

Adopción de nuevas tecnologías de abatimiento y regulación ambiental en oligopolios*

Adoption of New Abatement Technologies and Environmental
Regulation in Oligopolies

*Adriana Gama***

ABSTRACT

Background: A desirable property of the different environmental regulatory instruments is that they incentivize the adoption of cleaner abatement technologies. It is natural to assume that stricter regulatory policies incentivize a higher adoption of such technologies. Nonetheless, it has been shown that, under perfect competition, this is not always true.

Methodology: This article offers a theoretical study of the incentives of three different environmental regulatory instruments (taxes, tradable permits and emission standards), on the adoption of a new abatement technology for a Cournot oligopoly.

Results: As in perfect competition, if the marginal abatement cost curves of both technologies cross and the firms have different adoption costs, it is possible that high taxes, few tradable permits and a small emission standard (strict policies) discourage the adoption of new technologies.

Conclusions: When choosing a regulatory instrument, it is important to take into account the structure of the available abatement technologies. Otherwise, instead of incentivizing the use of cleaner technologies, the regulator might do the opposite if the policies are too strict.

Keywords: environmental regulation; abatement cost; taxes; tradable permits; emission standards; Cournot oligopoly; MAC curves. *JEL Classification:* D43, H23, L13, Q55, Q58.

* Artículo recibido el 11 de septiembre de 2017 y aceptado el 7 de diciembre de 2017. La autora agradece los útiles comentarios vertidos en el dictamen anónimo de *El Trimestre Económico*, que ayudaron a mejorar este manuscrito. Los errores remanentes son responsabilidad de la autora.

** Centro de Estudios Económicos, El Colegio de México (correo electrónico: agama@colmex.mx).

RESUMEN

Antecedentes: una característica deseable en los instrumentos de regulación ambiental es que fomenten la adopción de tecnologías de abatimiento más limpias. Es natural asumir que políticas de regulación más estrictas incentivan una mayor adopción de dichas tecnologías. Sin embargo, se ha demostrado que, bajo competencia perfecta, esto no siempre es así.

Metodología: este artículo ofrece un estudio teórico sobre los incentivos de tres instrumentos de regulación ambiental (impuestos, permisos comerciables y estándares de emisión) en la adopción de una nueva tecnología de abatimiento para un oligopolio de Cournot.

Resultados: al igual que en competencia perfecta, si las curvas de costo de abatimiento marginal de dos tecnologías (una más deseable que la otra) se cruzan y las firmas tienen costos de adopción diferentes, es posible que los impuestos altos, pocos permisos comerciables y un estándar de emisión pequeño (políticas estrictas) desincentiven la adopción de tecnologías nuevas.

Conclusiones: al elegir un instrumento regulatorio es importante considerar la estructura de las tecnologías de abatimiento disponibles. De no hacerlo, en lugar de fomentar el uso de tecnologías más limpias, el regulador puede hacer lo contrario si las políticas son muy estrictas.

Palabras clave: regulación ambiental; costo de abatimiento; impuestos; permisos comerciables; estándares de emisión; oligopolio de Cournot; curvas MAC. *Clasificación JEL:* D43, H23, L13, Q55, Q58.

INTRODUCCIÓN

Disminuir la contaminación ambiental es un objetivo cada vez más relevante en el mundo. Para cumplirlo se han tomado diversas medidas, como firmar acuerdos internacionales; por ejemplo, el Acuerdo de París, cuyo objetivo es limitar el calentamiento global a 2 °C para finales de este siglo y a 1.5 °C más adelante.¹ Más de 190 países han firmado este acuerdo y se han comprometido a tomar diversas acciones para cumplir con el objetivo. En particular, México se propuso disminuir en 22% sus emisiones de gases de efecto invernadero y en 51% las de carbono negro.² Asimismo,

¹ “Sustainable Development Goals”, Organización de Naciones Unidas. Disponible en: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/climatechange/> [Consultado el 9 de septiembre de 2017].

² “México ratifica el Acuerdo de París sobre el cambio climático”, Instituto Mexicano para la Com-

se comprometió a generar 35% de su energía de manera limpia para 2024 y 43% en 2030.

Para cumplir con estos objetivos de reducción de contaminantes, los gobiernos o agencias de regulación ambiental en los diferentes países se apoyan en distintas políticas públicas. En este artículo nos enfocamos en la regulación ambiental de los procesos productivos; en particular, consideramos un oligopolio con un proceso de producción contaminante. Para incentivar a las empresas a disminuir su nivel de emisiones contaminantes, los reguladores se valen de diversos instrumentos: impuestos, permisos comerciables, estándares de emisión, estándares relativos, etc. Los dos primeros se conocen como instrumentos basados en el mercado; los últimos, como instrumentos de comando y control.

Debido a la gran cantidad de políticas reguladoras disponibles, existe una extensa literatura que las evalúa con distintos criterios. Una lista parcial de dichos criterios incluye: efectividad en costo (es decir, qué instrumento combate la contaminación a un menor costo); factibilidad política e institucional; efectos en la distribución del ingreso; facilidad de monitoreo, ejecución y administración; impuestos previos; efectos en el bienestar social; incentivos para el desarrollo, y adopción de tecnologías nuevas y más limpias.³ En este estudio analizamos el efecto de tres instrumentos de regulación: impuestos, permisos comerciables y estándares de emisión en la adopción de una nueva tecnología de abatimiento, que puede ser más limpia, o costo-efectiva, bajo competencia imperfecta. Una vasta cantidad de autores ha destacado la importancia de estudiar estos incentivos; por ejemplo: Baumol y Oates (1988), Jaffe *et al.* (2002), Jung *et al.* (1996), Kneese y Schultze (1975), Löschel (2002), Milliman y Prince (1989), Orr (1976), Montero (2002a y 2002b), Requate (1998) y Requate (2005).

Por su parte, Requate y Unold (2001 y 2003) muestran que la relación entre la adopción de nueva tecnología y el rigor de las políticas ambientales es monótona y creciente, es decir, que un régimen más estricto propicia una mayor adopción de la nueva tecnología. Este resultado es tan intuiti-

petitividad. Disponible en: http://imco.org.mx/medio_ambiente/mexico-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-cambio-climatico/ [Consultado el 9 de septiembre de 2017].

³ Downing y White (1986), Fisher *et al.* (2003), Goulder *et al.* (1999), Hahn (1986), Hahn y Stavins (1992), Requate (2005) y Weitzman (1974) son algunos de los autores que discuten éstas y otras formas de evaluar los diversos instrumentos regulatorios. En particular, Fisher *et al.* (2003) y Goulder *et al.* (1999) se concentran en la efectividad en costo de los regímenes. Amir *et al.* (2017) y Gama (2017) estudian el desempeño de algunos instrumentos en relación con el bienestar social.

vo, que varios estudios empíricos asumen dicha relación, como Carrión-Flores e Innes (2010), Jaffe y Palmer (1997), Newell *et al.* (1999) y Popp (2002).

Sin embargo, Perino y Requate (2012) muestran que ésta no es la norma, sino sólo el resultado de las características de la industria considerada. Bajo competencia perfecta, Perino y Requate (2012) encuentran que la proporción de firmas que adoptan la nueva tecnología puede, fácilmente, tener forma de U invertida respecto al impuesto. Es decir, para valores altos del impuesto (una política más estricta) hay una proporción cada vez menor de empresas que adoptan la nueva tecnología. Lo mismo sucede con los permisos comerciables y los estándares de emisión.

El poco intuitivo resultado de Perino y Requate (2012) se debe a que, además de que las firmas poseen un costo de inversión o adopción diferente, consideran el caso en que las curvas de costo de abatimiento marginal —de aquí en adelante curvas MAC, por sus siglas en inglés— de las dos tecnologías (la inicial y la nueva) se cruzan. Amir *et al.* (2008) y Bauman *et al.* (2008) muestran que esto sucede cuando la innovación tecnológica involucra la sustitución de un insumo por otro más limpio, en el sentido de que genera menores emisiones; por ejemplo, cuando se sustituyen los combustibles por otros menos contaminantes. Baker *et al.* (2008) proveen ejemplos de innovaciones que producen rotaciones de las curvas MAC, en vez de únicamente desplazamientos.⁴

Al igual que Perino y Requate (2012), Bréchet y Meunier (2014) consideran un continuo de firmas y llegan a resultados similares, pero motivados por otra razón: la endogeneidad del precio del producto final (en el primer caso, los autores consideran que las empresas son tomadoras de precios).

Este artículo introduce una nueva estructura de mercado, diferente a las consideradas por Perino y Requate (2012) y Bréchet y Meunier (2014), y muestra que sus resultados se mantienen. Específicamente, consideramos una industria conformada por n empresas que compiten *à la Cournot* y mantenemos los demás supuestos de Perino y Requate (2012) (costos de adopción diferentes y curvas MAC que se cruzan en un solo punto).

Este cambio en la estructura del mercado modifica el análisis, pues ahora tenemos una restricción de números enteros. En otras palabras, ya no podemos estudiar la entrada de firmas como una proporción de la masa de todas

⁴ Asumir desplazamientos de las curvas MAC es más común en la literatura; éste es el supuesto que dio pie a los resultados más intuitivos de Requate y Unold (2001 y 2003) antes descritos.

ellas, sino que debemos especificar, una por una, quién decide cambiar de tecnología.

En la siguiente sección detallamos las características de la industria bajo estudio e introducimos nuestros resultados.

I. EL MODELO Y LOS RESULTADOS

Consideremos una industria con n firmas que producen un bien homogéneo y enfrentan la función de demanda $P(Q)$, donde Q es la producción total de la industria y $P'(Q) < 0$. En su proceso de producción, las firmas generan emisiones contaminantes, por lo que están sujetas a regulación ambiental. En este artículo vislumbramos tres instrumentos regulatorios de los dos grupos más importantes considerados en la literatura: el impuesto y los permisos comerciables, instrumentos regulatorios basados en el mercado, y el estándar de emisión, una política conocida como de comando y control. El primero consiste en un monto unitario que la firma debe pagar por cada emisión contaminante que genere. Bajo el segundo esquema, el regulador otorga un monto fijo de permisos que distribuye entre las empresas, y ellas pueden intercambiarlos a precio de mercado. El estándar de emisión es un techo a las emisiones establecido por el regulador; las firmas no pueden contaminar más allá de este límite.

Para cumplir con cualquiera de las regulaciones ambientales y reducir su contaminación, las firmas cuentan con una tecnología de abatimiento inicial que llamaremos tecnología 0 o tecnología convencional, con la que pueden regular sus emisiones contaminantes. Específicamente, la firma i , $i = 1, \dots, n$, puede decidir emitir únicamente e emisiones a un costo de $C_0(e)$.

Las firmas tienen la posibilidad de invertir en una nueva tecnología de abatimiento, que llamaremos tecnología 1, pero la inversión inicial no es la misma para todas. En particular, la firma i invierte un costo fijo F_i , $i = 1, \dots, n$, para adquirir la nueva tecnología 1; sin pérdida de generalidad, ordenamos las firmas por su costo de entrada, es decir, asumimos que $0 < F_1 < F_2 < \dots < F_n$. Más adelante discutiremos que la tecnología 1 es más limpia y costo-efectiva, por lo que es más deseable para la autoridad ambiental.

Adicionalmente, al igual que Perino y Requate (2001), suponemos que $C_j(e) > 0$, $C_j'(e) < 0$ y $C_j''(e) > 0$ para todo $e < \hat{e}_j$ y $j = 0, 1$, donde \hat{e}_j representa el valor máximo de emisiones por el que las firmas deben pagar para emitir. De ahí en adelante, las firmas pueden emitir cualquier número de

emisiones a costo cero, es decir, $C_j(e) = 0$ para todo $e \geq \hat{e}_j$, $j = 0, 1$.⁵ Finalmente, asumimos que el costo de producción es cero, para concentrarnos únicamente en los efectos de las tecnologías de abatimiento.

Entonces, por nuestros supuestos anteriores, las tecnologías de abatimiento 0 y 1 son decrecientes y convexas en el número de emisiones. Entre más emisiones genere la empresa, menos costoso será, y este costo evoluciona a tasa decreciente. Una característica que distingue a nuestras dos tecnologías es que $\hat{e}_1 \leq \hat{e}_0$, es decir que en ausencia de regulación ambiental las firmas contaminarían más con la tecnología 0, pues de otro modo sería costoso para ellas. Por esta razón, la tecnología 1 es considerada más limpia (y preferida por el regulador).

Otra característica fundamental, a la cual debemos nuestros resultados principales, es que las curvas MAC se cruzan. Tal como Amir *et al.* (2008), Bauman *et al.* (2008) y Baker *et al.* (2008) han demostrado, no siempre una curva MAC está por encima de la otra (como frecuentemente se asume) y es posible que se crucen, por ejemplo, cuando la nueva tecnología sustituye un insumo por otro menos contaminante. Éste es un supuesto fundamental en nuestro estudio y se establece a continuación.

Supuesto 1. Existe un nivel de emisión e^c , tal que:

- a) $C'_1(e^c) = C'_0(e^c)$,
- b) $C'_1(e) > C'_0(e)$ para todo e con $e^c < e < \hat{e}_0$, y
- c) $C'_1(e) < C'_0(e)$ para todo e con $e < e^c$.

Recuérdese que las curvas MAC, bajo las tecnologías 0 y 1, son negativas y estrictamente crecientes (pues, de manera respectiva, los costos de abatimiento son decrecientes y estrictamente convexas). El supuesto 1 establece que las curvas MAC se cruzan únicamente en el punto e^c . Si el nivel de emisiones es menor, entonces la curva MAC de la tecnología 1 pasa por debajo de la correspondiente a la tecnología convencional. De lo contrario, la curva MAC de la tecnología 0 pasa por debajo de la curva MAC de la tecnología 1.

De nuestro supuesto principal, el supuesto 1, obtenemos el siguiente lema, que se debe a Perino y Requate (2012), por lo que omitimos su demostración. Aunque ellos estudian un mercado bajo competencia perfecta,

⁵ Como el lector puede inferir, se ha asumido diferenciable y continuidad en las funciones de costo y de demanda. Esto ocurre por conveniencia.

su descripción de las tecnologías disponibles coincide con la de este estudio, por lo que el siguiente lema es equivalente para ambos análisis.

Lema 1

- i) La ventaja de costos de la tecnología 1 sobre la tecnología 0 es máxima y estrictamente positiva en e^c .
- ii) Existe un nivel de emisión $e^b < e^c$, tal que $C_1(e) < C_0(e)$ para todo $e > e^b$.
- iii) Si $C'_0(e_0) = C'_1(e_1)$, entonces,
 - a) $e_0 = e_1 = e^c$ para $C'_j(e_j) = C'_j(e^c)$, $j = 0, 1$.
 - b) $e_0 > e_1$ para $C'_j(e_j) > C'_j(e^c)$, $j = 0, 1$.
 - c) $e_0 < e_1$ para $C'_j(e_j) < C'_j(e^c)$, $j = 0, 1$.

El lema 1 será crucial para nuestros resultados. Como podemos observar de las partes *i* y *ii*, la tecnología 1 permite abatir emisiones a un menor costo a partir del nivel de emisiones $e^b < e^c$, y alcanza su mayor ventaja en e^c . Esto se debe a que $\hat{e}_1 \leq \hat{e}_0$.

A continuación comenzamos con el análisis de los efectos de un impuesto unitario sobre el número de firmas que adopta la nueva tecnología.

1. Impuestos

Supongamos que las firmas están sujetas al pago de un impuesto t por cada unidad de emisión contaminante que generen, independientemente de que adopten la nueva tecnología o no. Este régimen se clasifica en la literatura como un instrumento basado en el mercado, debido a que, dado el instrumento, las firmas deciden su producción y cantidad de emisiones que maximizan su beneficio. No es un mecanismo de control directo, como el estándar de emisión, que estudiaremos más adelante.

Entonces, si la firma i decide quedarse con la tecnología 0, su problema de optimización está dado por:

$$\text{Max}_{q_i, e_i} q_i P(q_i + q_{-i}) - C_0(e_i) - te_i \quad (1)$$

donde la variable q_i corresponde a la cantidad producida por la firma i , y q_{-i} es la producción de todas las firmas diferentes a la firma i , es decir, $Q = q_i + q_{-i}$ (recuérdese que Q es la cantidad total producida por la industria). Fi-

nalmente, e_i corresponde al total de emisiones generadas por la firma i . Las condiciones de primer orden (CPO) correspondientes al problema (1) son

$$q_i P'(q_i + q_{-i}) + P(q_i + q_{-i}) = 0 \quad (2)$$

y

$$-C_0'(e_i) - t = 0 \quad (3)$$

Por otro lado, si la firma i adopta la nueva tecnología, su problema de maximización será aquel dado por la ecuación (4), con CPO (5) y (6).

$$\text{Max}_{q_i, e_i} q_i P(q_i + q_{-i}) - C_1(e_i) - te_i - F_i \quad (4)$$

$$q_i P'(q_i + q_{-i}) + P(q_i + q_{-i}) = 0 \quad (5)$$

$$-C_1'(e_i) - t = 0 \quad (6)$$

De las CPO (2) y (5) concluimos que, sin importar que la firma utilice la tecnología 0 o 1, producirá lo mismo, ya que el costo de abatimiento no juega ningún papel en dichas ecuaciones. Nos referiremos al nivel de producción individual de equilibrio como q^* ; esto es, cada firma producirá q^* al resolver su problema de optimización.

En cambio, el nivel de emisiones generadas sí diferirá de acuerdo con la tecnología, como podemos ver de las ecuaciones (3) y (6). Si las firmas no adoptan la nueva tecnología, denotaremos las emisiones de equilibrio de cada firma como e_0 . Obsérvese que todas aquellas firmas con tecnología 0 generarán el mismo número de emisiones. Similarmente, si las firmas adoptan la tecnología 1, entonces cada una de ellas generará e_1 emisiones. Así pues, en equilibrio, $t = -C_0'(e_0) = -C_1'(e_1)$, por lo que nos encontramos en la situación descrita por el lema 1-iii, y cualquier relación entre las magnitudes de e_0 y e_1 es posible.

Supongamos que el regulador ha fijado el valor del impuesto t de manera exógena al modelo. Si m firmas deciden adoptar la nueva tecnología, es porque la firma m está al menos tan bien con la tecnología 1 que si se quedara con la tecnología 0. Asimismo, la firma $m + 1$ está mejor si se queda con la tecnología inicial, es decir,

$$q^* P(nq^*) - C_0(e_0) - te_0 \leq q^* P(nq^*) - C_1(e_1) - te_1 - F_m$$

y

$$q^*P(nq^*) - C_0(e_0) - te_0 > q^*P(nq^*) - C_1(e_1) - te_1 - F_{m+1}$$

equivalentemente,

$$C_1(e_1) - C_0(e_0) + t(e_1 - e_0) + F_m \leq 0 \quad (7)$$

y

$$C_1(e_1) - C_0(e_0) + t(e_1 - e_0) + F_{m+1} > 0 \quad (8)$$

Dado un valor de referencia del impuesto t , podemos analizar qué pasa cuando nos alejamos de tal valor, ya sea que lo disminuyamos o lo aumentemos. Definamos a ese valor de referencia como $\tau = -C'_0(e^c) = -C'_1(e^c)$, entonces obtenemos el siguiente resultado.

Proposición 1. Supongamos que cuando $t = \tau$, m firmas adoptan la tecnología 1.

- a) Si $t < \tau$ y $t < (C_0(e_0) - C_1(e_1) - F_m)/(e_1 - e_0)$, entonces menos de m firmas adoptan la tecnología 1.
- b) Si $t > \tau$ y $t > (C_0(e_0) - C_1(e_1) - F_m)/(e_1 - e_0)$, entonces menos de m firmas adoptan la tecnología 1.

Demostración. Recuérdese que, en equilibrio, $t = -C'_j(e_j)$, $j = 0, 1$; entonces, si $t = \tau$, tenemos que $e_0 = e_1 = e^c$, por el lema 1iii-a. Como suponemos que m firmas adoptan la tecnología 1, las ecuaciones (7) y (8) se satisfacen. Obsérvese que por el lema 1 partes i y iii-a, $C_0(e_0) = C_0(e^c) > C_1(e^c) = C_1(e_1)$, por lo que las ecuaciones (7) y (8) son viables — en particular, es necesario que $C_1(e_1) - C_0(e_0) < 0$ —.

- a) Si $t < \tau$, entonces, por el lema 1iii-b, $e_0 > e_1$. Si, además, $t < (C_0(e_0) - C_1(e_1) - F_m)/(e_1 - e_0)$, la ecuación (7) nos dice que la m -ésima firma está mejor con la tecnología 0, por lo que menos firmas adoptarán la nueva tecnología.
- b) Esta demostración es análoga a la parte b), pero usando el lema 1iii-c.

La proposición 1b nos proporciona uno de los resultados más importantes de este estudio, pues es inesperado. Específicamente, nos da una región de un impuesto suficientemente grande para desincentivar la adopción de nueva tecnología. Contrario a lo que el regulador pudiera pensar, una regulación más estricta, reflejada con un impuesto mayor (en términos re-

lativos), no fomenta la adopción de la tecnología 1. Entonces, el regulador debe ser cuidadoso y considerar la estructura de las nuevas tecnologías al momento de establecer la magnitud de la regulación; de otro modo se podría obtener un resultado indeseado y más firmas se quedarían con la tecnología convencional.

Por otro lado, la proposición 1a es más intuitiva: una política más laxa —en el sentido de que el impuesto no es tan grande en términos relativos— ocasiona que más firmas se queden con la tecnología inicial. Estas empresas obtienen un beneficio mayor si pagan el impuesto ambiental —que no es tan alto— que si invirtieran en una nueva tecnología, ya que el impuesto se mantiene constante.

La proposición 1 establece regiones para las que el impuesto ambiental desincentiva la adopción de tecnología, en relación con nuestra referencia cuando el impuesto es τ . Ahora identificaremos los intervalos en los que el efecto es el opuesto, es decir, en que el impuesto incentiva la adopción de la tecnología 1. Como las demostraciones de las proposiciones 1 y 2 son similares, omitimos la segunda, pero es importante notar que estos nuevos resultados se derivan de la ecuación (8). La intuición es que en estas regiones, la firma $m + 1$ incrementa su beneficio con la tecnología 1; por lo tanto, decide adoptarla.

Proposición 2. Supongamos que cuando $t = \tau$, m firmas que adoptan la tecnología 1.

- a) Si $(C_0(e_0) - C_1(e_1) - F_{m+1}) / (e_1 - e_0) < t < \tau$, entonces más de m firmas adoptan la tecnología 1.
- b) Si $\tau < t < (C_0(e_0) - C_1(e_1) - F_{m+1}) / (e_1 - e_0)$, entonces más de m firmas adoptan la tecnología 1.

Por la proposición 2 vemos que existe una región del impuesto t en la que más firmas deciden adoptar la nueva tecnología. Dependiendo de los valores numéricos de τ y $(C_0(e_0) - C_1(e_1) - F_{m+1}) / (e_1 - e_0)$, estaremos en el caso de la proposición 2a o 2b; dichos valores dependen de las primitivas del modelo. Obsérvese que si $\tau = (C_0(e_0) - C_1(e_1) - F_{m+1}) / (e_1 - e_0)$, sería imposible elegir el impuesto t como en alguna de las partes de la proposición 2 y, a lo más, podríamos tener m firmas que renuevan su tecnología.

La dificultad de comparar las magnitudes de τ y $(C_0(e_0) - C_1(e_1) - F_{m+1}) / (e_1 - e_0)$ radica en que nuestros supuestos caracterizan los costos marginales de abatimiento y no los costos en general. Sin embargo, hemos mostrado

que políticas estrictas, como la imposición de altas tasas tributarias, pueden ser contraproducentes como incentivo para la adopción de innovación tecnológica, bajo competencia imperfecta.

Ahora analizaremos los permisos comerciables, otro instrumento de regulación ambiental basado en el mercado.

2. Permisos comerciables

En este esquema, las empresas reciben permisos para contaminar un total de E emisiones. En particular, la firma i recibe E_i permisos, $i = 1, 2, \dots, n$, de modo que $E = E_1 + E_2 + \dots + E_n$; estos permisos pueden ser comercializados a precio ρ . Entonces, si la empresa i opera con la tecnología convencional, resuelve:

$$\text{Max}_{q_i, e_i} q_i P(q_i + q_{-i}) - C_0(e_i) - \rho(e_i - E_i) \quad (9)$$

con CPO

$$q_i P'(q_i + q_{-i}) + P(q_i + q_{-i}) = 0 \quad (10)$$

y

$$-C'_0(e_i) - \rho = 0 \quad (11)$$

En cambio, si la empresa i adopta la tecnología 1, resuelve:

$$\text{Max}_{q_i, e_i} q_i P(q_i + q_{-i}) - C_1(e_i) - \rho(e_i - E_i) - F_i \quad (12)$$

con CPO

$$q_i P'(q_i + q_{-i}) + P(q_i + q_{-i}) = 0 \quad (13)$$

$$-C'_1(e_i) - \rho = 0 \quad (14)$$

Nuevamente ambos tipos de firmas producen lo mismo [por CPO (10) y (13)], q^* , y además en equilibrio se satisface que $\rho = -C'_0(e_0) = -C'_1(e_1)$. Asimismo, si m firmas adoptan la nueva tecnología, $0 \leq m \leq n$, tenemos que $E = (n - m) e_0 + m e_1$. Siguiendo la misma lógica que en la sección anterior, tenemos que

$$C_1(e_1) - C_0(e_0) + \rho(e_1 - e_0) + F_m \leq 0 \quad (15)$$

y

$$C_1(e_1) - C_0(e_0) + \rho(e_1 - e_0) + F_{m+1} > 0 \quad (16)$$

Además,

$$E = (n - m)e_0 + me_1 \quad (17)$$

Fijemos $E = \hat{E} = e^c$, de modo que tenemos el siguiente resultado:

Proposición 3. Supongamos que cuando $E = \hat{E}$, m firmas adoptan la tecnología 1. Si $E < \hat{E}$, m o menos firmas adoptan la tecnología 1.

Demostración. Si $E < \hat{E} = e^c$, por la ecuación (17), tenemos que necesariamente $e_0 < e_c$ y $e_1 < e^c$. Como las tecnologías son convexas, $C_j''(e) > 0$, $j = 0, 1$, tenemos que los costos marginales son estrictamente crecientes; entonces, $C_j'(e_j) < C_j'(e^c)$, $j = 0, 1$. Además, por las CPO (11) y (14), $C_0'(e_0) = C_1'(e_1)$, entonces el lema *iii-c* aplica y tenemos que $e_0 < e_1 < e^c$. De esta forma, es posible revertir la desigualdad (15), lo que implica que menos firmas adoptarían la nueva tecnología.

Obsérvese que la clave del resultado anterior es que $e_0 < e_1$, por lo que es posible revertir la desigualdad (15) sin afectar la expresión (16). Similarmente, si $e_1 < e_0$, sería posible modificar la desigualdad (16), por lo que podría haber más adopción de tecnología 1. Sin embargo, las condiciones que implican tal desigualdad son menos directas y la proposición 3 nos brinda el resultado contraintuitivo, objeto de esta investigación. Si el regulador no es cuidadoso y otorga pocos permisos para contaminar (una política estricta), puede ser que las firmas se desincentiven a adoptar la nueva tecnología. Por ejemplo, si elige $E < \hat{E}$ y menos de m firmas adoptan la nueva tecnología, será mejor relajar la política y aumentar los permisos a \hat{E} .

En la siguiente sección hacemos el mismo análisis para un instrumento de comando y control, y no basado en el mercado, como el impuesto o los permisos comerciados. De este modo tenemos una referencia para ambos tipos de regulación ambiental.

3. Estándar de emisión

Bajo este régimen ambiental, el regulador indica a las firmas exactamente cuántas emisiones contaminantes pueden mandar a la atmósfera. Por eso el estándar de emisión es conocido como un instrumento de comando y control, pues el regulador puede controlar directamente el número de contami-

nantes. En contraste, el impuesto o los permisos comerciables son políticas indirectas que incentivan cierta cantidad de emisiones; por ello se les conoce como instrumentos basados en el mercado.

Supongamos que el regulador ambiental fija e como el estándar de emisión. Esto quiere decir que ahora las firmas únicamente eligen su producción; en particular, cada una de las firmas que decide quedarse con la tecnología 0 resuelve:

$$\text{Max}_{q_i} q_i P(q_i + q_{-i}) - C_0(e) \quad (18)$$

con CPO:

$$q_i P'(q_i + q_{-i}) + P(q_i + q_{-i}) = 0 \quad (19)$$

En cambio, si la firma i adopta la tecnología 1, ésta resuelve:

$$\text{Max}_{q_i} q_i P(q_i + q_{-i}) - C_1(e) - F_i \quad (20)$$

con CPO:

$$q_i P'(q_i + q_{-i}) + P(q_i + q_{-i}) = 0 \quad (21)$$

De las CPO (2), (5), (10), (13), (19) y (21) concluimos que bajo cualquier tecnología y bajo cualquier instrumento regulatorio considerado en este estudio, las firmas producirán la misma cantidad en equilibrio, q^* .

Ahora, si con el estándar de emisión e , m firmas deciden adoptar la tecnología 1, es porque se cumplen las siguientes desigualdades:

$$q^* P(nq^*) - C_0(e) \leq q^* P(nq^*) - C_1(e) - F_m$$

y

$$q^* P(nq^*) - C_0(e) > q^* P(nq^*) - C_1(e) - F_{m+1}$$

que equivalen a

$$C_1(e) - C_0(e) + F_m \leq 0 \quad (22)$$

y

$$C_1(e) - C_0(e) + F_{m+1} > 0 \quad (23)$$

Primero obsérvese que una condición necesaria para que se cumplan las desigualdades (22) y (23) es que $C_1(e) - C_0(e) < 0$; de otro modo, siempre sería mejor para las firmas quedarse con la tecnología 0 y no habría adopción

de nueva tecnología. Similarmente, si $C_1(e) - C_0(e) + F_n \leq 0$, todas las firmas invertirán en la tecnología 1. Estos dos resultados se resumen en el lema 2, que será de utilidad para nuestra siguiente proposición.

Lema 2.

- a) Si $C_1(e) \geq C_0(e)$, entonces ninguna firma adopta la tecnología 1.
- b) Si $C_1(e) - C_0(e) + F_n \leq 0$, entonces todas las firmas adoptan la tecnología 1.

A continuación demostramos que cuando el estándar de emisión equivale a e^c , tenemos el mayor número de firmas que adoptan la nueva tecnología.

Proposición 4. Supongamos que cuando $e = e^c$, m firmas adoptan la tecnología 1.

- a) Si $e > e^c$, m o menos firmas adoptan la tecnología 1.
- b) Si $e < e^c$, m o menos firmas adoptan la tecnología 1.

Demostración. Primero obsérvese que, como m firmas adoptan la tecnología 1 bajo $e = e^c$, tenemos que:

$$C_1(e^c) - C_0(e^c) \leq -F_m \quad (24)$$

y

$$C_1(e^c) - C_0(e^c) > -F_{m+1} \quad (25)$$

es decir, se satisfacen las ecuaciones (22) y (23). Además, por el lema 1*i*, tenemos que $C_1(e^c) - C_0(e^c) < 0$, por lo que nuestra afirmación es viable. Ahora seguimos con los incisos de la proposición.

- a) Si $e > e^c$, entonces, por nuestro supuesto 1, $C'_1(e) - C'_0(e) > 0$, por lo que a mayor e , es posible revertir la desigualdad (24), lo que indicaría una menor adopción de la tecnología 1.
- b) Similarmente, si $e < e^c$, entonces $C'_1(e) - C'_0(e) < 0$, lo que indica que un menor estándar e puede revertir la desigualdad (24), lo que indicaría una menor adopción de la tecnología 1.

En este caso, una política más laxa que permite más emisiones (mayores niveles de e), desincentiva a las firmas a adoptar tecnología limpia. Lo mismo sucede si la política es más estricta (menores niveles de e). La proposición 4 ofrece resultados similares a los anteriores; al igual que con los instrumentos basados en el mercado, el rigor de los estándares de emisión no necesariamente ofrece incentivos alineados con la adopción de nuevas tecnologías. Es decir, al igual que en competencia perfecta, instrumentos de regulación más estrictos no garantizan una mayor adopción de tecnologías deseables en un oligopolio de Cournot.

CONCLUSIONES

Este artículo analiza los efectos de tres instrumentos de regulación ambiental en la adopción de nueva tecnología (más deseable) bajo competencia imperfecta. Encontramos que una política más estricta no necesariamente estimula la adopción de nueva tecnología, contrario a lo que es natural creer. En particular, al elegir instrumentos basados en el mercado (impuestos y permisos comerciables) o de comando y control (estándares de emisión), el regulador debe poner atención a no ser tan estricto, para no obtener resultados no deseados, como la poca adopción de una mejor tecnología.

Nuestros resultados proceden de dos supuestos principales: que las curvas MAC se cruzan y que el costo de adopción es diferente para cada firma. Los supuestos de este estudio son análogos a los de Perino y Requate (2012), con la diferencia de que ellos consideran competencia perfecta, es decir que las firmas son tomadoras de precios y hay una infinidad de ellas (un continuo de firmas). Nosotros hemos introducido competencia imperfecta, en particular un oligopolio de Cournot, y encontramos resultados similares a los de Perino y Requate (2012). Sin embargo, la estructura del análisis es diferente, pues en este estudio nos enfrentamos a la restricción de que el número de firmas que adoptan la nueva tecnología es entero. En competencia perfecta, se considera el porcentaje de firmas que cambian de tecnología y el análisis se simplifica.

Este estudio implica una relevante recomendación en términos de política pública, pues es importante considerar la estructura de las dos tecnologías, la convencional y la nueva, antes de fijar el régimen regulatorio y su nivel, si lo que se busca es fomentar la inversión en tecnologías más limpias en oligopolios de Cournot. De lo contrario, se pueden obtener resultados contraproducentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amir, R., A. Gama y K. Werner (2017), "On Environmental Regulation of Oligopoly Markets: Emission versus Performance Standards", *Environmental and Resource Economics*, 1-21.
- , M. Germain y V. Van Steenberghe (2008), "On the Impact of Innovation on the Marginal Abatement Cost Curve", *Journal of Public Economic Theory*, 10 (6), 985-1010.
- Baker, E., L. Clarke y E. Shittu (2008), "Technical Change and the Marginal Cost of Abatement", *Energy Economics*, 30 (6), 2799-2816.
- Bauman, Y., M. Lee y K. Seeley (2008), "Does Technological Innovation Really Reduce Marginal Abatement Costs? Some Theory, Algebraic Evidence, and Policy Implications", *Environmental and Resource Economics*, 40 (4), 507-527.
- Baumol, W. J., y W. E. Oates (1988), *The Theory of Environmental Policy*, 2ª ed., Cambridge University Press, Nueva York.
- Bréchet, T., y G. Meunier (2014), "Are Clean Technology and Environmental Quality Conflicting Policy Goals?", *Resource and Energy Economics*, 38, 61-83.
- Carrión-Flores, C. E., y R. Innes (2010), "Environmental Innovation and Environmental Performance", *Journal of Environmental Economics and Management*, 59 (1), 27-42.
- Downing, P. B., y L. J. White (1986), "Innovation in Pollution Control", *Journal of Environmental Economics and Management*, 13 (1), 18-29.
- Fischer, C., I. W. Parry y W. A. Pizer (2003), "Instrument Choice for Environmental Protection when Technological Innovation Is Endogenous", *Journal of Environmental Economics and Management*, 45 (3), 523-545.
- Gama, A. (2017), "Standards, Taxes and Social Welfare", documento de trabajo, Centro de Estudios Económicos, El Colegio de México.
- Goulder, L. H., I. W. Parry, R. C. Williams III y D. Burtraw (1999), "The Cost-Effectiveness of Alternative Instruments for Environmental Protection in a Second-Best Setting", *Journal of Public Economics*, 72 (3), 329-360.
- Hahn, R. W. (1986), "Trade-Offs in Designing Markets with Multiple Objectives", *Journal of Environmental Economics and Management*, 13 (1), 1-12.
- , y R. N. Stavins (1992), "Economic Incentives for Environmental Protection: Integrating Theory and Practice", *The American Economic Review*, Papers and Proceedings of the Hundred and Fourth Annual Meeting of the American Economic Association, 82 (2), 464-468.
- Jaffe, A. B., y K. Palmer (1997), "Environmental Regulation and Innovation: A Panel Data Study", *The Review of Economics and Statistics*, 79 (4), 610-619.
- , R. G. Newell y R. N. Stavins (2002), "Environmental Policy and Technological Change", *Environmental and Resource Economics*, 22 (1), 41-70.

- Jung, C., K. Krutilla y R. Boyd (1996), "Incentives for Advanced Pollution Abatement Technology at the Industry Level: An Evaluation of Policy Alternatives", *Journal of Environmental Economics and Management*, 30 (1), 95-111.
- Kneese, A. V., y C. L. Schultze (1975), *Pollution, Prices, and Public Policy*, The Brookings Institution, Washington, D. C.
- Löschel, A. (2002), "Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: A Survey", *Ecological Economics*, 43 (2), 105-126.
- Milliman, S. R., y R. Prince (1989), "Firm Incentives to Promote Technological Change in Pollution Control", *Journal of Environmental Economics and Management*, 17 (3), 247-265.
- Montero, J. P. (2002a), "Market Structure and Environmental Innovation", *Journal of Applied Economics*, 2, 293-325.
- (2002b), "Permits, Standards, and Technology Innovation", *Journal of Environmental Economics and Management*, 44 (1), 23-44.
- Newell, R. G., A. B. Jaffe y R. N. Stavins (1999), "The Induced Innovation Hypothesis and Energy-Saving Technological Change", *The Quarterly Journal of Economics*, 114 (3), 941-975.
- Orr, L. (1976), "Incentive for Innovation as the Basis for Effluent Charge Strategy", *The American Economic Review*, 66 (2), 441-447.
- Perino, G., y T. Requate (2012), "Does More Stringent Environmental Regulation Induce or Reduce Technology Adoption? When the Rate of Technology Adoption is Inverted U-Shaped", *Journal of Environmental Economics and Management*, 64 (3), 456-467.
- Popp, D. (2002), "Induced Innovation and Energy Prices", *The American Economic Review*, 92 (1), 160-180.
- Requate, T. (1998), "Incentives to Innovate under Emission Taxes and Tradeable Permits", *European Journal of Political Economy*, 14 (1), 139-165.
- (2005), "Dynamic Incentives by Environmental Policy Instruments—A Survey", *Ecological Economics*, 54 (2), 175-195.
- Requate, T., y W. Unold (2001), "On the Incentives Created by Policy Instruments to Adopt Advanced Abatement Technology if Firms Are Asymmetric", *Journal of Institutional and Theoretical Economics*, 157 (4), 536-554.
- (2003), "Environmental Policy Incentives to Adopt Advanced Abatement Technology: Will the True Ranking Please Stand Up?", *European Economic Review*, 47 (1), 125-146.
- Weitzman, M. L. (1974), "Prices vs. Quantities", *The Review of Economic Studies*, 41 (4), 477-491.