Fundamentos Económicos e Instrumentos de la Política Ambiental

Marcelo Caffera
Universidad de Montevideo, Uruguay

Curso "Economía de la Fiscalización Ambiental", Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Mayo 2007

1 Supuestos Generales

El objetivo de esta primer parte es presentar la teoría básica detrás del diseño de la política ambiental.

Para comenzar, suponemos que la contaminación *no es acumulable* en el medio ambiente, sino que se trata de un flujo que causa daño mientras se emite y el tiempo que demora en degradarse o disiparse. Ejemplos son: el ruido, la contaminación orgánica, etc. Esto presupone que el medio receptor de la contaminación tiene cierta capacidad de asimilación. Este supuesto nos permite trabajar en un marco *estático* que simplifica la exposición.

También supondremos que la contaminación es la *única* falla de mercado.

2 La Contaminación como Sub-Producto de las Firmas

Suponga una firma competitiva que produce y vende un bien q. Para hacerlo, compra un vector de insumos $\mathbf{x}$ cuyos precios, vector $\mathbf{w}$, toma como dados. La producción de q obedece a una función de producción $f(\mathbf{x})$, que es cóncava, monótonamente creciente, y continuamente diferenciable dos veces. La produción de q genera emisiones de un contaminante e al ambiente como producto-colateral. Estas emisiones se producen de acuerdo a la función $h(\mathbf{x})$, la cual es convexa y continuamente diferenciable dos veces.

Consideremos el siguiente problema: la firma quiere minimizar los costos de producir un nivel dado de producto $\overline{q}$ mientras cumple con un estándar de emisión $\overline{e}$. Esto es,

$$\begin{gathered} \min_x \mathbf{wx} \\ \text{sujeto a } \overline{q} \leq f(\mathbf{x}) \\ \overline{e} \geq h(\mathbf{x}) \\ \overline{e} \in (o, e^u) \end{gathered}$$

e^u es el nivel de emisiones que la firma produciría en ausencia de regulaciones. Esto es, $e^u = h(\mathbf{x}^u)$, donde $\mathbf{x}^u = \arg\max\left[pf(\mathbf{x}) - \mathbf{wx}\right]$. La solución al problema (1) es el vector de demandas de insumos *condicionales* $\mathbf{x}(\mathbf{w},\overline{q},\overline{e})$. La función de costos (mínimos) de la firma es entonces

$$c(\mathbf{w},\overline{q},\overline{e}) = \mathbf{wx}(\mathbf{w},\overline{q},\overline{e})$$

Bajo los supuestos sobre $f(\mathbf{x})$ y $h(\mathbf{x})$, la función $c(\mathbf{w},\overline{q},\overline{e})$ es no-creciente en el estándar de emisiones $\overline{e}$, y es conjuntamente convexa en $(\overline{q},\overline{e})$. (El lector puede demostrar estas afirmaciones como ejercicio)

Para simplificar la notación suprimiremos las "barras" sobre q y e de aquí en adelante. No debemos olvidar por ello que q y e son niveles objetivos de producción y contaminación. Además, para simplificar el análisis que sigue, haremos los siguientes supuestos:

1. $c(\mathbf{w}, q, e)$ es continuamente diferenciable dos veces en todos sus argumentos.

2. $c(\mathbf{w}, q, e)$ es estrictamente creciente en q y estrictamente decreciente en e.

3. $c(\mathbf{w}, q, e)$ es estrictamente convexa en (q, e)

3 Una Firma Contaminante en un Mercado Competitivo: La Función de Beneficios

Supongamos que la firma maximiza beneficios y ofrece su producto en un mercado perfectamente competitivo. La firma ofrecerá el nivel de q que maximice $pq - c(\mathbf{w}, q, e)$, la cual es estrictamente cóncava en q. Restringiendo nuestra atención a soluciones interiores, la condición de primer orden $p - c_q(\mathbf{w}, q, e) = 0$ es necesaria y suficiente para identificar la función de oferta $q(\mathbf{w}, p, e)$ de la firma. El efecto de un cambio en las emisiones objetivo e en la cantidad ofrecida depende del signo de la derivada cruzada c_{qe}. Si $c_{qe} < 0$ (un aumento en el nivel de emisiones objetivo (o el estándar) hace decrecer los costos marginales de producción), lo que podemos llamar *complementariedad en los costos,* entonces $q_e(\mathbf{w}, p, e) = -c_{qe}/c_{qq} > 0$; mayores niveles de emisiones objetivo (o estándar de emisiones más laxos) hacen aumentar el nivel de emisiones. Si $c_{qe} > 0$ sucede lo contrario.

Usando la función de oferta obtenemos la función de beneficios (máximos):

$$\pi(\mathbf{w}, p, e) = pq(\mathbf{w}, p, e) - c(\mathbf{w}, q(\mathbf{w}, p, e), e)$$

La función $\pi(\mathbf{w}, p, e)$ es estrictamente creciente y estrictamente cóncava en el nivel de emisiones objetivo. (El lector puede demostrar estas afirmaciones como ejercicio).

4 Un Mercado Competitivo con Contaminación: La Función de Daños

Ahora suponga que en un mercado competitivo existen n firmas como la descrita más arriba. El nivel total de emisiones generado es $E = \sum_{i=1}^{n} e_i$. Al mismo tiempo, existen J consumidores. La función de utilidad del consumidor j, $j = 1, ..., J$, tiene como argumentos al nivel de consumo de Q bienes, $c_j = (c_{1j}, ..., c_{Qj})$, y al total de emisiones E. El consumidor j resuelve el siguiente problema:

$$\max_{c_j} U_j(c_j, E)$$

sujeto a

$$\mathbf{p}c_j = R_j$$

donde $\mathbf{p} = (p_1, ...p_Q)$ es el vector de precios de los bienes de consumo y R_j es la riqueza del individuo j. De este problema se obtiene la función de utilidad indirecta $V_j(\mathbf{p}, R_j, E) = U_j(c_j^*(\mathbf{p}, R_j, E), E)$, donde c_j^* es la solución al problema anterior. Asumimos que $V_j(\mathbf{p}, R_j, E)$ es doblemente diferenciable en todos sus argumentos y que $\partial V_j/\partial E < 0$ y $\partial^2 V_j/\partial E^2 < 0$. Con estos supuestos, podemos definir la función de daños individual para el individuo j como $d_j(\mathbf{p}, R_j, E) = V_j(\mathbf{p}, R_j, E = 0) - V_j(\mathbf{p}, R_j, E)$. La función de daños sociales se define como la suma de los daños individuales:

$$D(\mathbf{p}, R_1, , ...R_J, E) = \sum_{j=1}^{J} d_j(\mathbf{p}, R_j, E)$$

Dado los supuestos sobre V_j, la función de daños sociales es estrictamente creciente y convexa en E.

Para simplificar la notación un poco, de aquí en adelante escribiré la función de beneficios $\pi_i(\mathbf{w}, p, e)$ como $\pi_i(e)$. Como estamos suponiendo que los precios son exógenos a los comportamientos individuales (estamos en competencia perfecta), esto no tiene mayor peligro que el de olvidarse de que en realidad están allí, determinando $\pi_i(e)$. De la misma forma, escribiré $D(\mathbf{p}, R_j, E)$ simplemente como $D(E)$.[1]

5 Óptimo Social y la Sub-Optimalidad de los Mercados Competitivos

5.1 Modelo de Elección de Emisiones

El bienestar social se define como la suma de los beneficios de todas las firmas menos los daños de la contaminación. Utilizando la función de beneficios (máximos) $\pi_i(e)$ y la función de daños $D(E)$, definimos el problema a resolver por el

[1] Como se aprecia, el nivel de daños estará determinado por el nivel de riqueza de los individuos. Por lo general ello va a significar que, de ser la contaminación un "mal público", el nivel óptimo de la externalidad esté determinado por la riqueza de las víctimas. El caso en el cuál esto no es así es aquel en el cual la función de utilidad es cuasi-lineal en un *numerario* (un numerario es el gasto en todos aquellos bienes aparte de los que están bajo consideración, tomado como un solo bien). No profundizo aquí sobre este tema. El lector puede demostrarlo como ejercicio.

planificador social:

$$\max_{(e_1,\ldots e_n)} \sum_{i=1}^{n} \pi_i(e_i) - D(E)$$

$$\text{sujeto a } e_i \geq 0 \text{ y } E = \sum_{i=1}^{n} e_i$$

Dados los supuestos sobre las funciones, este problema tiene como condiciones necesarias y suficientes:

$$\pi_i'(e_i^*) - D'(E^*) \leq 0, \text{ con igualdad si } e_i^* > 0 \tag{1}$$

Esta condición establece que el nivel eficiente (positivo) de emisiones es aquel en donde los beneficios marginales de contaminar igualan a los daños marginales. Como $D'(E^*) = \sum_{j=1}^{J} d_j'(E^*)$, la suma de los daños marginales que la contaminación provoca en cada uno de los consumidores, las condiciones anteriores equivalen a las condiciones de optimalidad de Samuelson para un mal público.

En ausencia de regulación respecto al nivel de emisiones, la firma competitiva maximizará $\pi_i(e)$, eligiendo el nivel de emisiones e_i^u que satisface las siguientes condiciones, las cuales son necesarias y suficientes:

$$\pi_i'(e_i^u) \leq 0, \text{ con igualdad si } e_i^u > 0$$

Comparando la condiciones de primer orden del planificador social y de las firmas competitivas, es fácil ver que si $e_i^u > 0$, en un mercado competitivo sin regulación las firmas producirán más contaminación que la socialmente óptima: $(e_i^u > e_i^*)$

6 Política Ambiental con Información Perfecta

¿Qué nivel de emisiones estará interesado en lograr un planificador social (o un regulador ambiental) interesado en maximizar el bienestar social? A partir del análisis del punto anterior la respuesta es clara: $E^* = \sum e_i^*$, tal que $\acute{\pi}_i(e^*) = \acute{D}(E^*)$. El regulador debe internalizar completamente los daños sociales externos provocados por la contaminación. Ésta puede no ser una tarea sencilla. De hecho no lo es. Pero por el momento nos mantenemos en el enfoque económico clásico (pigouviano), donde el regulador no tiene problemas de información: puede observar la función de daños de la contaminación, la función de beneficios de las firmas y sus niveles de emisiones sin costo. Esto nos permite presentar los aspectos básicos de los diferentes instrumentos con los que cuenta el regulador para lograr su objetivo, lo que se hace a continuación.

Los instrumentos de política ambiental se pueden clasificar en dos categorías: los incentivos económicos y los de ”orden y control”. Dentro de los primeros podemos encontrar a los impuestos a las emisiones, los permisos de emisión transferibles, los subsidios a las emisiones, los impuestos a los productos finales, los sistemas de depósito y reembolso, así como otros un poco menos famosos. Los de orden y control incluyen límites a las emisiones, límites al nivel de producción o al uso de insumos, directrices sobre la tecnología, etc.

En esta sección repasamos estos instrumentos, los comparamos entre sí, y vemos algunas de sus ventajas y desventajas cuando no hay problemas de información asimétrica entre el regulador y las firmas reguladas, y los mercados son competitivos.

6.1 Impuestos a las Emisiones

Sea t un impuesto a las emisiones definido como una cantidad de dinero que las firmas deben pagar por unidad (kg., tonelada, etc.) de emisión de un contaminante en particular al ambiente. Enfrentada a t, la firma i resolverá el siguiente problema:

$$\max_{e_i} \pi_i(e_i) - te_i$$

cuyas condiciones necesarias y suficientes son

$$\pi_i'(e_i^o) - t \leq 0, \text{ con igualdad si } e^o > 0$$

Es fácil ver que si el regulador fija $t = D'(E^*)$, la firma emitirá $e^o = e^*$, de acuerdo con la ecuación 1.

Este resultado, que es muy sencillo de ver, puede ser demostrado formalmente planteando el problema que resuelve el planificador. Éste es maximizar el excedente total de la contaminación sujeto a que las firmas maximizan su beneficio:

$$\max_{(e_i,t)} \sum_{i=1}^{n} \pi_i(e) - D(E)$$
$$\text{sujeto a } e_i = \arg\max \pi_i(e_i) - te_i \text{ para todo } i$$

La restricción a su vez se puede re-escribir utilizando las condiciones de maximización de las empresas como:

$$\max_{(e_i,t)} \sum_{i=1}^{n} \pi_i(e_i) - D(E)$$
$$\text{sujeto a } \pi_i'(e_i) - t \leq 0 \text{ para todo } i$$

El Lagrangeano de este problema es

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^{n} \pi_i(e_i) - D(E) + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \left(t - \pi_i'(e_i)\right)$$

y sus condiciones de Kuhn-Tucker las siguientes:

$$\begin{aligned}
1)\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial e_i} &= \pi_i'(e_i^*) - D'(E^*) + \lambda_i \pi_i''(e_i^*) \leq 0; \text{con igualdad si } e_i^* > 0 \\
2)\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta t} &= \lambda_i \leq 0, \text{con igualdad si } t^* > 0 \\
3)\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \lambda_i} &= t^* - \pi_i'(e_i^*) \geq 0, \lambda_i \geq 0, \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \lambda_i} * \lambda_i = 0
\end{aligned}$$

De 2) tenemos que $\lambda_i = 0$ para todas las i, para todo $t > 0$. Por lo que de 1) sale que para todas las firmas con emisiones positivas $\pi_i'(e_i^*) = D'(E^*)$. Del problema de las firmas sabemos que cuando las emisiones son positivas la firma iguala $t^* = \pi_i'(e_i^*)$. Por lo que, en definitva, tenemos que $t^* = \pi_i'(e_i^*) = D'(E^*)$.

El impuesto t no es otra cosa que el famoso impuesto "Pigouviano". Por lo tanto, el resultado nos dice que si enfrentamos a las empresas a un impuesto por unidad de emisión igual al daño marginal que la contaminación produce *en el nivel de emisiones que maximiza bienestar,* firmas que maximizan beneficios producirán el nivel eficiente de emisiones. La externalidad se internalizará.

6.1.1 Impuestos a las Emisiones y el Largo Plazo

Los impuestos pigouvianos proveen los incentivos correctos (de entrada y salida) también en el largo plazo, asumiendo firmas simétricas. Para verlo, planteamos el problema del planificador social un tanto diferente.

El Modelo de la Elección del Nivel de Producto y el Esfuerzo de Abatimiento Supongamos que en lugar de maximizar los beneficios netos de la contaminación (como en el modelo anterior), el planificador social maximizara el bienestar de corto plazo en función de q_i y α_i, siendo α el nivel de "esfuerzo" o "actividad" de abatimiento de emisiones. Introduciremos un modelo en el cual hay una relación explítica entre entre e_i, q_i y α_i, la cual recoge la relación tecnológica entre estas variables. Esta función es $e_i = e_i(q_i, \alpha_i)$, la cual se asume creciente y convexa para cualquier nivel de producción ($e_q > 0; e_{qq} > 0$), y decreciente y convexa en el nivel de esfuerzo de abatimiento, para cualquier nivel de producto ($e_\alpha < 0; e_{\alpha\alpha} > 0$). La convexidad con respecto a α refleja rendimientos decrecientes en el proceso de tratamiento de efluentes o de abatimiento de las emisiones en general.

La función de costos de las firmas también debe ser redefinida en función de $\alpha : c_i(\mathbf{w}, q_i, \alpha_i) = \mathbf{w} \times \mathbf{x}_i(\mathbf{w}, q_i, \alpha_i)$, donde el vector de demandas condicionadas de insumos $\mathbf{x}(\mathbf{w}, q_i, \alpha_i)$ es ahora la solución del siguiente problema:

$$\begin{gathered}
\min_{x_i \geq 0} \mathbf{w}\mathbf{x}_i \\
\text{sujeto a: } q_i \leq f(\mathbf{x}_i) \\
\text{y } \alpha_i \leq b(\mathbf{x}_i)
\end{gathered}$$

donde $f(\mathbf{x}_i)$ es la función de producción ya definida y, similarmente a lo que fue $h(\mathbf{x}_i)$, $b(\mathbf{x}_i)$ es una función diferenciable dos veces y estrictamente cóncava que indica el nivel eficiente de abatimiento para cada vector de insumos. Como consecuencia de la concavidad de $f(\mathbf{x}_i)$ y $b(\mathbf{x}_i)$, la función de costos $c_i(\mathbf{w}, q_i, \alpha_i)$ (o simplemente $c_i(q_i, \alpha_i)$) es convexa.

El problema del planificador social en este caso será maximizar el excedente de los consumidores y de los productores, menos los daños ambientales. Para plantearlo, primero definimos la inversa de la función de demanda del mercado $P = P(Q)$, con $Q = \sum_{i=1}^{n} q_i$.[2] El problema del regulador será elegir q_i y α_i reconociendo que las firmas minimizan costos y que hay una relación tecnológica entre q y e. Este problema, que podemos llamar *el problema de la elección del nivel de producción y esfuerzo de abatimiento,* será

$$\max_{q_i,\alpha_i} W(q_i,\alpha_i) = \int_0^{\sum q_i} P(Q)dQ - \sum_{i=1}^{n} c_i(q_i,\alpha_i) - D(E)$$

$$\text{sujeto a:}$$

$$E = \sum_{i=1}^{n} e_i$$

$$e_i = e_i(q_i,\alpha_i)$$

Las condiciones necesarias y suficientes para maximizar el bienestar en el corto plazo serán:

$$\begin{aligned}
1)\frac{\partial W}{\partial q_i} &= P(Q^*) - \frac{\partial c_i(q_i^*,\alpha_i^*)}{\partial q_i} - D'(E^*)\frac{\partial e_i(q_i^*,\alpha_i^*)}{\partial q_i} \leq 0, \text{con igualdad si } q_i^* > 0 \\
2)\frac{\partial W}{\partial \alpha_i} &= -\frac{\partial c_i(q_i^*,\alpha_i^*)}{\partial \alpha_i} - D'(E^*)\frac{\partial e_i(q_i^*,\alpha_i^*)}{\partial \alpha_i} \leq 0, \text{con igualdad si } e_i^* > 0
\end{aligned}$$

Para soluciones interiores, la condición *1)* dice que el nivel óptimo de producción $Q^* = \sum_{i=1}^{n} q_i^*$ debe ser tal que iguale el ingreso marginal con la suma de los costos marginales de producción y los daños marginales que ésta provoca. Para el caso del nivel eficiente de abatimiento, la condición 2) dice que éste debe ser tal que se iguale los beneficios marginales de la contaminación (costos ahorrados) a los daños marginales que ella provoca.

Estamos ahora en condiciones de utilizar este modelo para analizar la optimalidad del impuesto a las emisiones en el largo plazo (Spulber, 1985). Asumimos que las firmas competitivas son idénticas, que hay libre entrada y salida y que las firmas incurren en un costo fijo F al entrar. En el largo plazo, el planificador social va a elegir no sólo q_i y α_i sino también n, el número de firmas. Con el supuesto de firmas idénticas $Q = nq$ y el planificador resuelve

$$\max_{(q,e,n)\geq 0} W(q,\alpha,n) = \int_0^{nq} P(Q)dQ - nc(q,\alpha) - nF - D(ne)$$

[2] La función de demanda es independiente de las emisiones si asumimos funciones de utilidad individuales cuasi-lineales en el nivel de emisiones.

sujeto a:

$$E = \sum_{i=1}^{n} e_i$$

$$e = e(q, \alpha)$$

Las condiciones de optimalidad serán

$$
\begin{aligned}
1)\frac{\partial W}{\partial q} &= P(Q^*)n - n\frac{\delta c(q^*, \alpha^*)}{\delta q} - D'(E^*)n\frac{\partial e(q^*, \alpha^*)}{\partial q} \leq 0, \text{con igualdad si } q^* > 0 \\
2)\frac{\partial W}{\partial \alpha} &= -\frac{\partial c_i(q_i^*, \alpha_i^*)}{\partial \alpha_i}n - D'(E^*)\frac{\partial e(q^*, \alpha^*)}{\partial \alpha}n \leq 0, \text{con igualdad si } e^* > 0 \\
3)\frac{\partial W}{\partial n} &= P(n^*q^*)q^* - c(q^*, \alpha^*) - F - D'(n^*e^*)e^* \leq 0, \text{con igualdad si } n^* > 0
\end{aligned}
$$

Las condiciones 1) y 2) repiten las condiciones anteriores (la única diferencia

es que están multiplicadas por n). La tercera condición es la condición de cero beneficios a nivel de la sociedad en su conjunto. Dice que el número óptimo de firmas debe ser tal que los ingresos privados sean iguales a los costos privados más los costos externos (daños).

Volvamos ahora al caso del impuesto. Enfrentada a un impuesto a las emisiones, una firma competitiva resolverá el siguiente problema:

$$\max_{q_i, \alpha_i} \pi_i (q_i, \alpha_i) = Pq_i - c_i(q_i, \alpha_i) - te_i(q_i, \alpha_i)$$

Mientras tanto, la condición de cero beneficios privados de largo plazo es

$$P(nq)q - c(q, \alpha) - F - te(q, \alpha) = 0$$

Comparando con 3), está claro que fijando $t = D'(n^*e^*)$ la condición de cero beneficios en el óptimo social se cumple. La asignación que produzca el mercado competitivo regulado será idéntica a la asignación socialmente óptima.

Comentarios con respecto a los impuestos a las emisiones en un contexto de equilibrio general: (1) los niveles del impuesto pigouviano en presencia de otros impuestos distorsionantes deberán ser menores al daño marginal social (Bovenberg and Goulder, 1996), (2) el argumento del doble-dividendo (ver Xepapadeas, 1997, pág. 14)

6.2 Subsidios

Bajo un esquema de subsidios el regulador le propondrá a la firma un subsidio por unidad de emisión por debajo de un determinado nivel $\bar{e}_i$. Un esquema lineal sería $s(\overline{e}_i - e_i)$, donde s es el subsidio por unidad de reducida de emisiones por debajo del objetivo $\overline{e}_i$.

Bajo este esquema, la firma i resolverá el siguiente problema

$$\max_{e_i \geq 0} pq(\mathbf{w}, p, e_i) - c(\mathbf{w}, q(\mathbf{w}, p, e_i), e_i) - s(\overline{e}_i - e_i) = \pi(\mathbf{w}, p, e_i) - s(\overline{e}_i - e_i)$$

$$\text{O simplemente } \max_{e_i \geq 0} \pi(e_i) - s(\overline{e}_i - e_i)$$

Como este problema difiere del problema que tenía la firma cuando estaba sometida a un impuesto por unidad de emisión únicamente en la constante $\overline{e}$, un subsidio por unidad de emisiones igual al daño marginal social de las emisiones cuando éstas están en su nivel óptimo ($s = D'(E^*)$) hará que la firma emita el nivel óptimo e_i^*.

La diferencia entre un impuesto y un subsidio se da en el largo plazo. Ambos instrumentos no producen los mismos incentivos respecto de la decisión de entrada y salida de las firmas en el mercado, y por lo tanto el nivel de contaminación que producirán en el largo plazo no será el mismo.

La condición de equilibrio de mercado de largo plazo en el caso de un esquema de subsidios será

$$P(nq)q - c(q, e) - F + s(\overline{e} - e) = 0$$

Si igualamos $s = D'(n^* e^*)$ está claro que habrá beneficios positivos (iguales a $s\overline{e}$) cuando el número de firmas sea el óptimo, por lo que entrarán más empresas. El número de firmas de largo plazo en un esquema de subsidios será mayor al óptimo. (Mientras que bajo un impuesto pigouviano el número de firmas será menor al número de firmas del mercado sin regular). Un subsidio puede aumentar el número de firmas con relación al mercado sin regular y aumentar la contaminación (ver Baumol y Oates, 1988).

6.3 Permisos de Emisión Transferibles

En lugar de cobrar por unidad de emisión el regulador puede emitir una cantidad de licencias o permisos para contaminar, tal que la cantidad de permisos emitidos sea igual a la cantidad total máxima de emisiones permitidas, de acuerdo a la ley. Cada uno de estas licencias le otorga a la firma que lo posee el permiso legal de emitir una unidad (kg., tonelada, etc.) de un contaminante en particular (NO_x, SO_2, etc.), generalmente durante un período de tiempo determinado (un año, por ejemplo). Se atribuye siempre a Crocker (1966) y a Dales (1988) la propuesta de este esquema por primera vez.

Sea $L = \sum_i l_i$ la cantidad de permisos emitidos por el regulador. Sea l_i^0 la cantidad inicial de permisos en poder de la firma i. La demanda final de permisos por parte de la firma es $(l_i - l_i^0)$. Asumiendo que la firma produce un nivel de emisiones igual a la cantidad de permisos que tiene ($e_i = l_i$,es decir, cumple la normativa), el problema que resuelve la firma competitiva es

$$\max_{l_i \geq 0} pq_i(\mathbf{w}, p, l_i) - c(\mathbf{w}, q(\mathbf{w}, p, l_i), l_i) - p^L(l_i - l_i^0)$$

O simplemente

$$\max_{l_i \geq 0} \pi_i(l_i) - p^L(l_i - l_i^0)$$

donde p^L es el precio de mercado de los permisos. La condición necesaria y suficiente de primer orden para el l_i que maximiza beneficios será

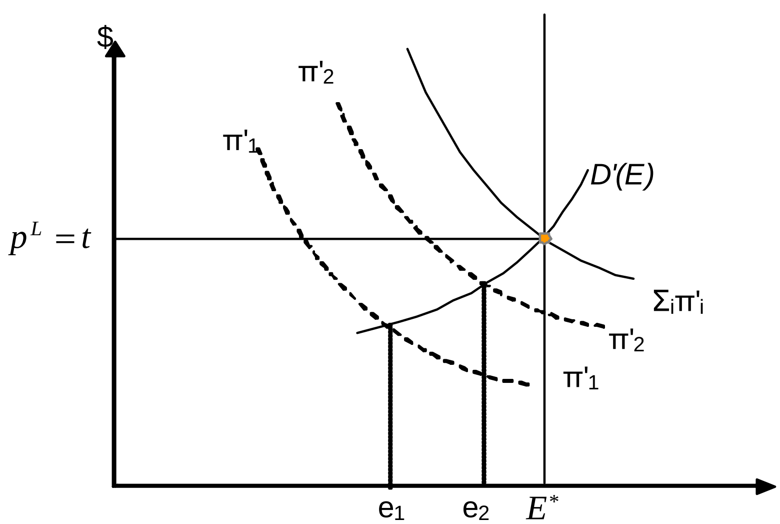
$$\pi'_{i'}(l_i) - p^L \leq 0, \text{con igualdad si } l_i > 0 \tag{2}$$

De estas condición del problema de la firma i surge que si $p^L = D\'(E^*), l_i = l_i^*$, o lo que es lo mismo, suponiendo cumplimiento perfecto, $e_i = e_i^*$.

De esta misma condición podemos obtener la función de demanda de permisos por parte de la firma: $l_i(\mathbf{w}, p, p^L)$. El supuesto de que $l = e$ nos permite definir esta función como $e_i(p^L)$.Notar que la demanda de permisos por la firma i viene dada por la curva de beneficios marginales de e_i.

Para que se cumpla $p^L = D\'(E^*)$, el regulador tiene que emitir $L = E^*$ permisos y el mercado de permisos tiene que alcanzar el equilibrio ($E^* = \sum e_i = \sum l_i$, oferta = demanda). (Ver Figura 1). Para que el mercado esté en equilibrio, la demanda agregada de permisos tiene que cortar a la "recta" E^* en el mismo punto que $D\'(E^*)$. Esto es fácil de ver ya que el regulador fija $L = E^*$ justamente en función de el punto de corte de $D\'(E^*)$ con la demanda agregada de permisos $E(p^L) = \sum e_i(p^L)$, que no es otra cosa que la suma horizontal de las $\pi\'_i(w, p, e_i)$.

FIGURA 1: Equilibrio en el Mercado de Permisos



La Figura 1 también ilustra que el precio resultante del mercado de permisos transables, bajo los supuestos que se hicieron hasta el momento, es igual al impuesto a las emisiones necesario para alcanzar E^*. Esto no debería sorprender, ya que en el caso de los permisos lo que hace el regulador es fijar la cantidad total permitida de emisiones E^*, dejando que el mercado fije el precio $t = p^L$, y en el segundo fija el precio $t = p^L$ y para que las firmas terminen emitiendo E^*.

6.3.1 En el largo plazo:

Manteniendo nuestro supuesto de cumplimiento perfecto, y asumiendo que las firmas son iguales, todas compran permisos, y que el gobierno remata los permisos al inicio, la condición de largo plazo de cero beneficios para cada firma será:

$$\pi_i(e_i) - p^L e_i = 0$$

Por lo que $p^L = D'(E^*)$, asegura el óptimo social de largo plazo. Si por el contrario, al inicio del período el gobierno opta por distribuir los permisos entre las firmas sin costo en función de algún criterio como emisiones históricas ("grandfathering") la condición será

$$\pi_i(e_i) - p^L(e_i - l_i^0)$$

y habrá beneficios positivos iguales a $p^L l_i^0$ cuando $n = n^*$. Habrá más firmas que n^* en el largo plazo. Esto no significará más contaminación (bajo el supuesto de cumplimiento perfecto), sino $p^L > D'(E^*)$.

6.4 Regulación de "Mandato y Control"

Los economistas no se ponen de acuerdo acerca de cómo llamar al conjunto de instrumentos de regulación que no son incentivos económicos. El nombre más conocido es el de "mandato y control" (de "command and control" en inglés). Sin embargo hay quienes han criticado esta denominación. Lo cierto es que este nombre pretende agrupar a todos aquellos intrumentos a través de los cuales el regulador le dice a las firmas directamente qué hacer; ya sea esto fijarles un límite máximo de contaminación o la obligatoriedad del uso de una determinada tecnología o procesos, de abatimiento o de producción. En contraposición, en los instrumentos económicos vistos hasta ahora, el regulador nunca fijaba la cantidad máxima de emisiones que una firma individual podía realizar. Lo que hacía era fijar un precio que actuata como un incentivo tal que la firma maximizadora de beneficios terminara emitiendo la cantidad que se buscaba, o en su defecto, en el caso de los mercados de permisos, fijaba la cantidad total de emisiones. En ningún caso establecía directivas oligatorias sobre el *cómo* abatir emisiones o producir.

6.4.1 Estándares de Emisión

En este caso el regulador especifica el límite máximo de emisiones para cada firma. Sea $\bar{e}_i$ el máximo de emisión permitido para la firma i (estándar). Utilizando el modelo de elección del nivel de producción y abatimiento, la firma elige el nivel de producción q y el nivel de abatimiento α que maximiza sus beneficios:

$$\begin{gathered}\underset{(q_i,\alpha_i)\geq 0}{Max}\, pq_i - c_i(q_i,\alpha_i) \\ \text{sujeto a } e_i \leq \bar{e}_i, \\ \text{y } e_i = e_i(q_i,\alpha_i)\end{gathered}$$

El lagrangeano de este problema es:

$$\mathcal{L} = pq_i - c_i(q_i,\alpha_i) + \lambda_i(\bar{e}_i - e_i(q_i,\alpha_i))$$

Y las condiciones de Khun-Tucker son:

$$\begin{aligned}1)\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} &= p - \frac{\partial c_i(q_i^o,\alpha_i^o)}{\partial q_i} - \lambda_i \frac{\partial e_i(q_i^o,\alpha_i^o)}{\partial q_i} \leq 0;\ \text{igual a cero si } q_i^o > 0 \\ 2)\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha_i} &= -\frac{\partial c_i(q_i^o,\alpha_i^o)}{\partial \alpha_i} - \lambda_i^o \frac{\partial e_i(q_i^o,\alpha_i^o)}{\partial \alpha_i} \leq 0;\ \text{igual a cero si } \alpha_i^o > 0 \\ 3)\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_i} &= \bar{e}_i - e_i(q_i^o,\alpha_i^o) \geq 0; \lambda_i^o \geq 0; (\bar{e}_i - e_i(q_i^o,\alpha_i^o))\lambda_i^o = 0\end{aligned}$$

Para funciones de costos estríctamente crecientes en α, y funciones de emisiones estríctamente decrecientes en α, a partir de la segunda condición vemos que $\lambda_i^o > 0$. Por consiguiente, la restricción se cumplirá con igualdad: será óptimo para la firma emitir hasta el estándar. El valor λ_i^o del multiplicador es el beneficio marginal de incrementar el estándar de emisión. Si el regulador fija el estándar $\bar{e}_i = e_i^*$, se alcanzará el óptimo E^*.

6.4.2 Estándar Tecnológico

El regulador también puede fijar un estándar tecnológico. ¿Porqué lo haría? Porque monitorear emisiones es más costoso, o directamente imposible como en el caso de la contaminación "no puntual" (escorrentía de agroquímicos). Sea α el parámetro que mide el nivel de tecnología y sea $\bar{\alpha}$ el nivel mínimo de tecnología exigido por el regulador. El problema de la firma en este caso es:

$$\begin{gathered}\underset{(q_i,\alpha_i)\geq 0}{Max}\, pq_i - c_i(q_i,\alpha_i) \\ \text{sujeto a } \alpha_i \geq \bar{\alpha}_i,\end{gathered}$$

El lagrangeano para este problema es:

$$\mathcal{L} = pq_i - c_i(q_i, \alpha_i) - \lambda_i(\bar{\alpha}_i - \alpha_i)$$

Las condiciones de Kuhn-Tucker son:

$$\begin{aligned}
1)\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} &= p - \frac{\partial c_i(q_i^o, \alpha_i^o)}{\partial q_i} \leq 0; \text{igual a cero si } q_i^o > 0 \\
2)\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha_i} &= -\frac{\partial c_i(q_i^o, \alpha_i^o)}{\partial \alpha_i} + \lambda_i^o \leq 0; \text{igual a cero si } \alpha_i^o > 0 \\
3)\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_i} &= -\bar{\alpha}_i + \alpha_i^o \geq 0; \lambda_i^o \geq 0; (-\bar{\alpha}_i + \alpha_i)\lambda_i^o = 0
\end{aligned}$$

De 2) podemos ver que $\lambda_i^o = \frac{\partial c_i(q_i^o, \alpha_i^o)}{\partial \alpha_i} > 0$ para todo $\alpha_i^o > 0$. A su vez, $\lambda_i^o > 0$ quiere decir que $\alpha_i^o = \bar{\alpha}_i$. De 1) tenderemos que $q_i^o = q_i(\bar{\alpha}_i)$, y por consiguiente $e_i^o = e_i\left[q_i(\bar{\alpha}), \bar{\alpha}\right] = e_i(\bar{\alpha})$.Vemos entonces que existe una relación directa entre e_i y $\bar{\alpha}$, el estándar tecnológico y el nivel de emisiones. Si el regulador quiere lograr un nivel e_i^+ de emisiones, tendría que fijar un estándar tecnológico $\alpha_i^+ = e_i^{-1}(e_i^+)$.

Aunque el regulador pueda fijar α ó fijar e y llegar al mismo resultado, comparando las CPO del problema de la firma en ambos casos podemos ver que la combinación de nivel de producción q y nivel de abatimiento α no serán las mismas:

$$1)\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = p - \frac{\partial c_i(q_i^o, \alpha_i^o)}{\partial q_i} - \lambda_i \frac{\partial e_i(q_i^o, \alpha_i^o)}{\partial q_i} = 0$$

$$1)\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = p - \frac{\partial c_i(q_i^o, \alpha_i^o)}{\partial q_i} = 0$$

El término $\lambda_i \partial e_i(q_i^o, \alpha_i^o)/\partial q_i$ que aparece en la primer condición (estándar de emisión) disminuye la cantidad de producto óptimo. La firma competitiva enfrentada a un estándar de emisión no elige el nivel de producción donde el precio es igual al costo marginal ($CMg(q)$), sino donde $p - CMg(q) = \lambda_i \partial e_i(q_i^o, \alpha_i^o)/\partial q_i > 0$. Sin embargo, cuando se enfrenta a un estándar tecnológico, sí lo hace: $p - CMg(q) = 0$. La diferencia obedece a los grados de flexibilidad que ambos instrumentos otorgan a las firmas. El estándar tecnológico $\bar{\alpha}$ no le otorga ninguno. El estándar $\bar{e}$ sí: la firma puede producir menos q, en lugar de incrementar el abatimiento, para bajar emisiones y de esa manera cumplir con el estándar $\bar{e}$. Esta opción no está presente si el regulador fija α.

6.5 Externalidades en la Producción

Hasta ahora el análisis implícita o explícitamente hacia referencia a una externalidad que era un mal público y afectaba básicamente a consumidores. Sin embargo, las víctimas de la contaminación pueden ser firmas.

Suponga dos firmas ubicadas en la rivera de un río. La firma 1 está ubicada aguas arriba de la firma 2. La firma 1 utiliza el insumo x_1 en la producción de su producto de acuerdo a la función de producción $f_1(x_1)$. (x_1 es x_1^p, pero como

no hay abatimiento simplifico la notación). La actividad de la firma 1 genera emisiones e_1 de un contaminante dado de acuerdo a la función $h_1(x_1)$. Sean p_1 y w_1 los precios competitivos del producto y el insumo para la firma 1. Para la firma 2, que está aguas abajo, su nivel de producción depende no sólo de su insumo x_2, sino también del nivel de emisiones de la firma 1, e_1, de acuerdo a la función de producción $f_2(x_2, e_1)$. Las emisiones de 1 son una externalidad

negativa para la firma 2 ($\partial f_2/\partial e_1 < 0$). Sin regulación, la firma 1 resolverá el siguiente problema:

$$\underset{x_1 \geq 0}{max} p_1 f_1(x_1) - w_1 x_1$$

Por ende, la firma utilizará un nivel de insumo x_1^o, tal que $p_1 f_1'(x_1^o) = w_1$. Por lo tanto tendremos que $e_1 = e_1^o = h_1(x_1^o)$. La firma 2 toma e como dado y resuelve:

$$\underset{x_2 \geq 0}{Max} p_2 f_2(x_2, e_1^o) - w_2 x_2$$

Eligiendo utilizar la cantidad x_2^o de su insumo, la que determina de acuerdo a $p_2 \partial f_2(x_2^o, e_1^o)/\partial x_2 = w_2$. Dada esta condición, podemos escribir la elección de la firma 2 en función del nivel de emisiones de la firma $1 : x_2^o = x_2^o(e_1^o)$.

¿Es ésta situación eficiente? Veremos. Un regulador interesado en maximizar el bienestar va a resolver el siguiente problema:

$$\underset{(x_1,x_2)\geq 0}{Max} [p_1 f_1(x_1) - w_1 x_1] + [p_2 f_2(x_2, e_1) - w_2 x_2] - D(e_1)$$
$$\text{sujeto a } e_1 = h_1(x_1)$$

donde $D(e_1)$ son los daños sociales aparte de los que sufre la firma 2.

El regulador elegirá entonces el par (x_1^*, x_2^*) de acuerdo a las CPO:

$$\begin{aligned} 1) p_1 f_1'(x_1^*) + p_2 \frac{\partial f_2}{\partial e_1} h'(x_1^*) - D'(e_1) h'(x_1^*) &= w_1 \\ 2) p_2 \frac{\partial f_2(x_2^*)}{\partial x_2} &= w_2 \end{aligned}$$

Comparando estas CPO con las de las empresas se puede ver que el regulador podrá usar un impuesto

$$t = p_2 \frac{\partial f_2}{\partial e_1} + D\acute{}(e_1)$$

ó un estándar $\overline{e}_1 = h_1(x_1^*) = e_1^*$.

n firmas: Supongamos que hay n firmas indexadas por el sub-índice i, cuyas funciones de producción son $f_i(x_i, E), E = \sum e_i, e_i = h_i(x_i)$. Asumimos que $\partial f_i / \partial E < 0$ y $\partial^2 f_i / \partial x_i \partial E < 0$, es decir, el nivel agregado de emisiones E es una externalidad negativa para todas las firmas afectando negativamente el nivel de producción y el producto marginal del insumo x. Definamos $x_{-i} = (x_1, x_2, ..., x_{i-1}, x_{i+1}, ..., x_n)$ para todo $i = 1, ..., n$.Asumiendo que cada firma maximiza beneficios, la firma i resolverá:

$$\underset{x_i \geq 0}{Max} pf(x_i, E) - wx_i$$
$$\text{con}$$
$$E = \sum e_i$$
$$e_i = h_i(x_i)$$

Si $(x_1^o, ..., x_n^o)$ es un equilibrio de Nash, las elecciones óptimas de insumos x_i^o deben satisfacer:

$$1)p \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_i} + \frac{\partial f_i}{\partial E} h\acute{}_i(x_i^o) \right] - w \leq 0; \text{ con igualdad si } x_i^o > 0, \text{para todo } i = 1, ..., n$$

El nivel agregado de emisiones resultante es por lo tanto

$$E^o = \sum_i h_i(x_i^o)$$

Un regulador interesado en maximizar el bienestar de la sociedad y con la información para hacerlo, resolverá:

$$\underset{x_i \geq 0}{Max} \int_0^{\sum_i f_i(x_i, E)} P(Q) dQ - \sum_{i=1}^{n} w_i x_i$$
$$\text{con } Q = \sum_{i=1}^{n} f_i(x_i, E)$$
$$E = \sum e_i$$
$$e_i = h_i(x_i)$$

Suponemos $D(E)=0$; no hay daños para los consumidores.

Condiciones de optimalidad:

$$1^{*})P(Q)\left[\frac{\partial f_i(x_i^*,E^*)}{\partial x_i}+\frac{\partial f_i(x_i^*,E^*)}{\partial E}h_i^{\prime}(x_i^*)+\sum_{j\neq i}\frac{\partial f_j}{\partial x_i}h_i^{\prime}(x_i^*)\right]-w\leq 0;$$

$$\text{con igualdad si } x_i^*>0, \qquad \forall i=1,...,n.$$

Comparando 1) con 1*) vemos que las firmas por sí solas no tendrán en cuenta $\sum_{j\neq i}\frac{\partial f_j}{\partial x_i}h_i^{\prime}(x_i)$, por lo que $x_i^*<x_i^o$ y $e_i^*<e_i^o$.

Es fácil de ver que un impuesto $t=P(Q)\times\sum_{j\neq i}\partial f_j/\partial x_i h_i^{\prime}(x_i)$, o un estándar uniforme $\overline{e}_i=e_i^*=h_i(x_i^*)$, o un mercado de permisos con $L=E^*=\sum_i e_i^*$, puede, en este marco de información perfecta, ser usado por el regulador para alcanzar el óptimo. Esto se cumplirá para el caso simple de dos firmas aguas arriba/abajo, o en el caso general de un mal público que afecte a todos, incluída la firma que genera contaminación.

References

[1] Mas-Colell, A., M.D. Winston y J. R. Green (1995), ”Microeconomic Theory”, Oxford University Press.

[2] Spulber, Daniel F. (1985), "Effluent Regulation and Long-Run Optimality", *Journal of Environmental Economics and Management*, **12** (2), June, 103-16.

[3] Stranlund, John (1999), Fundamental Economics of Environmental Policy Design, mimeo.

[4] Xepapadeas, A. (1997), “Advanced Principles in Environmental Policy”, New Horizons in Environmental Economics, Edward Elgar.