impacto sobre beneficios futuros de tener una unidad menos de petróleo por ser extraída en el presente, así como los beneficios futuros por descubrir una unidad mas de petróleo, respectivamente.

El Hamiltoniano Spot<sup>4</sup> resultante será:

$$H = \left\{ P(t) * q(t) - \left( a + bX^h(t) + z * M + \left( \frac{w}{R(t)} * q(t) \right) + g * q(t) \right) \right\} + \lambda_1 (\alpha X^d - \beta D) + \lambda_2 (\alpha X^d - \beta D - q(t))$$

Las condiciones de primer orden son:

$$1. \rightarrow \frac{dH}{dq(t)} = Pt - \left( \frac{w}{R(t)} \right) + g - \lambda_2 = 0$$

$$2. \rightarrow \frac{dH}{dX(t)} = - (bX^{h-1}) + (\lambda_1 + \lambda_2) (\alpha X^{d-1}) = 0$$

$$3. \rightarrow \frac{dH}{dD(t)} = [w q(t) * R_D / R^2(t)] - \beta \lambda_1 + \lambda_2 = - \Delta(t) + r \lambda_1$$

$$4. \rightarrow \frac{dH}{dR(t)} = [w q(t) / R^2(t)] = - \Delta(t) r \lambda_2$$

$$5. \rightarrow \frac{dH}{d\lambda_1} = \alpha X^d - \beta D = D'(t)$$

$$6. \rightarrow \frac{dH}{d\lambda_2} = \alpha X^d - \beta D - q(t) = R'(t)$$

$$7. \rightarrow R(0) = R_0$$

$$8. \rightarrow D(0) = R_0$$

<sup>4</sup> Se considerara el siguiente símbolo como el hamiltoniano Spot (**H**), es decir el proceso de optimización en un momento o punto dado, en general todo los símbolos con subrayado en onda son Spot



Nota:  $\lambda(t) = \underline{\lambda}(t) e^{-rt}$  en 3 y 4 la expresión  $-\Delta(t) + r \lambda_1$  representa la primera derivada de Lambda con respecto al tiempo, donde Lambda es un vector columna de dos miembros. Lambda 1 en relación a los nuevos descubrimientos y Lambda 2 con respecto a la extracción de petróleo.

9.  $\lambda_1(T) = 0$  El Limite de lambda 1 cuando T tiende a infinito es cero

$\lambda_2(T) = 0$  El Limite de lambda 2 cuando T tiende a infinito es cero

De la ecuación 1.- podemos apreciar que el beneficio marginal de extraer una unidad mas de petróleo está dado por los tres primeros términos de la ecuación, siendo el miembro restante el costo marginal de uso del recurso, que representa los sacrificios para la sociedad por extraer una unidad más de petróleo  $\lambda_2$ .

En la ecuación 2.- observamos que el primer término indica el beneficio marginal de la sociedad por explorar una unidad adicional de superficie, y el segundo término el costo marginal de uso incurrido al realizar la exploración, pudiendo el mismo dividirse entre los costos de exploración y los costos a futuro por extracción de petróleo.

De 3, obtenemos la ecuación de arbitraje la cual compara el retorno alternativo de la inversión (invertida en el mercado) con los retornos obtenidos en el proyecto de exploración de nuevos yacimientos petrolíferos. El cual en el fondo nos indica si vale la pena o no invertir en exploración.

$$[w q(t) \bullet R_D R^2(t) \lambda_1] - (\beta \lambda_1 + \lambda_2) / \lambda_1 + \Delta(t) / \lambda_1 = r$$

Representa el beneficio neto por los nuevos descubrimientos

Beneficios o pérdidas por disminuir los descubrimientos a futuro

Retorno por ganancia o pérdida de capital en el proceso de exploración

Tasa de interés social de largo plazo, con la que se realiza la comparación

De 4, obtenemos la ecuación de arbitraje en la que se estima si es o no rentable extraer petróleo.

$$\left[ w \frac{q(t)}{R^2(t)} \lambda_2 \right] + \frac{\Delta(t)}{\lambda_2} = r \rightarrow$$

↓

Representa el beneficio neto de extraer una unidad mas de petróleo.

↓

Retorno por ganancia o pérdida de capital en el proceso de extracción.

→

Tasa de interés social de largo plazo, con la que se realiza la comparación

Las ecuaciones 5 y 6 fueron definidas con anterioridad, mostrando el comportamiento de las reservas y los descubrimientos de petróleo en relación con el tiempo. Las ecuaciones 7 y 8 muestran los puntos de partida y restricción de las reservas y descubrimientos. La ecuación 9 muestra que las variables de co-estado, en el límite cuando el tiempo tiende a infinito, son cero.

Si la derivada respecto a cualquiera de estas dos variables de control, extracción y esfuerzos de exploración, es positiva, el óptimo se logra cuando dicha variable toma su máximo valor posible  $Q^{Max}$  ó  $X^{Max}$ . La primera condición estará dada por la tecnología y capacidad técnica instalada y la segunda por los retornos que proporciona invertir en la exploración y prospección de nuevos yacimientos.

El estado estacionario del sistema de explotación de recursos no renovables, no existe como tal, es decir no existe un óptimo sostenible de extracción en el tiempo debido a que por definición el recurso una vez utilizado es destruido, el óptimo se logra cuando la variable de control toma el valor mínimo, que en este caso es cero o cercano a cero.

Uno de los resultados que más se debe destacar, es que cuando las reservas se hacen muy pequeñas, el beneficio de extraer mas petróleo se torna negativo por lo que ya no conviene seguir extrayendo petróleo, dejando siempre un remanente en reserva. Por otra parte cuando  $t$  tiende a  $T$ , el beneficio de explorar también se vuelve negativo, por lo que se deja de explorar antes de que las reservas se agoten.

### III. Una Aproximación Empírica para Bolivia

Bolivia con más de ocho millones de habitantes, tiene un consumo per cápita de 766 (Kg. de petróleo equivalente -1997)<sup>5</sup>, en relación a 1600 (Kg. de petróleo equivalente -1997)<sup>6</sup> de consumo per cápita del continente. Su principal fuente de energía es el petróleo, que cubre el 81% de los requerimientos energéticos, y la energía hidroeléctrica con el 18 %, por lo que las demás fuentes de energía no tradicional son marginales en su uso.

<i>Consumo de energía por sector económico en porcentajes - 1997</i>	<i>Bolivia</i>	<i>Sudamérica</i>
Sector industrial	29	37
Transporte	35	33
Aéreo transporte	5	2
Transporte terrestre	29	29
Agricultura	2	5
Comercio y servicios públicos	2	5
Residencial	32	20

<sup>7</sup> Base de datos del World Resources Institute WRI, actualizada al año 2002

El consumo de energía por sector económico muestra una importancia relativamente mayor en el sector transporte y residencial con respecto al consumo de energía del continente. La producción de hidrocarburos representa el 5 % del Producto Interno Bruto del país.

<i>Comercio de energía – 1997 Medido en TOE<sup>8</sup></i>	<i>Bolivia</i>	<i>Sudamérica</i>
Importaciones de energía	244	91,009
Exportaciones	1,918	236,800

<sup>9</sup> Base de datos del World Resources Institute WRI, actualizada al año 2002

<sup>5</sup> Base de datos del World Resources Institute WRI, actualizada al año 2002

<sup>6</sup> Base de datos del World Resources Institute WRI, actualizada al año 2002

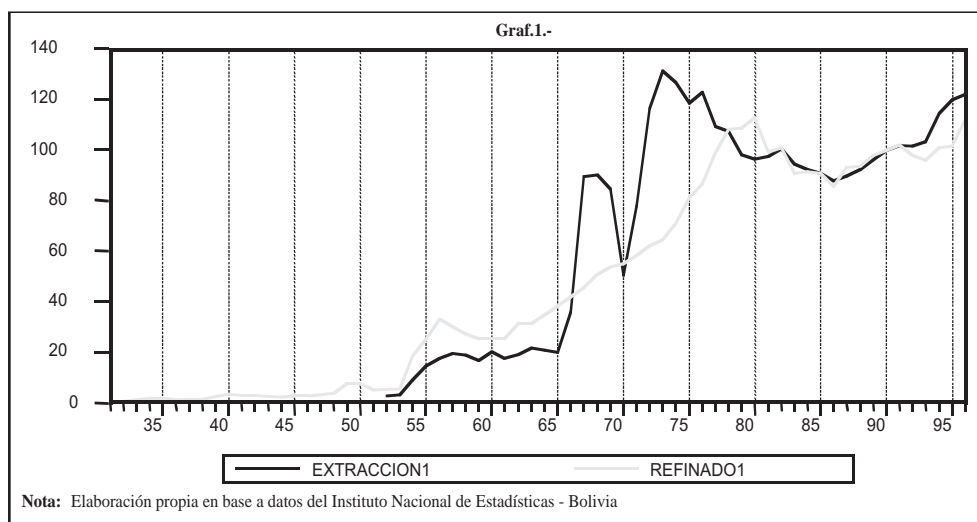
<sup>7</sup> ídem anterior

<sup>8</sup> Un TOE es equivalente a 41.868 gigajoules

<sup>9</sup> ídem anterior

En el comercio de energía, Bolivia es un exportador neto, siendo la energía hidroeléctrica y el gas natural sus principales productos de exportación, el producto energético importado es el diesel, esto debido a las características del petróleo liviano extraído en los yacimientos petroleros bolivianos. Lo cual convierte a Bolivia en un país que se autoabastece de recursos energéticos, en especial petróleo.

Como se ve en el gráfico 1.-



Históricamente Bolivia ha extraído casi todo el petróleo que refina y consume; si se observa el gráfico, se puede apreciar que durante la década comprendida entre 1965 y 1975, el shock externo generado por la creación del Cartel del Petróleo propició una mayor extracción de petróleo. Cabe recalcar que durante esta década, las extracciones del petróleo se realizaban por empresas multinacionales.<sup>10</sup>

La política de extracción del Estado boliviano tradicionalmente ha tratado de satisfacer la demanda interna de derivados de petróleo y tiene como objetivo cubrir las necesidades internas el mayor plazo posible, con la finalidad de que la volatilidad de los precios internacionales no afecte la economía. En la anterior sección, se vió que un conflicto en el medio oriente eleva el precio del petróleo en un promedio de 8 dólares por barril.

<sup>10</sup> El principal incentivo de las empresas multinacionales es maximizar la explotación y con ellas el beneficio de la empresa y no así del país.

Así, desarrollar una política de extracción y consumo de este recurso no renovable, es vital para la economía boliviana. El presente trabajo pretende realizar una primera aproximación analítica - basándose en el modelo matemático visto en la anterior sección -, de la coherencia de las políticas de extracción y exploración aplicadas a los yacimientos petrolíferos bolivianos.

### **La Atracción de Inversiones Petroleras en la Legislación Boliviana.**

La explotación de los recursos petroleros del país, genera ingresos directos al Tesoro General de la Nación - TGN, de acuerdo a lo establecido en la ley de hidrocarburos en su siguiente artículo:

*“Artículo 50\*. La participación de YPFB y las regalías correspondientes, a que se refiere el inciso e) del artículo 18 de esta Ley, serán como sigue:*

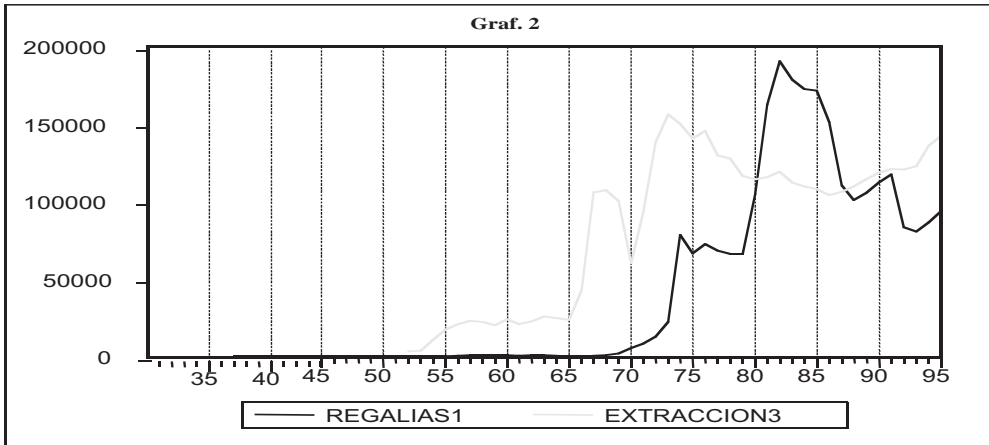
*1. Una participación departamental, denominada regalía, equivalente al once por ciento (11%) de la producción bruta de los hidrocarburos en boca de pozo, pagadera en beneficio del departamento donde se origina la producción.*

*2. Una regalía nacional compensatoria del uno por ciento (1%) de la producción bruta de los hidrocarburos en boca de pozo, pagadera a los departamentos de Beni y Pando, de conformidad a lo dispuesto en la Ley N°981 de 7 de marzo de 1988.*

*3. Una participación en favor de YPFB del seis por ciento (6%) de la producción bruta de los hidrocarburos en boca de pozo, que será transferida al Tesoro General de la Nación, luego de deducir el monto necesario para cubrir el presupuesto aprobado de YPFB para la administración de los contratos. “*

En la gráfica 2.- se puede apreciar la relación que existe entre la explotación y las regalías generadas en la última década, con la finalidad de incentivar la exploración y explotación de petróleo y gas natural, Bolivia ha desarrollado una estrategia de reducción de las regalías. Estas políticas intentan ser consistentes con la estrategia estatal de explotación

de petróleo<sup>11</sup>, que trata de mantener la calidad de exportador neto el mayor tiempo posible.



Fuente: elaboración propia

Estas reducciones se pueden apreciar en los artículos 18° y 72° de la ley de hidrocarburos, que determina una regalía de 18 % de la producción fiscalizada a boca de pozo, para las explotaciones nuevas (después de promulgada la ley) y una regalía del 50 %, para las explotaciones antiguas.

En referencia a incentivar nuevas exploraciones, el artículo 8° de la ley de hidrocarburos y la ley de inversiones de septiembre de 1990, permiten al Estado boliviano encarar en forma conjunta -a partir de un contrato de riesgo compartido que devuelve parte de los costos de exploración- con empresas nacionales y extranjeras la exploración de todo el territorio nacional basándose en derechos de explotación obtenidos en un proceso de licitación pública, pagando un monto fijo por hectárea explorada. Este monto puede considerarse despreciable en comparación a los costos de exploración como tales<sup>12</sup>.

<sup>11</sup> La política de extracción de gas natural, persigue el objetivo de que los volúmenes de exportación sean lo mas elevados posibles.

<sup>12</sup> Los costos definidos por el artículo 47 de la ley de hidrocarburos determinan un pago de Bs. 2 (0,28 Dólares al tipo de cambio actual) por hectárea. Este monto se cobra en moneda nacional y no tiene ningún tipo de indexación con lo que el valor real de este costo tiende a decrecer por efectos inflacionarios.

El modelo desarrollado en la anterior sección tenía como elemento primordial de análisis la estructura de costos y beneficios del proceso de prospección, exploración y extracción de petróleo. En el desarrollo del modelo empírico para Bolivia se tuvo la limitante dada por la carencia de información sobre los costos de exploración y extracción como tales, por lo que no se pudo determinar un resultado puntual para el modelo. Esta restricción no impide obtener resultados y conclusiones sobre la consistencia de las políticas de extracción de petróleo en Bolivia.

### **Análisis Empírico.**

Podemos analizar los resultados desde dos perspectivas:

I. *Desde un punto de análisis empírico*, se estimó<sup>13</sup> los parámetros de las correspondientes formas funcionales definidas en el acápite anterior, siendo estas:

- ✓ En la ecuación de comportamiento de los precios del Petróleo<sup>14</sup>. Bolivia, dados sus niveles de producción, es incapaz de influir en la determinación de este precio por lo que se lo toma como una variable exógena.
- ✓ Los costos de prospección y exploración no fueron posibles de estimar debido a que la información no se encuentra disponible para uso público, estas operaciones son realizadas por empresas transnacionales. El único costo posible de estimar fue el costo por el derecho a explorar, pagado por hectárea, que como se analizó es despreciable<sup>15</sup>
- ✓ Los costos de perforación fueron estimados a través de un análisis de corte transversal, el valor obtenido para el parámetro  $z$ , es de 649,6 dólares por metro perforado en promedio, con un error estándar de 23.4 y un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.51, este ajuste es adecuado considerando que se trata de un análisis de corte transversal.
- ✓ El costo de extracción no fue determinado por falta de información la cual no se encuentra disponible para uso público, estas operaciones son realizadas por empresas transnacionales

---

13 Se uso métodos econométricos de series de tiempo y corte transversal para la estimación.

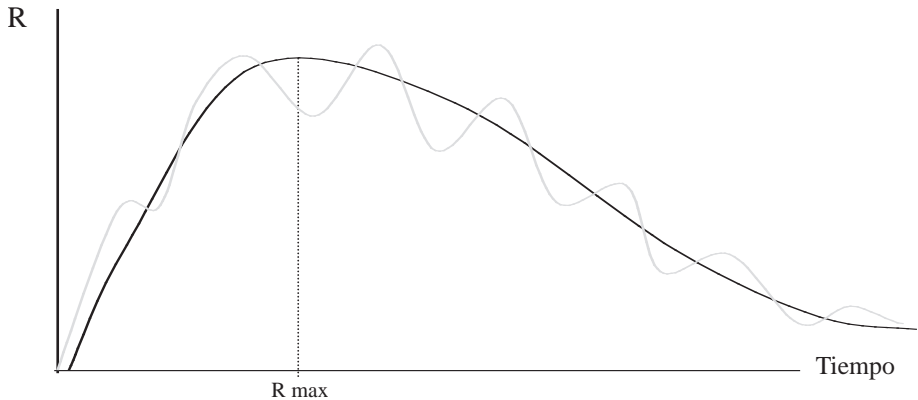
14 La misma fue analizada en la sección anterior.

15 Ver nota al pie de pagina 12

- ✓ El costo de transporte de petróleo sigue una modalidad de estampilla, es decir, se paga por volumen transportado y no por distancia recorrida, este precio es fijo y es de 41 centavos de dólar por m<sup>3</sup> transportado<sup>16</sup>
- ✓ La tasa de descuento relevante para el modelo, es la tasa de interés social de largo plazo del país, 13.7 % anual.<sup>17</sup>
- ✓ Las restricciones finales de las reservas de petróleo serán definidas por la tecnología de extracción, las mismas tenderán a cero y para simplificar el análisis se considera que tiene un valor residual de cero.

II. *El análisis teórico de la tendencia de largo plazo* de las variables de estado y control nos da luces sobre el comportamiento de estas variables a futuro. Analizaremos en forma gráfica el comportamiento de las mismas, lamentablemente no se puede corroborar la información teórica con la empírica para el caso de Bolivia, ya que existe una limitación de datos, pero estas reflejan procesos de extracción de recursos no renovables en otros países.<sup>18</sup>

- ✓ Reservas de petróleo (R) y su comportamiento en el tiempo



$$R = f(Q, D)$$

$$R'(t) = D'(t) - q(t) = ax^d - BD - Q(t)$$

<sup>16</sup> La empresa encargada de realizar este servicio es Transredes, que se beneficia del poder monopólico asignado por ley.

<sup>17</sup> Datos obtenidos de la Unidad de Análisis de Política Económica UDAPE

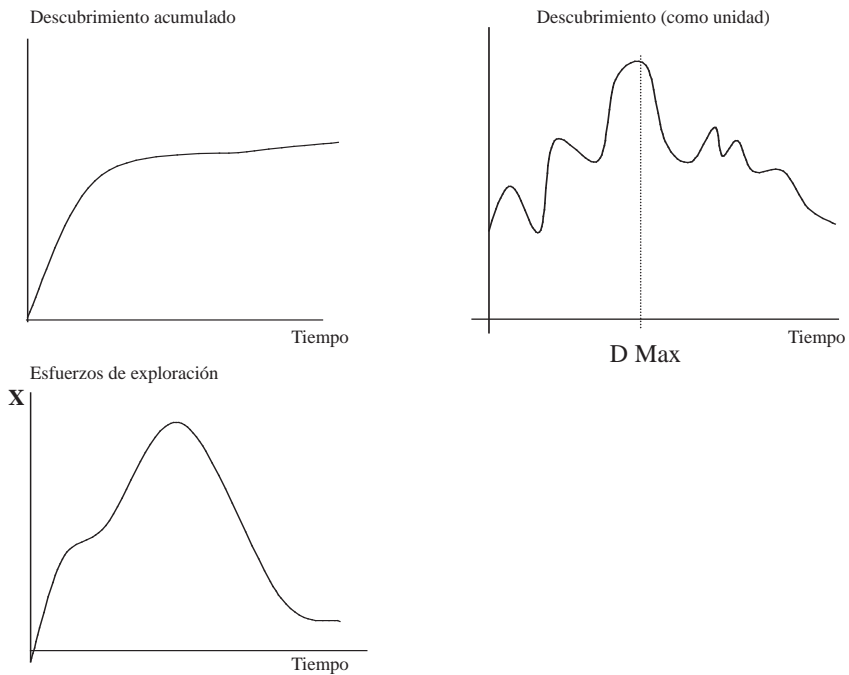
<sup>18</sup> La información teórica fue extraída y adaptada al caso de petróleo del libro Conrad, C y C. Clark.(1987) Natural Resource Economics:Notes and Problems. Cambridge University Press



Las reservas dependen de dos variables; los descubrimientos y la extracción. En el momento cero se tiene cero reservas, mientras más esfuerzos de exploración y descubrimientos se realizan, estas aumentan hasta llegar a un máximo ( $R^{MAX}$ ) a partir del cual las reservas van disminuyendo gradualmente como consecuencia de que cada vez es más difícil descubrir nuevos yacimientos. El comportamiento de las reservas es errático ya que los descubrimientos no son constantes y pueden presentar fluctuaciones considerables.

Una política encaminada a optimizar el proceso de extracción es aquella que fomente los esfuerzos para llegar a este nivel de reservas máximo porque a partir de ese punto, se puede optimizar la extracción a futuro de manera más consistente, sin tener la incertidumbre de estar sub o sobre utilizando el recurso.

✓ Descubrimientos de petróleo (D) y su comportamiento en el tiempo



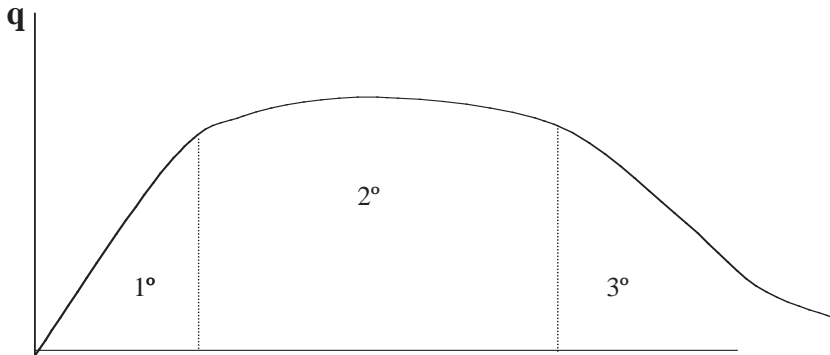
Los descubrimientos en un principio parten de cero y se van acumulando hasta converger con la cantidad de reservas finales (la dotación dada por la naturaleza) que existían en un

territorio dado; los descubrimientos son erráticos y su probabilidad de ocurrencia va cambiando en el tiempo. En una primera etapa los descubrimientos aumentan gradualmente debido a que predomina el efecto aprendizaje sobre el efecto escasez, hasta llegar a un máximo a partir del cual se impone el efecto escasez y el promedio de descubrimientos disminuye.

El esfuerzo de exploración tiene como aliciente la probabilidad de grandes descubrimientos en una primera etapa, los esfuerzos se ven atenuados en una segunda etapa, donde ya gran parte del territorio ha sido explorado, bajando la probabilidad de nuevos descubrimientos.

En el caso empírico de Bolivia las políticas de contratos de riesgo compartido y venta de derechos de exploración con bajos precios de mercado, van encaminadas a incentivar el incremento en la cantidad de territorio objeto de exploración y prospección, con lo que se pretende llegar a tener un aproximado general de las reservas totales del territorio (dotación natural). El incremento de la inversión extranjera en exploración petrolera en Bolivia muestra que la estrategia implementada tiene el efecto esperado.

✓ Extracción de petróleo ( $q$ ) y su comportamiento en el tiempo



Un Producto no renovable que está destinado a autoabastecer la demanda interna de mercado<sup>19</sup>, tiene un comportamiento segmentado. En una primera etapa la cantidad

<sup>19</sup> Se tiene como política exportar remanentes de producción y la prioridad en la producción es satisfacer el mercado interno.

extraída aumenta hasta cubrir las necesidades del mercado, en una segunda etapa permanece casi estacionaria y crece junto con la demanda, en una tercera etapa la cantidad extraída disminuye y es complementada con importaciones para satisfacer el mercado interno.

En esta etapa los descubrimientos y los esfuerzos de exploración son marginales.

Bolivia trata de tener como estrategia de mercado el autoabastecimiento de petróleo el mayor tiempo posible, es así que como política complementaria a la de exploración de territorio en busca de yacimientos petrolíferos, incentiva la extracción de petróleo con la disminución de las regalías al petróleo. Si bien esta política atrae más inversión los datos muestran que las recaudaciones del TGN han disminuido considerablemente<sup>20</sup>.

## Conclusiones

La utilización óptima de petróleo en un país requiere un conocimiento adecuado de los flujos (entendidos como ofertas) y demandas energéticas de la economía que son cubiertas por esta fuente de energía.

En este contexto las políticas implementadas en Bolivia van encaminadas a tener un conocimiento pleno de esta oferta de recurso - entendida como reservas certificadas de petróleo – si bien la estrategia de riesgo compartido, en exploración ha dado sus frutos, el rebajar excesivamente las regalías ha afectado el flujo de recursos provenientes de la explotación de un recurso no renovable. Los ingresos provenientes de esta explotación de recursos, están destinados al desarrollo y fomento de nuevas actividades productivas en otros sectores de la economía, por lo que prescindir de estos recursos es un costo elevado para la sociedad.

Una vez concluido este proceso de exploración que se viene efectuando en Bolivia, se debe revisar la política de extracción para optimizar a futuro el uso de este recurso no renovable. **La optimización privada no suele coincidir con la optimización social**, por lo que manejar las regalías petroleras como mecanismo de control de la extracción óptima de petróleo puede conducir a resultados subóptimos, desde el punto de vista social, si estas no se comportan de manera dinámica adaptándose a las exigencias de mercado. Quizás valga la pena considerar otros instrumentos de control (o incentivo) para optimizar este proceso de extracción.

---

<sup>20</sup> Ver gráfico 2

Por otro lado, el considerar una tasa de descuento en el proceso de maximización implica que alguna generación a futuro no está siendo considerada o se le está asignando una menor ponderación, por lo que los recursos provenientes de este proceso de explotación deberían ser invertidos en sectores que los consideren, para con esto tratar de tener una mayor equidad intergeneracional.

## **Bibliografía**

**Azqueta D. Y Ferreiro A.** Análisis Económico Y Gestión De Los Recursos Naturales , Alianza Editorial 1994

**Brown Jr.; K. S.** Conservation Of Neotropical Environments: Insects As Indicators. En N.M. Collins & J.A. Thomas (Eds), The Conservation Of Insects And Their Habitats. Academic Press ,London, 1991.

**Brundtland, G.H.** “Our common Future” (, Oxford, Oxford University Press. (Trad. en castellano, Nuestro futuro común, Madrid, Alianza Ed., 1988).)

**Cabrera F Guillermo** “Utilización De Modelos Matemáticos En Sistemas De Aguas Subterráneas”. Cuadernos De Ingeniería. Abril 1978

Cámara De Empresas En Hidrocarburos Bolivia , **Base De Datos 2002**

Conrad, C Y C. Clark. **Natural Resource Economics:Notes And Problems. Cambridge University Press. 1987**

**Daly, H.E.** “Toward some operational principles of sustainable development” (Ecological economics, vol. 2, n. 1, pp.1-6.) 1990

**Dixon, J.A. y Fallon, L.A.** “El concepto de sustentabilidad: sus orígenes, alcance y utilidad en la formulación de políticas” (Vidal, J. (Comp.) Desarrollo y medio ambiente, Santiago de Chile, CIEPLAN, (la versión original en inglés apareció en Society and Natural Resources, Vol. 2, 1989)

**Edwards G. Gonzalo** Introducción Al Análisis De Sistemas Dinámicos, Ediciones Universidad Catolica De Chile, 2000.

**Ehrlich, P.R.** “The limits to substitution: Meta resource depletion and new economic-ecological paradigm” (Ecological economics, vol. 1, n. 1 p.10.) 1988

**Estevez Andre** “Petróleo” Publicación Internet [www. Lafacu.Com](http://www.Lafacu.Com) 1997

**Guimarães, R.P.** “El desarrollo sustentable: ¿propuesta alternativa o retórica neoliberal? (Revista EURE, Vol. XX, n. 61.) 1994

**Instituto Nacional De Estadística INE-** Bolivia, Base De Datos 2002

**Malthus, T.R. (1827)** “Definitions in Political Economy. Preceded by an Inquiry into the

Rules wich Ought to Guide Political Economits in the Deviation from the Rules in their Writings” (Londres (Ref. 1988)

**Mcneely, J. A.; K. Miller; W. V. Reid; R. A. Mittermeier; T. B. Werner.** Conserving The World’s Biological Diversity, Uicn, Gland, Switzerland; Wri, Ci, Wwf-U.S., And The World Bank, Washington, D.C. 1990

**Meadows, D.H. y D.L.** “Beyond the Limits”. ((Hay traducción en castellano de El País & Aguilar, Madrid, 1992)

**Mill J.S. (1848)** “Principles of Political Economy” (Nuestra referencia corresponde a la traducción del F.C.E., México, realizada sobre la 7. edición inglesa de 1871 corregida por el autor, pp. 641-642.) 1990

**Mittermeier, R. A.** Primate Diversity And The Tropical Forest. Case Studies From Brazil And Madagascar And The Importance Of Megabiodiversity Countries. En Edward O. Wilson (Ed.) Biodiversity. National Academy Press Washington, D.C. 1988.

**M’Mwereria, G.K.** “Technology, Sustainable Development and Imbalance: A southern Perspective” (International Conference on Technology, Sustainable Developmente and Imbalance, Tarrasa, Spain.) 1996

**Myers, N.** Threatened Biotas: “Hotspots” In Tropical Forests Environmentalist 8:1-20. 1988.

**Myers, N.** The Biodiversity Challenge: Expanded Hot-Spot Analysis Environmentalist 10:243-256. 1990.

**Naredo, J.M.** “La economía en evolución. Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico” (Madrid, Siglo XXI.) 1987,

**Norgaard, R.B.** “Development Betrayed. The end of progress and a coevolutionary revisioning of the future” (Londres y Nueva York, Routledge, p. 22.) 1994

**Norgaard, R.B.** “Globalization and unsustainability” (International Conference on Technology, Sustainable Development and Imbalance, Tarrasa, Spain.) 1996

**Norton, B.B.** “Sustainability, Human Welfare and Ecosystem Health” (Ecological Economics, vol. 14, n. 2, pp. 113-127.) 1992

**Nrc. National Research Council.** Conserving Biodiversity. A Research Agenda For Development Agencies National Academy Press Washington, D.C. Usa. 1992.

**O’Riordan, T.** “The politics of sustainability” (en Sustainable Management: Principle and Practice, Turner, R.K. (ed), Londres y Boulder, Belhaven Press y Westview Press.) 1988

**Ortega José Antonio** “Modelo Empírico Del Precio Del Petróleo”, Universidad Autónoma De Madrid, 2000.

**Pindyck Robert S.:** “The Optimal Exploration And Production Of Nonrenewable Resources”, Journal Of Political Economy, Vol 86, N°5. Pp. 841-857, 1978

**Presidencia De La República De Bolivia** “Ley De Hidrocarburos –Ley N° 1689 Del 30 De Abril De 1996” Gaceta Oficial

**Romero Carlos** “Economía De Los Recursos Ambientales Y Naturales” 2ª Edición. Alianza Económica Editorial 1997

**Sachs, I.** (Entrevista en Science, Nature, Societé, Vol. 2, n. 3, 1994.)

**Sachs, W.** “The Development Dictionary. A Guide to Knowledge as Power” (Londres y New Jersey, Zed Books, p.1.) 1992

**Sisk, T. D.; A. E. Launer; K. R. Switky; P. R. Ehrlich.** Identifying Extinction Threats Bioscience 44: 592-604. 1994

**Slocombe, S. D** Implementing Ecosystem-Based Management Bioscience 43: 612-622. 1993.

**Solow, R.** “Sustainability: An Economist’s Perspective” (Dorfman, R. y Dorfman, N.S. (eds.), Economics of the Enviroment, 3. Ed., Nueva York.) 1991

**Solow, R.** “An almost Practical Step towards Sustainability” (Conferencia pronunciada con motivo del 40 aniversario de Resources for the Future, 8-10-1991.) 1992

**Unidad De Análisis De Política Economía** Udape– Bolivia , Base De Datos, 2002

**Utria, R. D.** La Incorporación De La Dimensión Ambiental En La Planificación Del Desarrollo. Memorias Del Xv Congreso Interamericano De Planificación: El Medio Ambiente En La Planificación Del Desarrollo Bogotá, Noviembre De 1985. Pp: 111-182.

**Vice Ministerio De Energía E Hidrocarburos,** Base De Datos 2002

**World Resources Institute Wri,** Base De Datos Actualizada Al Año 2002