

Análisis económico de la conservación de las especies con agentes de racionalidad acotada¹

Fabio Alberto Arias Arbeláez²

Resumen

Las personas que valoran las especies para usos no directos de consumo pueden interactuar con los extractores de estos recursos y determinar la asignación económica que de las especies se haga. Se presenta un modelo, usando la teoría de juegos, donde se hace explícita esta interacción y se analizan los resultados de equilibrio en el que los agentes deciden sobre las reglas de comportamiento. Se encuentra que, en determinada situación, se puede hacer un uso sostenible de las especies si las personas que las valoran deciden incondicionalmente participar en su protección.

Abstract

People who value species for non direct uses of consumption can interact with extractors of these species in order to determine their economic allocation. Based on game theory, this paper builds up a model that explicitly embodies this interaction and allows an analysis of equilibrium outcomes in which the concerned agents make decisions upon the rules of behavior. It is shown that, under some conditions, a sustainable use of the species is possible, with the proviso that people who value them unconditionally decide to participate in their protection.

Palabras claves: Conservación de las Especies, Recursos Naturales, Teoría de Juegos, Racionalidad Acotada, Valores de no uso

¹ Este artículo se deriva del trabajo de grado del autor en el Magíster de Economía Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad de los Andes.

² Profesor del Departamento de Economía, Facultad de Ciencias Sociales y Económicas, Universidad del Valle. Grupo de Investigación: Economía regional y ambiental. Agradezco a Fernando Carriazo, Hernán Vallejo, Luis Ferro, Ximena Rueda, Fernando Beltrán y Sergio Monsalve, por la sugerencias y críticas hechas a versiones preliminares de este trabajo; como de costumbre, el autor asume toda la responsabilidad por la versión final.

Introducción

El análisis económico de la extinción de las especies y la pérdida de biodiversidad se ha centrado en el estudio de las decisiones de los agentes que realizan extracciones de los recursos biológicos o ponen en riesgo la biodiversidad. No se han incluido las decisiones de agentes conservacionistas que tienen valores de no-uso³ por los recursos biológicos. Estos últimos tienen incentivos a establecer reglas sociales para evitar la extinción de las especies.

Se intenta modelar las interacciones entre estos dos tipos de agentes en un juego repetido infinitamente que incluye aspectos de racionalidad acotada, es decir, los agentes no pueden hacer todos los cálculos en sus planes de optimización. Por ejemplo, los extractores no conocen con exactitud las funciones de crecimiento de las especies⁴ y no pueden programar extracciones óptimas. Tampoco los conservacionistas tienen un conjunto de preferencias especificado completamente y no pueden decidir cuál especie proteger de manera óptima.

Se ha elegido la herramienta de autómatas finitos (máquinas de Moore) para el análisis de agentes de racionalidad acotada. Este enfoque permite reemplazar los planes de acción completos de los agentes por planes de acción que se asemejan mejor a reglas de comportamiento para tomar decisiones en escenarios complejos.

Se encuentra en este trabajo que los resultados de equilibrio se reducen significativamente al compararlos con las soluciones de un juego de racionalidad perfecta. Es decir, pasamos de un conjunto infinito de equilibrios a sólo un par de equilibrios. El equilibrio donde se hace uso sostenible de los recursos biológicos corresponde a las reglas de decisión más simples que disponen extractores como conservacionistas. El agente conservacionista decide participar incondicionalmente en la protección de los recursos biológicos y donde el extractor ante la presión social del conservacionista decide realizar extracciones prudentes en cada período de tiempo. El otro equilibrio, también está compuesto por reglas incondicionales donde el extractor sobre-explota el recurso en cada período de tiempo ante la no-participación del conservacionista en la protección del recurso.

³ Una persona obtiene un valor de uso por el consumo directo de un bien. También una persona puede tener valores de no uso como: 1) el valor de opción: lo que está dispuesta a pagar por tener la posibilidad de usar el recurso en un futuro, y/o 2) el valor de existencia: la utilidad que obtiene una persona por el hecho de que el recurso exista.

⁴ Los recursos naturales renovables (plantas y animales) se caracterizan porque su población puede aumentar en el tiempo debido a su capacidad biológica de reproducción, sin embargo, las especies no crecen indefinidamente, alcanzan un tope determinado por el ecosistema donde viven, denominado capacidad de carga K . Así, la función de crecimiento de una especie asocia el tamaño de la población x , con la variación por período de tiempo de la población. Por ejemplo $dx/dt = (1 - x/K)x$ (Hanley et al. 1997: 276).

Análisis económico de la extinción de las especies

La asignación de los recursos biológicos de uso común (i.e. las especies y la biodiversidad), se han estudiado en economía desde el punto de vista de quienes extraen el recurso, y en general, no se han incluido las decisiones de otros agentes, como consumidores u otras personas que tienen valores de no-uso por el recurso.⁵

El análisis (Swanson, 1994) de las decisiones que toman los agentes que extraen el recurso, en adelante extractores, se ha centrado en lo siguiente:

Un recurso biológico se considera como un activo ya que puede generar un flujo de ingresos. Si la tasa de retorno de un recurso supera la tasa de retorno de cualquier otro activo en la economía, hay incentivos para la conservación del recurso ambiental. La tasa de retorno depende de la tasa de regeneración del recurso y del costo de acceso a este: así una tasa de crecimiento alta y un costo de acceso alto implica contar con una especie con un nivel de stock positivo en equilibrio. En caso contrario, la extinción llega a través de la desinversión del stock: se extrae la totalidad del recurso y los ingresos recibidos son invertidos en activos más rentables de la economía. Aquí se habla de un recurso de alto valor de mercado y tasas de crecimiento bajas, por ejemplo, bosques naturales de maderas finas.

Otra vía por la cual se llega a la extinción de una especie es la sobre-explotación: en este caso los extractores no tienen incentivos para invertir en la administración de los recursos y éstos se explotan en un régimen de libre acceso; este tipo de recursos es de valor de mercado medio y de tasas de crecimiento bajas, por ejemplo, los elefantes y rinocerontes. Y por último, otra forma de extinción es el problema de la pérdida de biodiversidad: donde no se extrae una especie específica en vía de extinción, pero las áreas donde hay muchas formas de vida desconocidas sí tienen un costo de oportunidad que los extractores no están dispuestos a asumir para mantener la biodiversidad; por ejemplo, la deforestación de bosques para el uso de tierras en cultivos.

En general, puede decirse que en este marco de análisis la extinción de una especie es el resultado de la elección humana. Además, las políticas de control que intentan reducir la demanda del recurso por medio de prohibiciones y elevar los costos de extracción a través de sanciones, tienen un efecto contrario al deseado: disminuye el valor de mercado del recurso convirtiéndolo en un activo poco rentable, porque si se considera que una especie para su supervivencia requiere de un hábitat natural, que tiene un costo de oportunidad: el beneficio esperado del uso alternativo de ese hábitat para los humanos y si por la prohibición o la sanción no

⁵ La modelación de los valores de no-consumo en la extinción de las especies se debe a Alexander (2000) que los ha incluido como un componente de la demanda del recurso a la que se enfrentan los agentes que extraen la especie pero no los ha introducido directamente como la modelación de un agente conservacionista. La tradición en el análisis de los recursos de uso común ha sido considerar que las acciones de los extractores no tienen un impacto significativo para otros agentes. (ver por ejemplo Ostrom 1990:31)

es posible la comercialización de la especie entonces el costo de oportunidad supera los beneficios de la conservación. Por tanto, la recomendación de política derivada de la modelación económica de la extinción de las especies es evitar que las especies continúen siendo activos poco rentables.

De otro lado, hay personas, aparte de los extractores, que derivan utilidad de las especies: los consumidores tienen valores de uso que se refieren a la utilidad obtenida por el uso directo del recurso y las personas a quienes les interesa el recurso (no necesariamente consumidores y en adelante conservacionistas), tienen valores de no-uso. Se ha demostrado (Alexander, 2000) que la única posibilidad real de lograr un uso sostenible de ciertas especies es que los extractores logren apropiarse los valores de no-uso de los conservacionistas; de esta forma, los recursos biológicos tendrían una alta tasa de retorno y pueden competir con otros activos de la economía. Sin embargo, esto no implica que todas las especies lleguen a ser rentables, sólo indica que si esta transferencia no es posible, la extinción de las especies que valoran los conservacionistas es inevitable. Esta alternativa tiene obstáculos operativos que hasta el momento han sido infranqueables pues no hay mecanismos efectivos, legales o de mercado, que permitan este tipo de transferencia.

Hoy puede notarse que existen personas que tienen valores de no-uso por las especies. La interacción entre estos agentes (conservacionistas y extractores) determinaría la asignación de los recursos biológicos. Esta interacción es factible si surge una norma⁶ ya que estas aparecen cuando hay acciones que causan externalidades, no es fácil instaurar un mercado y los costos de transacción son altos (Coleman, 1987). En el caso de la extinción de especies no existe un mercado para la externalidad causada a los conservacionistas por las extracciones no sostenibles de los recursos pero existe la posibilidad de que las personas afectadas que valoran las especies realicen actividades para protegerlas. El conjunto de personas a quienes les interesa el recurso podría eventualmente compartir una norma, ya que, están afectadas por la externalidad en la misma dirección. Dentro de este conjunto es legítimo sancionar a los agentes que realizan actividades económicas que ponen en riesgo la supervivencia de las especies. Y aunque quienes causan la externalidad pueden no aceptar como legítimo el control sobre sus acciones ellos seguirían la norma debido a las sanciones que acarrea su incumplimiento.

Agentes de racionalidad acotada

El principal aporte de esta investigación es: la inclusión de las decisiones de agentes conservacionistas de los recursos biológicos y su interacción con los extractores, bajo un escenario de racionalidad acotada. El estudio de la interacción estratégica entre estos tipos de agentes permite analizar la asignación social de las especies y explorar, si existen, algunos resultados de equilibrio donde se hace

⁶ La norma se define como una regla que se debe seguir o a la que se debe ajustar el comportamiento.

explotación sostenible de los recursos biológicos y cuales serían las características de estos equilibrios.

El análisis económico tradicional ha supuesto que los agentes conocen el problema de decisión al que se enfrentan, que tienen la habilidad necesaria para realizar cálculos complejos para determinar el curso de sus acciones óptimas. Esta capacidad es ilimitada y descarta los errores (Rubinstein, 1998: 137). En particular, se ha supuesto que los extractores conocen la función de crecimiento del recurso y con base en ella determinan el nivel de extracción óptimo privado. Pero es frecuente que los extractores tengan como la mayor fuente de incertidumbre la carencia de conocimiento exacto sobre la función de crecimiento del recurso. Incluso la reducción de la incertidumbre a través de investigación es costosa y nunca plenamente eliminada. En este contexto muchas de las acciones tomadas por los extractores se hacen sin tener en cuenta todas las consecuencias y el desconocimiento de la función biológica de crecimiento de las especies puede llevar a los extractores a realizar extracciones que sobrepasan la capacidad de regeneración del recurso de forma sistemática.

De otro lado, las personas que tienen valores de no-uso por los recursos, en principio pueden pensarse como si tuvieran un orden completo sobre el conjunto total de elección de alternativas, pero la evidencia empírica, por ejemplo en Estados Unidos (Metrick et al. 1996), ha mostrado que la protección de las especies en vías de extinción depende de sus características de tamaño o "simpatía" y no porque representen formas particulares de vida, o por su importancia relativa en un ecosistema o por sus características genéticas. Por tanto, este grupo de personas, ajusta permanentemente sus preferencias. Aquí, el comportamiento de las personas se está rigiendo bajo razones: en este caso la razón es "simpatía" a una especie; así, dentro del conjunto de acciones alternativas, proteger a una especie carismática parece ser dominante a cualquier subconjunto de acciones.

En consecuencia, parece que las acciones de los agentes se rigen más por reglas en contextos de complejidad o incertidumbre, que por el resultado de un proceso de maximización exacto. Estas reglas corresponden a patrones de comportamiento o pensamiento que los agentes adoptan consciente o inconscientemente y establecen, en general, que en la circunstancia X se haga Y. Sin embargo, la elección de reglas es consistente con la consecución de los objetivos de los agentes, pues les permite, en escenarios de incertidumbre, complejidad etc., decidir y actuar. (Hodgson G. 2000: 12-13)

El modelo de análisis

La descripción del modelo de análisis teórico se compone de dos partes: en la primera se plantea, para un período de tiempo, la interacción estratégica que se daría entre extractores y conservacionistas, las acciones de que disponen ambos agentes, la estructura de pagos y el equilibrio resultante. En la segunda, se indica

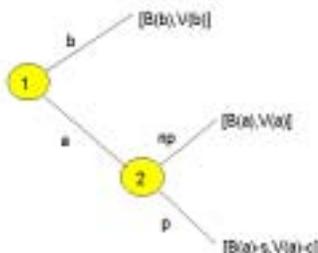
el enfoque de este trabajo en el estudio de la racionalidad acotada, donde se quiere modelar las acciones de agentes que se basan en reglas de comportamiento en lugar de planes de acción completos. Además, en esta sección se definen e ilustran las máquinas de Moore que son abstracciones de un proceso mediante el cual un agente implementa cierta regla de comportamiento.

a) Planteamiento del juego

El escenario planteado se modela como un juego de dos jugadores (ver la figura A). Sea el jugador 1 un extractor del recurso natural y el jugador 2 un agente conservacionista que tiene valores de no-uso sobre el recurso⁷. En la primera etapa, el jugador 1 decide si realizar una extracción baja (b), que permite la sostenibilidad del recurso o, una extracción alta (a), que pone en riesgo el recurso, donde $a > b > 0$. Si el jugador 1 elige b, el juego se acaba, y este obtiene un beneficio $B(b)$, mientras el jugador 2 obtiene el valor de no-uso $V(b)$. De otro lado, si el jugador 1 elige a, el jugador 2 observa esta acción y decide en la segunda etapa si intervenir y realizar actividades para la protección del recurso (p) o no participar en actividades para la protección del recurso (np). La intervención puede verse como una acción de protesta ante la extracción alta del recurso; esta protesta desacredita al jugador 1 en el mercado, o le impone una sanción social, que reducirá sus beneficios en una cantidad s (≥ 0). A su vez, el jugador 2 cuando decide intervenir incurre en un costo de oportunidad c (> 0), por ejemplo, el tiempo dedicado a actividades de protección puede usarlo empleándose a un salario determinado en el mercado de trabajo. Se supone en este trabajo que $B(\cdot)$ es una función creciente en el corto plazo y $V(\cdot)$ una función decreciente. Los pagos cuando 1 elige (a) y 2 elige (p) son: $[B(a)-s, V(a)-c]$ y los pagos cuando 1 elige (a) y 2 elige (np) son $[B(a), V(a)]$.

Este juego de información completa y perfecta puede resolverse por inducción hacia atrás. Como $c > 0$, en la segunda etapa el jugador 2 elige (np) dado que $V(a) > V(a)-c$. El jugador 1 sabe que 2 elige (np) si él elige (a). Entonces 1 compara entre elegir (b) y obtener $B(b)$ o elegir (a) y obtener $B(a)$, elige (a).

Figura A. Forma extensa del juego



⁷ Incluso el jugador 2 puede pensarse como una entidad gubernamental que representa o agrega los valores de no uso de agentes conservacionistas.

El equilibrio de Nash perfecto en subjuegos obtenido por inducción hacia atrás es (a,np): el jugador 1 realizar extracciones altas y el agente conservacionista no participa en la protección del recurso. Nótese que con $c > 0$ surge la alternativa en la cual el jugador 2 actúa como un “polizón”; es decir, dado que los recursos biológicos, como valores de no-uso, son un bien público, el jugador 2 tiene incentivos para no proteger el recurso y no asume el costo de la protección.

También, este juego puede pensarse que se juega no sólo un período, sino de manera repetida, incluso si los jugadores no prevén un período donde el juego termina.

Para simplificar la explicación que sigue, de aquí en adelante, se suponen los siguientes pagos: $B(b)=90$, $B(a)=100$, $V(b)=50$, $V(a)=40$, $c=10$, $s=20$ ⁸. Estos aparecen en la representación estratégica del juego de la figura B.

En esta matriz se representan las decisiones del jugador 1 en las filas (a y b) y las decisiones del jugador 2 en las columnas (np , p), en las casillas de pagos, el primer número corresponde al jugador 1 y e segundo número al jugador 2.

Figura B. Forma estratégica del juego

		2	
		np	p
1	a	100,40	80,30
	b	90,50	90,50

b) Definición de máquina de Moore y algunos ejemplos

Se introduce ahora el análisis de racionalidad acotada. Se quiere explorar cómo las consideraciones del procedimiento de quienes toman decisiones importan en los resultados de solución. “Los agentes toman estrategias que les sirven para alcanzar sus metas, pero a la vez quieren que esas estrategias sean lo más simples posibles: los planes complejos de acción son más difíciles de aprender y toman más tiempo en ser implementados” (Rubinstein 1998:137).

En un juego repetido infinitamente con agentes de racionalidad acotada, la noción de estrategia puede reemplazarse por la noción de una máquina. Una máquina es una abstracción de un proceso por el cual un jugador implementa una regla de comportamiento.

⁸ La elección de números no resta generalidad a los resultados, nótese que la elección de cualquier $c > 0$ no tiene incidencia sobre los resultados de equilibrio, pero se elige un s tal que $B(b) > B(a) - s$, de lo contrario no habría opción de obtener un equilibrio donde el extractor lleve a cabo extracciones bajas y el ejercicio tendría una solución trivial.

Una máquina para el jugador i (M_i) en un juego repetido infinitamente es una cuatro-tupla $M_i = (Q_i, q_i^0, f_i, t_i)$ donde

Q_i es un conjunto finito de estados (el nombre de los estados no tiene importancia)

$q_i^0 \in Q_i$ es el primer estado o estado inicial

$f_i: Q_i \rightarrow S_i$ es una función de resultados que asigna una acción a cada estado. Donde S_i es el conjunto de acciones que puede tomar el jugador i .

$t_i: Q_i \times S_j \rightarrow Q_i$ es una función de transición que asigna un estado a cualquier par de estado y acciones de otro jugador.

Ejemplo 1. Sea la siguiente máquina “extractor condescendiente” para el extractor que elige una extracción baja b si el conservacionista ha decidido proteger p .

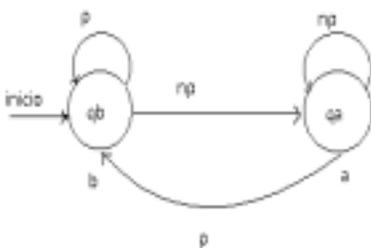
$$Q_i = \{q_b, q_a\}$$

$$q_i^0 = q_b$$

$$f_i(q_b) = b \quad \text{y} \quad f_i(q_a) = a$$

$$t(q, p) = q_b \quad \text{y} \quad t(q, np) = q_a$$

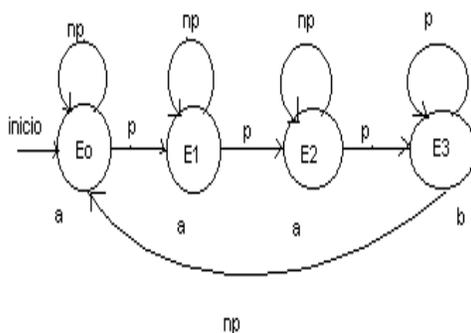
Figura C. Extractor ‘condescendiente’



Esta máquina se ilustra en la figura C. Cada círculo corresponde a un estado, el nombre de la acción tomada en cada estado aparece debajo de cada círculo (b,a). El estado inicial corresponde a q_b seguido de la flecha inicio, las demás flechas corresponden a las transiciones. Así, esta máquina indica la siguiente regla de comportamiento: el extractor comienza haciendo extracciones bajas (b), si el agente conservacionista participa en la protección del recurso, es decir elige (p), el extractor continúa eligiendo (b) y permanece en el estado q_b , como lo indica la flecha que sale de q_b y llega a q_b . De otro lado, si el agente conservacionista, jugador 2, decide no proteger el recurso, es decir, elige (np) el extractor, jugador 1, pasa al estado q_a , y decide extraer (a). Si, a partir de allí, el jugador 2 se mantiene en cada período eligiendo (np), el jugador 1 se mantendrá en el estado q_a , haciendo extracciones altas (a), como lo indica la flecha que sale de q_a y llega a q_a . Si en algún período, el jugador 2 decide p, el jugador 1 retorna a q_b , como lo indica la flecha inferior.

Ejemplo 2. Sea la máquina “extractor terco” que aparece en la figura D. El extractor del recurso comienza haciendo extracciones altas y continúa haciéndolas hasta que el agente conservacionista haya decidido proteger el recurso en tres períodos. Después de estos tres períodos el extractor reconsidera su decisión y realiza extracciones bajas y se mantendrá allí mientras el agente conservacionista persista en la decisión de proteger. Sí en algún período posterior el conservacionista juega (np) la máquina comienza de nuevo su plan de acción.

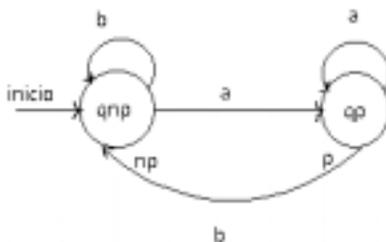
Figura D. Máquina extractor “terco”



En la figura D se nota que el jugador 1 comienza en un estado inicial E_0 , donde realiza extracciones altas (a), se traslada al estado E_1 si el jugador 2 ha jugado (p), y así sucesivamente llega al estado E_3 si el jugador 2 continúa jugando (p). El jugador 1 se mantendrá en el estado E_3 mientras 2 siga jugando (p), pero sí en algún período 2 juega (np), el jugador 1 vuelve al estado E_0 . Nótese que entre los estados E_0 , E_1 y E_2 cuando el jugador 2 decide (np) no se hace el salto al estado siguiente. Lo anterior indica que un extractor reconsidera sus decisiones de hacer extracciones altas si por lo menos se ha intentado proteger el recurso en tres oportunidades.

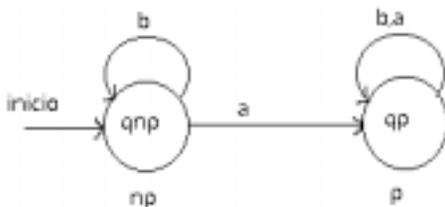
Ejemplo 3. Sea la máquina “ojo por ojo” para el jugador 2, la regla de comportamiento que describe un plan de acción en el cual este jugador decide inicialmente no participar en la protección del recurso a menos que el jugador 1 realice una extracción alta, en cuyo caso, el jugador 2 pasa al estado qp, donde decide participar en la protección del recurso. Permanece allí mientras observe extracciones altas por parte del jugador 1, y si en algún momento el jugador 2 observa extracciones bajas, decide no participar.

Figura E. Conservacionista "ajo por ajo"



Ejemplo 4. Conservacionista “severo” comienza en el estado inicial qnp, permanece allí mientras el extractor realice extracciones bajas y cambia al estado qp si observa una extracción alta y se mantiene allí no importando las acciones siguientes del extractor. (Ver la figura F)

Figura F. Conservacionista "severo"



Solución del juego repetido infinitamente con agentes de racionalidad acotada

Esta sección consta de dos partes: la primera, describe cómo se desarrolla el juego infinito entre extractores y conservacionistas como resultado del enfrentamiento entre una regla de comportamiento de un agente frente a la regla de comportamiento del otro agente. Se establece que estos enfrentamientos generan ciclos de pagos y que los agentes consideran el valor presente de estos pagos como el promedio de un ciclo y así pueden definir qué regla de comportamiento les brinda mayor retribución. En la segunda parte, se presenta el concepto de solución como el equilibrio de Nash perfecto en subjuegos del juego de máquinas. Para ello, primero se define el equilibrio de Nash en un juego de máquinas y luego se pasa a seleccionar entre estos equilibrios suponiendo que los agentes no solo están interesados en la regla de comportamiento que les genera un pago promedio más alto frente a la regla de su oponente sino que también consideran el costo de poner en operación esa regla. Este costo viene representado por el número de estados; es decir, los agentes quieren alcanzar sus objetivos pero a la vez quieren que las reglas adoptadas sean lo más simples posible.

Para el análisis que se hace en la primera parte se utilizan las máquinas descritas en los ejemplos pero puede ampliarse a cualquier regla de comportamiento como las que se proponen en el apéndice B. De hecho, se usan las máquinas descritas en el apéndice B en la segunda parte, pero debe anotarse que se hace con carácter de ilustración pues los resultados son de carácter general y no dependen de la elección particular de las máquinas

a) Juego de máquinas

En la tabla A se listan los resultados de los cuatro enfrentamientos entre las máquinas de los ejemplos, es decir, se puede observar una secuencia de resultados para los enfrentamientos entre una regla de comportamiento adoptada por un extractor frente a la regla de comportamiento de un conservacionista. En esta tabla, para cada enfrentamiento, aparecen los pagos del jugador 1 (pagos 1), los pagos del jugador 2 (pagos 2), las acciones tomadas por la máquina de cada jugador y el período de tiempo respectivo. Por ejemplo, cuando el extractor sigue una regla de decisión como “terco” y el conservacionista la regla de “ojo por ojo” el juego se desarrolla de la siguiente manera, (el lector puede guiarse siguiendo las figuras D y E): El extractor se encuentra en el nodo inicial E_0 y realiza una extracción alta. El conservacionista se encuentra inicialmente en el nodo qnp y observa la acción (a) del extractor por lo cual pasa al estado qp y elige participar en la protección del recurso (p). En el primer período, las acciones fueron (a,p) que generan los pagos (80,30), (ver la figura B). En el segundo período, el extractor observó que el conservacionista eligió (p) y pasa al estado E_1 y continúa eligiendo extracción alta; el conservacionista que se encuentra en el estado qp al observar (a) de nuevo elige (p), se repite el par de acciones (a,p) con pagos (80,30). En el tercer período, una vez más, se tienen los resultados de las rondas anteriores. En el cuarto período, cuando el extractor ha alcanzado el estado E_3 decide extracciones bajas ante la insistencia del conservacionista en p, pero el conservacionista, ante esta acción, baja la guardia y elige np. Durante el enfrentamiento de este par de máquinas, se genera un ciclo que empieza en el período 1 y termina en el período 4. A partir de allí se repiten las decisiones y por ende los pagos en secciones de 4 períodos.

Con un procedimiento semejante se construye el resto de la Tabla A. Nótese que en el enfrentamiento entre “condescendiente” vs. “ojo por ojo” se genera un ciclo de 2 períodos [(b,np),(a,p)]. Entre “condescendiente” vs. “severo” se presenta una fase de transición en los períodos 1 y 2 donde se elige respectivamente [(b,np),(a,p)], antes de estabilizarse el ciclo de un período (b,p), que genera un pago de (90,50) por período. En el enfrentamiento entre “terco” versus “severo” se presenta un ciclo de transición de 3 períodos donde en cada período se elige (a,p), y a partir del cuarto período se inicia el ciclo (b,p).

Tabla A. Enfrentamientos entre los cuatro ejemplos de máquinas

extractor condescendiente vs. Conservacionista "ojo por ojo"									pago del ciclo
pagos 1	90	80	90	80	90	80	90	80	
condescendiente	b	a	b	a	b	a	b	a	
período	1	2	3	4	5	6	7	8	
ojo por ojo	np	p	np	p	np	p	np	p	
pagos 2	50	30	50	30	50	30	50	30	40
extractor condescendiente vs. Conservacionista "severo"									
pagos 1	90	80	90	90	90	90	90	90	90
condescendiente	b	a	b	b	b	b	b	b	
período	1	2	3	4	5	6	7	8	
severo	np	p	p	p	p	p	p	p	
pagos 2	50	30	50	50	50	50	50	50	50
extractor "terco" vs. Conservacionista "ojo por ojo"									
pagos 1	80	80	80	90	80	80	80	90	82,5
terco	a	a	a	b	a	a	a	b	
período	1	2	3	4	5	6	7	8	
ojo por ojo	p	p	p	np	p	p	p	np	
pagos 2	30	30	30	50	30	30	30	50	35
extractor "terco" vs. Conservacionista "severo"									
pagos 1	80	80	80	90	90	90	90	90	90
terco	a	a	a	b	b	b	b	b	
período	1	2	3	4	5	6	7	8	
severo	p	p	p	p	p	p	p	p	
pagos 2	30	30	30	50	50	50	50	50	50

Se demuestra en el Apéndice A que para tasas de descuento cercanas a 1, el valor presente de los pagos de un enfrentamiento entre máquinas corresponde al valor promedio de los pagos de un ciclo. Los pagos promedios de los ciclos de las máquinas de los ejemplos aparecen en la parte derecha de la tabla A.

Se resumen en la tabla B los resultados de los enfrentamientos entre máquinas. En las filas aparecen las reglas de decisión del extractor y en las columnas las reglas de decisión del conservacionista. Por ejemplo, el resultado del enfrentamiento entre el extractor “terco” y el conservacionista “ojo por ojo” genera un pago para el primero de 82.5 y para el segundo de 35. El enfrentamiento entre el extractor “terco” y el conservacionista severo genera unos pagos de (90,50). Nótese que en la tabla B aparecen máquinas adicionales a las indicadas en los ejemplos, estas nuevas máquinas son especificadas en el apéndice B.

Tabla B. Resumen

extractor	conservacionista						
	incondicional np	incondicional p	severo	período de gracia	desvío a np	un descuido	ojo por ojo
incondicional a	100-40	80-30	80-30	80-30	80-30	85-32,5	80-30
incondicional b	90-50	90-50	90-50	90-50	90-50	90-50	90-50
implacable	100-40	90-50	80-30	80-30	80-30	90-50	80-30
período de gracia	100-40	90-50	90-50	90-50	91,6-43,3	88,3-46,6	90-50
Extacción b desvío	100-40	90-50	90-50	90-50	91,6-43,3	88,3-46,6	90-50
terco	100-40	90-50	90-50	90-50	88,3-36,6	85-40	90-50
condescendiente	100-40	90-50	90-50	90-50	92,5-40	87,5-45	90-50

c) El concepto de Solución

Una vez definido las estrategias de los jugadores como reglas de comportamiento a través de máquinas de Moore e indicado el desarrollo de un juego de máquinas y obtenido los resultados de la interacción entre éstas como los pagos promedio de un ciclo, se pasa ahora a determinar los equilibrios del juego planteado.

Se dice que un equilibrio en subjuegos de un juego de máquinas es un par de máquinas $(M1^*, M2^*)$ si no hay un tiempo t , ni $M1$, ni $M2$ tal que $(M1, M2^*(q_2^t)) > (M1^*(q_1^t), M2^*(q_2^t))$ o $(M1^*(q_1^t), M2) > (M1^*(q_1^t), M2^*(q_2^t))$.

Bajo este criterio los resultados de equilibrios de Nash se encuentran destacados en la tabla B en gris. Si además se considera que los agentes tienen un orden lexicográfico sobre los resultados de un juego, es decir, un par de máquinas (M_1, M_2) es preferido por el jugador i a otro par de máquinas (M_1^0, M_2^0) cualquiera, si el jugador i alcanza con (M_1, M_2) un pago promedio mayor o alcanza el mismo pago promedio con una máquina de menos estados. Entonces los resultados de equilibrio perfecto en subjuegos del juego de máquinas se reducen a los resultados en gris oscuro.

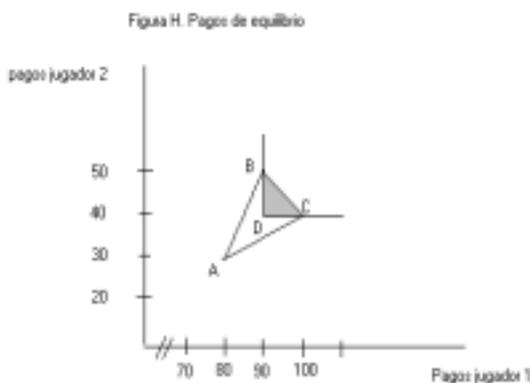
Análisis de los resultados

Los resultados de equilibrios con agentes de racionalidad acotada modelados a través de autómatas finitos (máquinas de Moore) se reducen considerablemente en comparación con los resultados de un juego con agentes de racionalidad perfecta.



Se representan en el plano de la figura G los pagos de la figura B. En las ordenadas aparecen los pagos del jugador 2, el agente conservacionista, y en las abscisas los pagos de jugador 1, el extractor. La región interior del triángulo ABC corresponde a los pagos promedios factibles que pueden obtener los agentes en este juego. Ahora se calculan los pagos de minmax, para cada jugador. Para cada estrategia pura del jugador 2 disponible en el juego de una etapa, el jugador 1 tiene una mejor respuesta, es decir, si 2 juega p , la mejor respuesta de 1 es b con lo cual

obtiene un pago de 90. Ahora, si el jugador 2 elige np, la mejor alternativa de 1 es elegir a y obtener un pago de 100. Por tanto, 1 ha elegido la acción que le reporta el máximo pago para cada acción del jugador 2. Ahora el mínimo entre 90 y 100 es 90, este valor es el minmax del jugador 1. Un análisis similar se realiza para establecer el minmax del jugador 2. La mejor respuesta del jugador 2 ante la acción a del jugador 1 es jugar np, con lo cual obtiene un pago de 40. De otro lado, 2 es indiferente en su respuesta ante la acción b del jugador 1, pues ya sea con p o np obtiene un pago de 50. Ahora: el menor valor entre 40 y 50 es 40 que es el valor minmax del jugador 2.

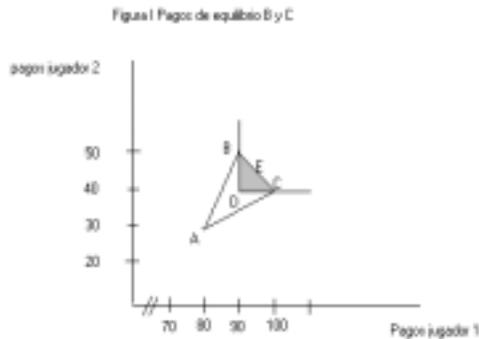


La pareja de pagos minmax (90,40) aparece en la figura H, como el punto D; y la región sombreada definida por el triángulo BDC corresponde a las parejas de pagos promedio factibles mayores o iguales a la pareja minmax. Esta región es importante pues el teorema Popular (Folk theorem), enuncia que cualquier conjunto de pagos promedio factibles que garanticen por lo menos los pagos minmax de cada jugador puede alcanzarse por una estrategia que es un equilibrio perfecto en subjuegos para una tasa de descuento suficientemente cercana a uno. Es decir, el área del triángulo DBC es el conjunto de pagos de equilibrio posibles de un juego con racionalidad perfecta.

Se encontró que en el juego de máquinas los únicos equilibrios perfectos en subjuegos son una secuencia de (b,p) o una secuencia de (a,np), que generan unos pagos promedio respectivos de (90,50) y (100,40), es decir, se reducen los pagos de equilibrio a dos parejas.

Para ver esto piénsese en una combinación lineal entre (90,50) y (100,40), en un punto como E (95,45) de la figura I, donde los jugadores intercambian estados y pagos y donde por lo menos cada jugador tiene una máquina de dos estados para que haya resultados alternados (b,p) y (a,np). Sin embargo, un jugador unilateralmente puede cambiar a una máquina de un estado y la mejor acción del otro jugador es también elegir una máquina de un estado correspondiente. Por ejemplo, Si el resultado del juego es el punto E, con pagos (95,45) cada jugador

tiene una máquina de dos estados que están generando una secuencia (a, np) (b, p) . Ahora si el jugador 1 puede cambiarse a una máquina de un estado incondicional en (a) y el jugador 2 mantiene su máquina de dos estados lo que puede generar una secuencia como (a, np) (a, p) lo que a su vez genera una secuencia de pagos $(100, 40)$ $(80, 30)$, ver la figura B, que es una combinación entre los puntos A y C, de la figura I, pero el único punto factible como equilibrio es C, donde el jugador 2 tiene la mejor opción escogiendo una máquina de un estado que juega np .



Conclusiones

Hay dos equilibrios perfectos en subjuegos en el juego de máquinas, (incondicional a , incondicional np) y (incondicional b , incondicional p), es decir, no existen reglas de comportamiento estables intermedias en las cuales los agentes tengan más de un estado de decisión y en el transcurso del juego alternar entre ellos. Esto indicaría que cuando los agentes tienen racionalidad acotada y deciden sobre reglas de comportamiento en lugar de planes acción completos, los resultados de equilibrio son polarizados

El equilibrio perfecto en subjuegos en el juego de máquinas donde se hacen extracciones sostenibles de las especies (incondicional b , incondicional p), corresponde a las reglas de decisión más sencillas donde sólo hay un estado. Este equilibrio indica que el extractor tiene la iniciativa en proponer un uso sostenible de los recursos, aceptado y vigilado permanentemente por el conservacionista. Y cualquier otro tipo de regla del conservacionista diferente a la incondicional p que impone sanciones al extractor por realizar extracciones altas tiene un mayor costo en su implementación y no genera un pago mayor. A su vez, el extractor, ante cualquier regla de comportamiento del conservacionista que sea laxa, tiene incentivos en realizar extracciones altas. Este equilibrio es consecuente con la aparición de instituciones privadas y públicas que promueven la protección del ambiente, y donde las acciones propuestas por estas instituciones, dada la

incertidumbre y la complejidad de los escenarios, promueven la protección de manera incondicional.

El equilibrio (incondicional b, incondicional p) es posible si la sanción social del conservacionista es lo suficientemente alta como para reducir los beneficios del extractor en el corto plazo más allá de lo que él obtendría haciendo extracciones bajas, de no ser así el único equilibrio sería (incondicional a, incondicional np), Esto implicaría que el jugador 2 debe ser un jugador con suficiente poder en la interacción como las instituciones gubernamentales.

El segundo equilibrio (incondicional a, incondicional np), también corresponde a reglas de decisión sencillas, donde el extractor decide en cada período de tiempo realizar extracciones altas, que le representan mayores ingresos en el corto plazo, a expensas de poner en riesgo la supervivencia del recurso biológico dado que el agente conservacionista ha decidido no participar en la protección del recurso.

El primer equilibrio es “deseable”, en el sentido que si el extractor, con racionalidad acotada, no conoce la función de crecimiento de la especie y decide hacer extracciones altas que superen la capacidad de regeneración del recurso, reducirá eventualmente sus ingresos futuros a cero, en el caso de agotamiento; y a su vez, la externalidad sobre los conservacionistas no será compensada. El primer equilibrio posibilita un flujo indefinido de ingresos para el extractor y la permanencia de la especie que brinda valores de no uso al conservacionista.

Apéndice A

La demostración que el valor presente de los pagos de un jugador corresponde al valor promedio de los pagos de un ciclo, (ver Binmore 1994:355-357) se hace para el jugador 1 en el juego “terco” vs. “ojo por ojo”, suponiendo una tasa de descuento $d \in (0,1)$. Sea U_1 la sucesión de pagos del jugador 1 en el enfrentamiento de las máquinas. El valor presente de U_1 es:

$$U_1 = 80 + 80d + 80d^2 + 90d^3 + 80d^4 + 80d^5 + 80d^6 + 90d^7 \dots$$

$$U_1 = 80 + 80d + 80d^2 + 90d^3 + (80 + 80d + 80d^2 + 90d^3)d^4 + (80 + 80d + 80d^2 + 90d^3)d^8 + \dots$$

$$U_1 = (80 + 80d + 80d^2 + 90d^3)(1 + d^4 + d^8 + \dots) \text{ la serie converge a } 1/(1-d^4)$$

$$U_1 = (80 + 80d + 80d^2 + 90d^3)(1/(1-d^4)) \text{ sí se multiplica por } (1-d) \text{ no se alteran las preferencias}$$

$$(1-d)U_1 = (80 + 80d + 80d^2 + 90d^3)((1-d)/(1-d^4)) \quad (*)$$

El último término de la parte derecha de la ecuación (*) puede simplificarse descomponiendo su denominador.

$(1-d)/(1-d^4)$ el denominador de esta expresión es una diferencia de cuadrados, por tanto

$$(1-d)/(1-d^4) = (1-d)/((1-d^2)(1+d^2)), \quad (1-d^2) \text{ es también una diferencia de cuadrados}$$

$$(1-d)/(1-d^4) = (1-d)/((1-d)(1+d)(1+d^2)) \text{ simplificando}$$

$$(1-d)/(1-d^4) = 1/((1+d)(1+d^2)) \quad (**), \quad (**) \text{ en } (*)$$

$$(1-d)U_1 = (80 + 80d + 80d^2 + 90d^3)(1/((1+d)(1+d^2)))$$

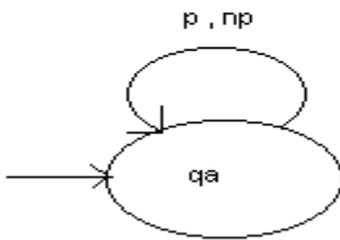
$$\lim_{d \rightarrow 1} (1-d)U_1 = \lim_{d \rightarrow 1} (80 + 80d + 80d^2 + 90d^3)(1/((1+d)(1+d^2)))$$

$$\lim_{d \rightarrow 1} (1-d)U_1 = (80 + 80 + 80 + 90)(1/4) \text{ el pago promedio del ciclo.}$$

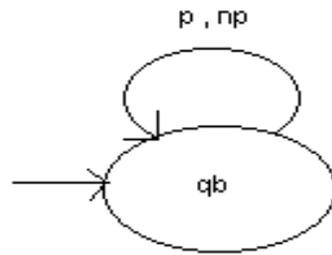
Apéndice B

Diagramas de otras máquinas consideradas explícitamente en este trabajo

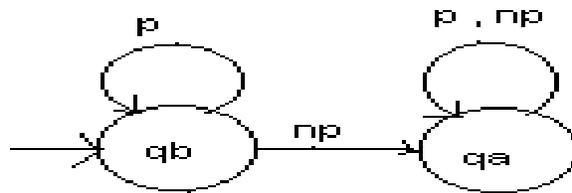
Extractor incondicional en a



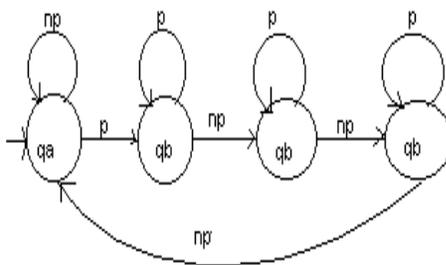
Extractor incondicional en b



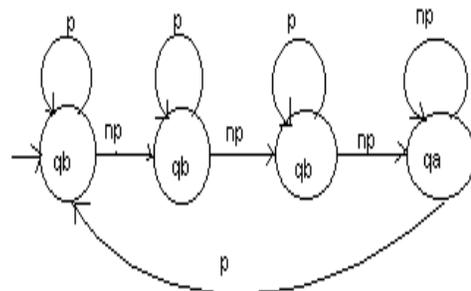
Extractor implacable



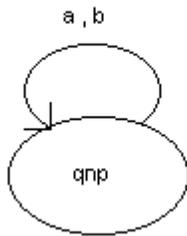
Extractor Período de gracia



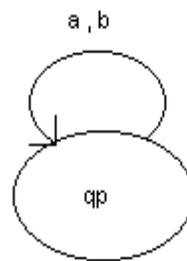
Extractor que elige regularmente b pero se desvía alguna vez a a



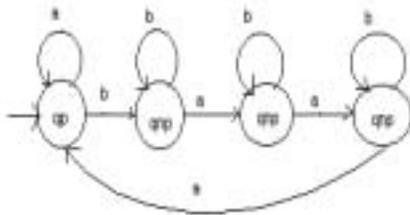
Conservacionista incondicional en np



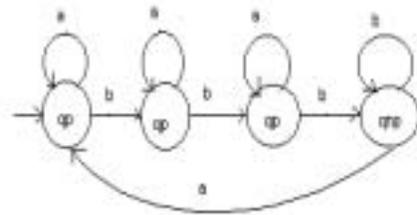
Conservacionista incondicional en p



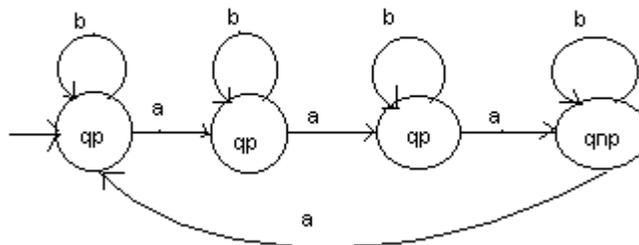
conservacionista que inicialmente decide p y luego puede otorgar un periodo de gracia al extractor eligiendo np



Conservacionista que elige regularmente p y alguna vez se desvía a np



Conservacionista que sistemáticamente elige p pero alguna vez baja la guardia y elige np



Bibliografía

- ALEXANDER, Robert (2000) "Modelling Species Extinction: The Case for Non-Consumptive Values". *Ecological Economics*. 35, 259-269.
- BINMORE, Ken (1994) *Teoría de Juegos*. McGraw Hill. España.
- COLEMAN, James S. (1987) "Norms as Social Capital". En Gerard Radnitzky y Peter Bernholz, eds., *Economic Imperialism. The Economic Approach Applied Outside the Field of Economics*, 133-155. New York: Paragon House.
- GIBBONS, Robert (1993) *Un Primer Curso de Teoría de Juegos*. Antoni Bosch Ed.. Barcelona.
- HANLEY, Nick; SHOGREN, Jason F.; y WHITE, Ben (1997) *Environmental Economics in Theory and Practice*. Oxford University Press. Oxford.
- HODGSON, Geoffrey M. (2000) "La Ubicuidad de los Hábitos y las Reglas". *Revista de Economía Institucional*. 3, 11-43.
- METRICK, Andrew y WEITZMAN, Martin (1996) "Patterns of Behavior in Endangered Species Preservation". *Land Economics*. 72 : 1-16.
- OSTROM, Elinor (1990) *Governing the Commons. The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press.
- PEARCE, David W. y TURNER, R. Kerry (1995) *Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente*. Celeste Ediciones. Madrid.
- PICCIONE, Michele y RUBINSTEIN, Ariel (1993) "Finite Automata Play a Repeated Extensive Game". *Journal of Economic Theory* 61, 160-168.
- RUBINSTEIN, Ariel (1986) "Finite Automata Play the Repeated Prisoner's Dilemma." *Journal of Economic Theory*. 39, 83-96.
- RUBINSTEIN, Ariel (1998) *Modeling Bounded Rationality*. MIT Press. Cambridge Massachusetts.
- SWANSON, Timothy M. (1994) "The Economics of Extinction Revisited and Revised: A Generalized Framework for the Analysis of the Problems of Endangered Species and Biodiversity Losses." *Oxford Economic Papers* 46, 800-821.