LA PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL Y LAS EMISIONES DE CO_2. APLICACIÓN DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL

Ana Gessa Perera, gessa@uhu.es, Universidad de Huelva
Inmaculada Rabadán Martín, rabadan@uhu.es, Universidad de Huelva
José A. Jurado Martín, jose.jurado@decd.uhu.es, Universidad de Huelva

RESUMEN

Las limitaciones de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) establecidas en el Protocolo de Kioto, han obligado a las empresas afectadas a incluir esta restricción medioambiental a la hora de determinar la planificación de la producción. Uno de los instrumentos previstos en el Protocolo es el mercado de derechos de emisión, que ofrece a las empresas la posibilidad de aumentar las emisiones de CO_2 asignadas por el Plan Nacional de Asignación, mediante la compra de permisos de emisión y por otro lado, ofrece a las empresas con superávit de derechos una nueva fuente de beneficios a través de la venta de los mismos. En este trabajo pretendemos analizar cómo afecta al programa de producción esta nueva situación mediante la aplicación de un modelo de programación lineal, añadiendo la restricción relativa a las emisiones de CO_2 al resto de las limitaciones productivas de la empresa.

Palabras clave: Protocolo de Kioto, Mercado de emisiones, Plan de Producción, Programación lineal.

ABSTRACT

The limitations of carbon dioxide (CO_2) established by the Kyoto Protocol, have forced the companies to include these environmental restrictions to determine the production planning. One of the instruments provided by the Protocol is the emissions trading market, which offers companies the possibility of increasing CO_2 emissions assigned by the national allocation plan. This market is used for the purchase and sales of allowances and offers companies a new source of revenue by the sales of their emissions trading that they don't use. This paper's aim is to analyse how the production planning is affected by this new situation by applying a linear programming model, adding restrictions on emissions of CO_2 to others limitations of the production company.

Keywords: Kyoto Protocol, Emissions Trading Market, Production Planning, Linear Programming.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas los científicos han venido observando un acelerado aumento de la temperatura global de la Tierra a consecuencia de la excesiva concentración de determinados gases en la atmósfera. Este hecho pronto suscitó la preocupación de la comunidad internacional que, tras varias reuniones y conferencias[1], asumieron con el Protocolo de Kioto su primer compromiso frente al problema del cambio

[1] La primera reunión de alto nivel donde científicos y políticos discutieron sobre las medidas a tomar para combatir el cambio climático fue la Conferencia de Toronto en 1988. En ella, los países industrializados se comprometieron a reducir las emisiones de CO_2 un 20% para 2005. A esta Conferencia le sucedieron varias reuniones, destacando la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima en 1990 en Ginebra, la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro en 1992 y La Cumbre de Berlín en 1995.

climático, esto es, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero[2] (GEI) en un 5% respecto al nivel de 1990, en el periodo 2008/12.

Al margen de la problemática planteada sobre la ratificación del Protocolo de Kioto[3], la Comunidad Europea se ha consolidado como su gran impulsora (liderada principalmente por Reino Unido), comenzando a avanzar hacia el cumplimiento de sus objetivos.

Con este propósito la Unión Europea aprobó la Directiva 2003/87/CE, sobre comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, que junto a los instrumentos de desarrollo limpio (MDL)[4] y de aplicación conjunta (MAC)[5] constituyen los denominados mecanismos de flexibilidad recogidos en el Protocolo de Kioto con el fin de amortiguar el inevitable impacto económico que va a suponer el cumplimiento de sus obligaciones. Está fundamentada en varios principios coherentes con los establecidos por el Protocolo de Kioto:

- Es un instrumento complementario al resto de las políticas y medidas a llevar a cabo por la Unión Europea en su lucha contra el cambio climático.
- Es un instrumento ambiental que permitirá disminuir los costes de reducción de emisiones: ofrece a las empresas la opción de invertir en tecnologías de reducción de emisiones o, en su caso, de comprar derechos de emisión de CO_2.
- Surge con la condición de garantizar el funcionamiento del mercado interior y evitar la distorsión de la competencia.

Esta Directiva adelanta la fecha de inicio fijada en el Protocolo, estableciendo un periodo (2005-07) que sirva de prueba o de preparación a los Estados miembros de cara a cumplir con los objetivos asumidos en Kioto.

El comercio de emisiones, regulado en el artículo 17 del Protocolo de Kioto, permite a las partes intercambiar los derechos de emisión asignados para alcanzar sus respectivos compromisos. Se trata, por consiguiente, de un mercado donde podrá negociarse las distintas unidades reconocidas por el Protocolo, tanto los derechos de emisión (unidad de cuenta del régimen comunitario) como los créditos procedentes de los mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) y de Aplicación Conjunta (MAC) (las Reducciones Certificadas de Emisiones[6] y las Unidades de Reducción de Emisiones[7] respectivamente). En este último caso, los titulares de las instalaciones podrán utilizar directamente en el mercado comunitario los créditos de dichos mecanismos, y será

---

[2] Los gases de efecto invernadero considerados son los de efecto directo, los que provocan este fenómeno por sí mismos debido a su carácter termoactivo. Concretamente son seis: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), carbonos hidrofluorados (HFC), carburos perfluorados (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6).

[3] Para que el acuerdo entrara en vigor en la fecha prevista (16 de febrero de 2005), eran necesarios dos requisitos: su refrendo por 55 naciones y que entre todas sumaran el 55% de las emisiones de GEI de 1990. Hecho que no se produjo hasta octubre de 2004, cuando Rusia lo ratificó. EE.UU. (con un 36,1% de las emisiones de 1990), China y Australia siguen sin firmarlo hasta la fecha.

[4] Conocido también por sus siglas en inglés "Clean Development Mechanism" (CDM): permite la obtención de certificados de reducción de emisiones invirtiendo en proyectos en países sin compromisos de reducción, típicamente en vías de desarrollo, como los latinoamericanos.

[5] Conocido también por sus siglas en inglés "Join Implementation" (JI): posibilita reducir las emisiones invirtiendo en proyectos de países con compromiso de reducción y economías de transición como son los de Europa del Este.

[6] Las Reducciones Certificadas de las Emisiones (RCEs) son unidades expedidas de conformidad con el artículo 12 del Protocolo de Kioto, así como con las disposiciones pertinentes de las modalidades y procedimientos del MDL, que corresponden a una tonelada métrica de CO_2 equivalente.

[7] Las Unidades de Reducción de Emisiones (UREs) son unidades expedidas de conformidad con el artículo 6 del Protocolo de Kioto, así como con las disposiciones pertinentes de las modalidades y procedimientos del MAC, que corresponden a una tonelada métrica de CO_2 equivalente.

el Estado Miembro el responsable de expedir un derecho de emisión a cambio de cada uno de los RCEs y los UREs que el titular tenga en su cuenta del Registro Nacional.

El funcionamiento de dicho comercio se fundamenta en las diferencias entre los derechos de emisión asignados (derecho subjetivo a emitir una tonelada equivalente de dióxido de carbono, durante un periodo determinado[8]) y las emisiones reales de las diferentes organizaciones. Si el número de derechos asignados a una instalación es inferior a sus emisiones reales, será sancionada económicamente, no estando exenta de presentar los derechos necesarios para cubrir sus emisiones. En el caso contrario de superar los derechos asignados a las cuotas emitidas reales, la empresa tiene un excedente de emisiones que podrá vender a otras organizaciones que se encuentren en una situación deficitaria, o guardarlos excepcionalmente para su utilización en los siguientes años de la primera fase de la implantación del mercado de emisiones, que finaliza en 2007[9].

De esta manera, se permite a las instalaciones emitir gases de efecto invernadero por encima de la cuota que le ha sido asignada, siempre que encuentre a otra instalación que esté dispuesta a vender su cuota sobrante. Así, se garantiza el cumplimiento de los objetivos medioambientales, pues el resultado global es el mismo que si ambas empresas consumiesen exactamente sus cuotas asignadas, además de la flexibilidad aportada por el mecanismo que beneficia tanto a la empresa compradora como a la vendedora sin consecuencias medioambientales. Asimismo, los otros mecanismos de flexibilidad (desarrollo limpio y aplicación conjunta) permitirán a las empresas reducir el volumen de CO_2 emitido, si llevan a cabo proyectos de reducción de emisiones en otros países.

Para entrar en funcionamiento este mercado de derechos de emisión es imprescindible que esté operativo el Registro Nacional de Derechos de Emisión[10], una base de datos de actualización permanente y accesible al público a través de internet en la que aparecerá el volumen de derechos de emisión asignado a cada empresa afectada por la Directiva Europea de Comercio de Emisiones y por el Real Decreto Ley 5/2005, así como todas las operaciones que se realicen con ellos, como la expedición, titularidad, transmisión, transferencia, entrega, retirada y cancelación de los mismos.

Los derechos asignados a cada industria quedan recogidos en una cuenta abierta para cada una de ellas en el Registro Nacional. El titular de una cuenta que quiera comprar o vender parte de sus derechos de emisión tiene que dar una instrucción al encargado del Registro, el cual toma nota y lo comunica al Administrador Central de Bruselas, que tiene que dar el visto bueno a la transacción para que ésta quede anotada.

2. EL REPARTO SECTORIAL DE LAS EMISIONES DE CO_2 EN LA INDUSTRIA ESPAÑOLA

La pieza central de este nuevo mercado la constituye los llamados Planes Nacionales de Asignación (PNA) que, según el apartado 2 del artículo 11 de la Directiva 2003/87/CE, cada Estado miembro deberá

[8] Según el artículo 2 del Real Decreto Ley 5/2004, de 27 de agosto, por el que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.

[9] Esta posibilidad de compensar los derechos de emisión entre distintos ejercicios, y el que hasta esa fecha su atribución por las autoridades nacionales sea gratuita, favorece la liquidez del mercado, pero a la vez restringe márgenes y posibilidades de especulación en este mercado.

[10] En España, el Registro Nacional de Derechos de Emisión (RENADE) empieza a operar el 20 de junio de 2005, seis meses después de lo previsto, debido a retrasos en el software aprobado por la Administración para el mismo y en alguna normativa de funcionamiento. Ello ha impedido a la compañía Iberclear, a quien se ha encomendado la gestión del citado Registro, iniciar su labor en la fecha prevista (a principio del año 2005).

elaborar y publicar (una vez aprobado por la Comisión), en los cuales se asignarán los derechos de emisión entre los distintos sectores industriales e instalaciones incluidas en el mercado, de acuerdo con los objetivos de emisión que tiene fijados. A tal fin, cada Estado miembro tiene que decidir previamente cuantos derechos de emisión asignará en total para el periodo correspondiente, y cuantos recibirá cada instalación cubierta por el régimen de comercio de derechos de emisión.

En lo que respecta a España, el Plan de Asignación de Derechos de Emisión, aprobado por Real Decreto 1866/2004, junto con el Real Decreto Ley 5/2004 que regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero[11] y por el que se transpone al ordenamiento jurídico español la Directiva 2003/87/CE sobre este comercio, sienta las bases para la asignación individual de derechos a todas las instalaciones antes de la puesta en marcha de un novedoso mercado europeo, con el fin de contribuir a la reducción de emisiones que causan el cambio climático, cumpliendo así el compromiso asumido por nuestro país con el Protocolo de Kioto.

Inicialmente, este régimen de comercio de derechos de emisión se aplicará a las emisiones de dióxido de carbono procedentes de instalaciones que desarrollan las actividades enmarcadas en la Directiva que son: generación de electricidad, refino, producción y transformación de metales férreos, cemento, cal, vidrio, cerámica, pasta de papel, papel y cartón, todos ellos responsables de un porcentaje estimado entre el 40 y 50% de las emisiones de CO_2 correspondientes al año 2001 en España.

El primer Plan aprobado regula, básicamente, los derechos de emisión de las empresas para el periodo 2005/07, y es de contención, pues establece para dicho tiempo una estabilización de las emisiones globales (sólo bajarán un 0,2% respecto a 2002). El grueso de la reducción de los gases que contempla el Protocolo se recoge en un segundo Plan, que delimita las emisiones para el periodo 2008/12, fecha en la que las emisiones no deberían sobrepasar en un 24% las del año 1990. De esta manera, queda dividido el plan de actuación en dos etapas, una primera (2005/07) de adecuación y una segunda (2008/12) de consolidación, cumpliendo así el periodo de prueba o de preparación a los países de cara a cumplir con los objetivos asumidos en Kioto, contemplado en la Directiva 2003/87/CE.

Finalizado el plazo de la primera etapa (2005-2007) podemos analizar el grado de cumplimiento de las instalaciones. Para ello es necesario acudir a los informes anuales elaborados y publicados por el Registro Nacional de Derechos de Emisión de Gases de Efecto Invernadero (RENADE), donde se especifica tanto los derechos asignados a cada instalación como el número de títulos entregados al final de cada ejercicio[12].

Así, en el año 2005, el número de instalaciones obligadas a entregar derechos de emisión ascendió finalmente a 834 y en el año 2006, esta cantidad se incrementó hasta un total de 1.045 centros productivos. Sin embargo, no ha sido posible incluir todas estas instalaciones en nuestro estudio ya que algunas de esas empresas no han entregado derechos durante los periodos analizados. Los motivos de esta actitud son varios: no han ejercido actividad, no han entrado en funcionamiento, no han cumplido con su obligación de entregar los derechos, etc. Por ello, para no desvirtuar los resultados de la comparativa sectorial que realizamos en este apartado, hemos considerado oportuno eliminar estas empresas del análisis. La determinación del número de instalaciones que finalmente son incluidas en este trabajo queda resumida en la Tabla 1.

---

[11] Actualmente regulado por la Ley 1/2005, de 9 de marzo, del régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.

[12] Al cierre del presente trabajo, no se había publicado el informe de cumplimiento correspondiente al año 2007.

Tabla 1. Instalaciones incluidas en el análisis comparativo sectorial

		Año 2005		Año 2006	
		Nº instalaciones	Derechos asignados (Tm de CO_2)	Nº instalaciones	Derechos asignados (Tm de CO_2)
TOTAL RENADE		834	173.240.903	1.045	163.318.415
E^{sas} eliminadas		32	196.538	25	62.274
CAUSAS	**C1**	26	133.519	9	0
	C2	2	12.709	2	13.364
	C3	2	36.648	-	-
	C4	1	1.995	-	-
	C5	1	11.667	1	5.000
	C6	-	-	6	0
	C7	-	-	5	40.538
	C8	-	-	2	3.372
Instalaciones analizadas		**802**	**173.044.365**	**1.020**	**163.256.141**

Descripción de las causas:

C1: No entró en funcionamiento en el ejercicio correspondiente
C2: No tuvo actividad durante el ejercicio correspondiente
C3: Nuevo entrante, dado de alta con posterioridad
C4: Cierre de la instalación
C5: Incumplimiento de su obligación de entregar derechos
C6: Incumplimiento de nuevo entrante por problemas de plazos
C7: Autorización revocada por no tener actividad
C8: Autorización revocada por no pertenecer al ámbito de aplicación

Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 2 y 3 recogen el grado de cumplimiento de los diferentes sectores afectados por la Ley 1/2005 y sus posteriores modificaciones.

Tabla 2. Estado de cumplimiento de las instalaciones sujetas a la Ley 1/2005 en el año 2005 (toneladas de CO_2)

Sector Industrial	Nº instalaciones	Grado de cumplimiento[1] (%)	Instalaciones deficitarias		
			Emisiones autorizadas (1)	Emisiones reales (2)	Déficit (2) – (1)
Azulejos y baldosas	23	88,24	907.870	801.104	106.766
Cal	24	84,00	2.456.300	2.063.211	393.089
Cemento	36	98,38	27.835.642	27.384.551	451.091
Fritas	22	84,55	684.997	579.176	105.821
Pasta y papel	113	89,72	5.296.275	4.751.859	544.416
Refino de petróleo	13	101,40	15.250.000	15.464.168	-214.168
Siderurgia	29	71,78	11.495.151	8.251.579	3.243.572
Tejas y ladrillos	279	86,20	4.752.790	4.097.006	655.784
Vidrio	38	88,49	2.252.579	1.993.225	259.354
Sector Industria	**577 71,95%**	**92,18**	**70.931.604 40,99%**	**65.385.879 35,62%**	**5.545.725**
Sector eléctrico	**67 8,35%**	**120,73**	**86.174.760 49,80%**	**104.038.120 56,67%**	**-17.863.360**
Otra combustión	**158 19,7%**	**88,88**	**15.938.001 9,21%**	**14.166.460 7,72%**	**1.771.541**
TOTAL	**802 100%**	**106,09**	**173.044.365 100%**	**183.590.459 100%**	**-10.546.094**

[1] Emisiones reales /Emisiones autorizadas para el total de las instalaciones.

Fuente: Elaboración propia a partir del Informe de cumplimiento del año 2005

Tabla 3. Estado de cumplimiento de las instalaciones sujetas a la Ley 1/2005 en el año 2006 (toneladas de CO_2)

Sector Industrial	Nº instalaciones	Grado de cumplimiento[1]	Instalaciones deficitarias		
			Emisiones autorizadas (1)	Emisiones reales (2)	Déficit (2) – (1)
Azulejos y baldosas	36	86,73	1.585.341	1.374.976	210.365
Cal	23	90,04	2.314.334	2.083.728	230.606
Cemento	36	96,56	26.115.781	25.218.633	897.148
Fritas	22	79,52	693.488	551.469	142.019
Pasta y papel	111	82,37	5.527.327	4.553.076	974.251
Refino de petróleo	13	101,60	15.251.118	15.494.751	-243.633
Siderurgia	29	71,64	11.466.729	8.214.651	3.252.078
Tejas y ladrillos	278	84,74	4.782.555	4.052.777	729.778
Vidrio	38	88,66	2.252.394	1.996.937	255.457
Sector Industria	**586 57,45%**	**90,79**	**69.989.067 42,87%**	**63.540.998 38,39%**	**6.448.069**
Sector eléctrico	**77 7,55%**	**118,12**	**72.390.386 44,34%**	**85.504.711 51,66%**	**-13.114.325**
Otra combustión	**357 35,00%**	**78,96**	**20.876.688 12,79%**	**16.483.790 9,96%**	**4.392.898**
TOTAL	**1.020 100%**	**101,39**	**163.256.141 100%**	**165.529.499 100%**	**-2.273.358**

[1] Emisiones reales /Emisiones autorizadas para el total de las instalaciones.

Fuente: Elaboración propia a partir del Informe de cumplimiento del año 2006

Puede apreciarse que en dos de los sectores recogidos en las tablas anteriores existen diferencias, de un año a otro, con respecto al número de instalaciones implicadas: "Otra combustión" e "Industria: azulejos y baldosas". Estas diferencias, tal y como indica el propio informe del RENADE, se deben a la ampliación del ámbito de dicha Ley por el Real Decreto Ley 5/2005. Salvo estas excepciones, puede apreciarse que el número de instalaciones es similar en ambos ejercicios.

Del análisis de las tablas anteriores apreciamos que los sectores industriales, a pesar de ser el grupo que mayor número de instalaciones tiene (reúne 577 y 586 centros para los años 2005 y 2006 respectivamente, representando el 71,95% y el 57,45% del total[13]), no es, sin embargo, el que ha registrado mayor volumen de emisión. En su lugar, destaca el grupo eléctrico que, a pesar de estar compuesto por un número reducido de empresas (el 8,35% y el 7,55% del total de las instalaciones implicadas, en los años 2005 y 2006, respectivamente) abarcan en ambos periodos, más del 50% de las emisiones de CO_2 registradas.

Centrándonos en el sector industrial, destacamos el sector cerámico (tejas, ladrillos, azulejos y baldosas) con 314 factorías en el año 2006, que representa el 53,58% del sector industrial y el 30,78% del total de las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de la Ley 1/2005, distribuidas por todo el territorio nacional de

[13] La reducción de representatividad del sector industrial respecto al total se debe al incremento de instalaciones agrupadas bajo el epígrafe "otra combustión".

manera desigual, destacando la comunidad andaluza con aproximadamente el 26,6% del total industrial, concentrado mayoritariamente en la provincia de Jaén. Con algo menos de la mitad de fábricas que el sector cerámico el sector del papel y de la pasta es el más implicado por número de instalaciones (111), distribuyéndose el resto de instalaciones entre los demás sectores, no superando en ningún caso las 40 compañías por sector. Y si bien el mayor número de instalaciones implicadas en el sector industrial se concentraba en el sector cerámico, no ocurre igual si atendemos al volumen de emisiones registradas. Así pues, como se recoge en la Tabla 3 la cuantía mayor corresponde a las instalaciones de cemento y cal (42,96%) y la menor a la industria de fritas, con tan sólo el 0,87% del total de toneladas de CO_2 emitidas.

Por otra parte, si prestamos atención a los valores totales de las Tablas 2 y 3, vemos que durante estos dos ejercicios se ha producido un déficit de emisiones en los centros productivos ubicados en territorio español, es decir, el volumen de las emisiones total ha sido superior a la cuota preestablecida por el gobierno mediante el PNA aprobado. Sin embargo, como tónica general, el comportamiento de los diferentes sectores industriales ha sido positivo, presentando niveles de contaminación inferiores al fijado por el gobierno. Solamente los sectores del refino de petróleo y eléctrico presentan un balance negativo de títulos. A tenor de lo comentado anteriormente, el volumen de emisiones del sector eléctrico es tan elevado que absorbe el superávit del resto de sectores industriales, generando además un déficit en términos globales de más de 10 millones de títulos en el año 2005. No obstante, también debemos mencionar la importante mejora que se observa en este sector, que ha reducido las emisiones en el ejercicio 2006. Este comportamiento ha supuesto un descenso del 106,09% al 101,39% en el volumen de emisiones registradas con respecto al volumen de emisiones emitidas. Esta tendencia decreciente invita a pensar que, en términos globales, las industrias ubicadas en territorio español se ajustarán a los objetivos planteados por el gobierno a finales de 2007.

No obstante, debe tenerse en cuenta que los resultados comentados son a en términos agregados, ya que, si bien todos los sectores industriales implicados han cumplido su tarea, no ocurre igual si analizáramos para cada instalación las emisiones verificadas y transferidas, lo cual posicionará a las empresas en el mercado de CO_2, en función del déficit o superávit de emisiones conseguido.

Por otro lado, la Tabla 4 refleja las limitaciones de emisiones fijadas por el gobierno con la aprobación del segundo PNA, que abarca los años 2008/12.

De un primer análisis de los datos recogidos en la Tabla 4 se pone de manifiesto que el PNA presenta, en términos totales, una tendencia decreciente en cuanto al volumen de emisión autorizado, pasando de casi 152 millones de toneladas en 2008 a algo más de 143 millones en 2012 (lo que supone un decremento del 5,81%). No obstante, esta reducción es soportada íntegramente por el sector eléctrico, pues el resto de los sectores presentan similares volúmenes de asignación a lo largo del periodo que abarca este segundo PNA.

Por otra parte, si comparamos las emisiones autorizadas durante estos años con el volumen de emisiones permitido durante el año 2006 (véase Tabla 3), puede apreciarse que el sector industrial no ha sufrido un recorte de las emisiones, resaltándose cómo, a pesar de que se ha experimentado un descenso del número de instalaciones (de 586 factorías se han pasado a 561), se han incrementando ligeramente el total de emisiones autorizadas, pasándose de casi 70 millones de toneladas a un valor medio aproximado de 74 millones de toneladas anuales para este segundo periodo. El sector eléctrico presenta una tendencia contraria a la expuesta durante los 8 años que abarcan los dos PNA, dado que a pesar del incremento de instalaciones que se ha experimentado durante estos años (pasándose de 67 en 2005 a 84 instalaciones en 2008/12), el número de

permisos se han reducido en 34,7 millones de toneladas (de 86.174.760 derechos entregados en 2005 se pasará a 51.402.888 derechos en el año 2012).

Tabla 4. PNA aprobado para el periodo 2008/12 (toneladas de CO_2)

Sector Industrial	2008	2009	2010	2011	2012	Nº instalaciones
Azulejos y baldosas	1.438.434	1.438.434	1.438.434	1.438.434	1.438.434	35
Cal	2.412.398	2.412.398	2.412.398	2.412.398	2.412.398	22
Cemento	29.014.917	29.014.917	29.014.917	29.014.917	29.014.917	36
Fritas	620.627	624.367	624.367	624.367	624.367	19
Pasta y papel	5.483.368	5.483.368	5.483.368	5.483.368	5.483.368	103
Refino de petróleo	15.791.369	15.960.366	16.131.173	16.303.806	16.478.287	13
Siderurgia	12.212.307	12.212.307	12.212.307	12.212.307	12.212.307	29
Tejas y ladrillos	4.357.416	4.357.416	4.357.416	4.357.416	4.357.416	266
Vidrio	2.209.087	2.209.087	2.209.087	2.209.087	2.209.087	38
Sector Industria	73.539.923	73.712.660	73.883.467	74.056.100	74.230.581	561
Sector eléctrico	60.929.805	56.089.185	53.243.735	51.535.931	51.402.888	84
Otra combustión	17.445.015	17.462.087	17.440.353	17.445.318	17.445.684	363
TOTAL	**151.914.743**	**147.263.932**	**144.567.555**	**143.037.349**	**143.079.153**	**1.008**

Fuente: Elaboración propia a partir de Orden Pre/3420/2007, de 14 de noviembre de 2007

3. LOS PLANES DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL Y LAS EMISIONES DE CO_2. IMPLICACIONES DEL PROTOCOLO DE KIOTO

La distribución sectorial de emisiones de CO_2 del Plan Nacional de Asignación de Derechos, descrita en el apartado anterior, condicionará en gran parte las estrategias o alternativas de actuación de las factorías para compatibilizar el cumplimiento del Protocolo de Kioto con el desarrollo de su actividad productiva, de manera que contribuya a maximizar el beneficio total de la empresa, que es el objetivo básico de toda entidad económica privada para garantizar su continuidad en el mercado.

Las limitaciones de emisiones de CO_2 fijadas en el Protocolo de Kioto tienen implicaciones en la planificación de la producción de las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación del Real Decreto 777/2006 transformando las emisiones de CO_2 en un factor limitado de su producción. De esta manera, a partir de enero de 2005 deja de considerarse ese contaminante como un residuo, que aparte del daño medioambiental que ocasiona, no tiene efectos directos sobre los resultados de las empresas, para convertirse en un input más del proceso productivo, pagando pues por ello una cantidad que le permita emitir una cantidad determinada de ese contaminante, convirtiéndose así en una restricción más para su capacidad productiva.

Así pues, tras la aprobación de los PNA, las empresas implicadas, para determinar sus planes de producción, tendrán que tener en cuenta por un lado, las limitaciones de emisiones de CO_2 impuestas por el Protocolo de Kioto y por otro, las emisiones derivadas de la producción:

a) Las emisiones autorizadas, se obtendrá a partir de las cantidades asignadas en el correspondiente Plan Nacional de Asignación y de los permisos adquiridos, bien directamente en el mercado europeo de emisiones de CO_2 o a través de las otras medidas contempladas en la normativa reguladora del comercio de emisiones, siempre cumpliendo los límites vigentes de emisiones atmosféricas recogidos en las normativas aplicables a los procesos industriales implicados.

La asignación sectorial de permisos de CO_2, salvo en algunos casos[14], está basada en las emisiones de las instalaciones durante el periodo 2000/02, procedentes de las mediciones directas y recogidas en el Inventario de Emisiones de GEI (1990/2002), repartiéndose entre las instalaciones incluidas en el sector en función del peso que las emisiones de cada una hayan tenido sobre el total durante el periodo de referencia, garantizándose así la representatividad y la posibilidad de verificar la información de base.

b) Las **emisiones reales** dependerán de la fabricación, siendo preciso determinar la cantidad de CO_2 emitido a la atmósfera por unidades fabricadas de los productos, diferenciando los tipos de productos y las fuentes de contaminación, permitiendo así a los responsables de la producción de la empresa verificar la contribución de cada uno de los productos fabricados al total de CO_2 liberado a la atmósfera. No todos los productos fabricados por la empresa contaminan el aire de la misma manera, depende principalmente de la materia prima y el combustible empleados directa o indirectamente en sus procesos de fabricación.

Una vez conocida las emisiones de CO_2 por cada unidad fabricada de los diferentes productos de la empresa y teniendo en cuenta las limitaciones de CO_2 entre las restricciones productivas, el paso siguiente será determinar el programa óptimo de producción que maximice el beneficio de la empresa, para lo que aplicamos la técnica de programación lineal en el siguiente apartado.

3.1. Programa óptimo de producción: aplicación de un modelo de programación lineal

La Figura 1 recoge gráficamente el proceso para plantear la planificación de la producción en términos de programación lineal[15]. Ello permitirá a la empresa determinar el plan de producción que proporcione el máximo beneficio empresarial sujeto a las restricciones fijadas por los factores productivos limitados, incluidas las emisiones de CO_2 derivadas del cumplimiento del Protocolo de Kioto. Si bien esta técnica no está exenta de limitaciones[16] puede ofrecer información importante para entender la nueva situación de la empresa ante la implantación del Protocolo de Kioto. En este sentido, con la programación lineal se podrá observar el efecto del mercado de derechos de emisión sobre la función objetivo de la empresa, bajo las siguientes hipótesis:

- El consumo de cada recurso es directamente proporcional al nivel de actividad y que éste incide proporcionalmente en la función objetivo.

---

[14] Como en las instalaciones de cogeneración y las emisiones de proceso, así como en aquellas instalaciones, que por circunstancias excepcionales (como pudiera ser una parada prolongada por su mantenimiento), disponen de datos históricos de sus emisiones que no cubren el periodo considerado.

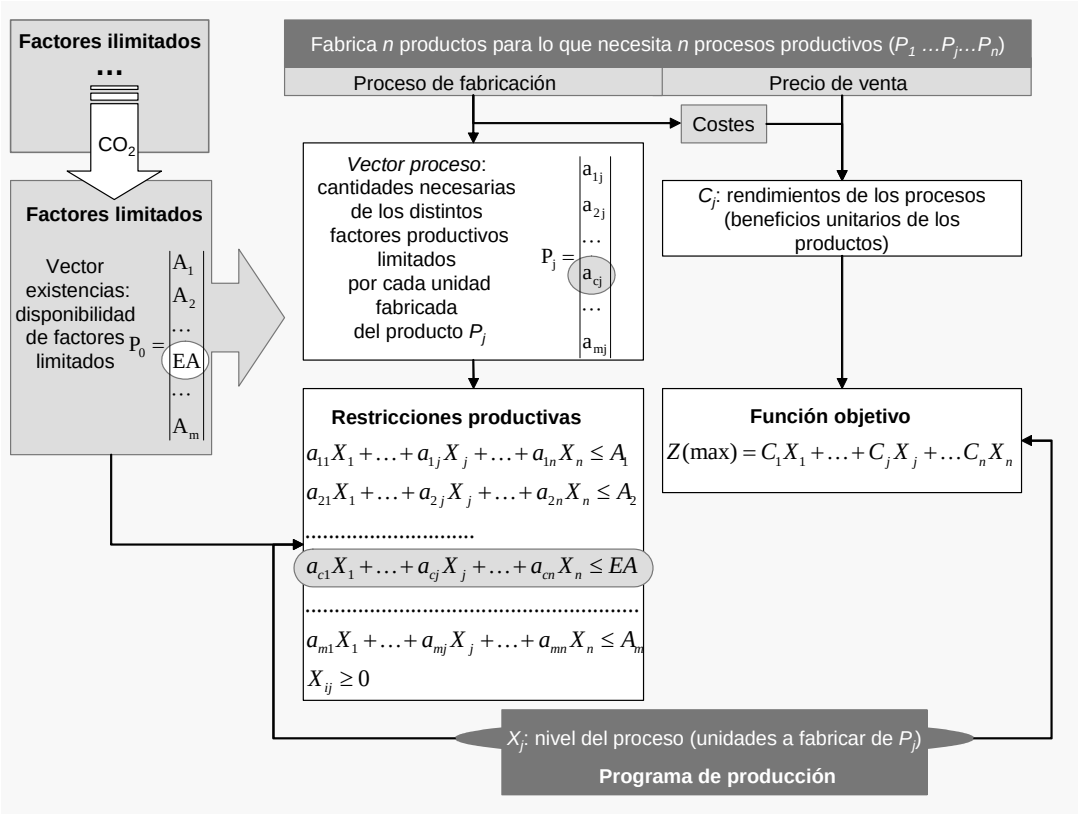
[15] Ver, entre otros, Flecher y Clarke (1966), Churchman, Ackoff y Arnoff (1971) o Hillier y Lieberman (1989).

[16] Entre las que se encuentran:

- Sólo tiene en cuenta valoraciones cuantitativas, no considera cuestiones cualitativas que pudieran incidir sobre la determinación del programa de producción.
- Considera que las relaciones entre variables son lineales, pudiendo existir relaciones más complejas.
- Los beneficios unitarios de los productos se consideran constantes, suponiendo linealidad de los costes (los cuales suelen depender del volumen de producción) e independencia de los precios de venta de los productos con respecto al total ofertado.
- Realiza un análisis estático, por lo que considera fija la estructura técnico-económica de la empresa.

- El consumo de cada factor limitado y la función objetivo es igual a la suma de las cantidades correspondientes a cada producto o actividad.
- Los niveles de actividad pueden ser valores no enteros.
- Los parámetros del modelo son constantes y conocidos.

Figura 1. Planteamiento del modelo de programación lineal.



Fuente: Elaboración propia.

El proceso se inicia, una vez conocidos los productos que desea fabricar (P_j), con la identificación de sus factores productivos limitados, a los que habrá que añadir, como venimos refiriéndonos en este trabajo, las emisiones de CO_2. Las cantidades disponibles de estos factores componen el vector existencias y, para el caso de las emisiones de CO_2 incluirán las emisiones autorizadas (EA), las cuales engloban las cantidades asignadas por el PNA y otras posibles emisiones conseguidas mediante alguno de los otros mecanismos de desarrollo limpio contemplados en el Protocolo de Kioto.

De acuerdo a las características del proceso de fabricación, la empresa debe definir, por un lado, las cantidades que son necesarias, de cada uno de los factores limitados para fabricar sus productos (a_{jm}). Estos valores, junto con las unidades que se fabricarán de cada uno de los productos (X_j), que componen el programa de producción, y con las cantidades limitadas que se reflejan en el vector existencias, conformarán las restricciones productivas.

Por otro lado, conocidos los beneficios que se obtendrán con la venta de cada uno de los productos (C_j) se definirá la función objetivo, en la que las cantidades a fabricar de cada uno de ellos (X_j) son las incógnitas que se desean resolver mediante este modelo.

Una vez planteado el problema en términos de programación lineal, es decir, cuando ya han sido determinadas las restricciones y la función objetivo, la resolución de éste puede obtenerse mediante varios métodos, gráficamente[17] o mediante la aplicación del algoritmo simplex. Si bien existen en el mercado diferentes programas informáticos que permiten el tratamiento y resolución de problemas de programación lineal en poco tiempo[18], para interpretar los resultados nos parece más adecuado presentar el cálculo mediante el método simplex[19], lo que nos ofrecerá información relevante para la toma de decisiones[20].

El programa base, formado por vectores unitarios, se generará transformando todas las desigualdades incluidas en las restricciones en igualdades introduciendo, para ello, las variables de holgura (h_j), con coeficiente unitario, que entrarán en el lado izquierdo sumando, en restricciones del tipo menor o igual, o restando, en restricciones del tipo mayor o igual. De esta forma, la restricción relativa a las emisiones de CO_2 quedaría de la siguiente manera:

$$a_{c1}X_1 + \ldots + a_{cn}X_n + h_c = EA \qquad (1)$$

donde $a_{c1}X_1 + \ldots + a_{cn}X_n$ recoge las emisiones reales de la empresa, según la producción determinada en el programa óptimo, y h_c refleja el volumen de emisión sobrante con respecto a las emisiones autorizadas.

Dado que uno de nuestros objetivos es determinar el precio que la empresa estaría dispuesta a pagar por los derechos de emisión, no se contempla, en principio, la compra de permisos con la finalidad de aumentar las emisiones autorizadas o la venta de los derechos sobrantes, dentro de la restricción de las emisiones de CO_2. La inclusión de estas opciones conllevaría la fijación de un precio estimado del derecho dentro de la función objetivo, con objeto de calcular el programa óptimo de producción, lo cual impediría conocer el precio máximo a pagar por el permiso de emisión. Por este motivo, el rendimiento que le asignaremos a la variable de holgura de la restricción de emisiones será cero para, de esta manera, poder determinar el precio al que la empresa está dispuesta a comprar el derecho.

Tal y como se recoge en la Figura 2, tras la aplicación del método simplex tabulado, mediante sucesivas iteraciones, se llegará a una tabla que reflejará el programa óptimo de producción (en donde todos los rendimientos marginales $-w_j$- son menores o iguales que cero) que maximiza los beneficios de la empresa. Aquél estará formado por las variables principales (X_j), que indicarán las cantidades a fabricar de los productos, y por las variables de holgura (h_j), que dependiendo del signo (# ó ∃) de la restricción relativa al factor productivo correspondiente, tendrán un significado diferente (sobrante respecto al consumo permitido o consumo por encima del mínimo establecido, respectivamente). Así pues, en relación a la restricción de las emisiones de CO_2, nos podemos encontrar con dos casos:

a) Emisiones reales ≤ Emisiones autorizadas:

El programa óptimo de producción no consume el volumen de emisiones autorizadas de CO_2 (EA), por lo que aparecerá en el mismo la variable de holgura relativa a la restricción de las emisiones de CO_2 (h_c*), cuyo

[17] Este procedimiento está limitado al uso de dos factores productivos limitados.

[18] Como pueden ser el Lingo©, Lindo©, Lindo API© o incluso la hoja de cálculo Excel© perteneciente al Microsoft© Office©, mediante el uso de la función Solver.

[19] El método Simplex es un procedimiento iterativo de búsqueda de la solución óptima en problemas de programación lineal, ideado por Dantzig en 1947, cuya aplicación requiere el cumplimiento de las mismas hipótesis de programación lineal, citadas anteriormente.

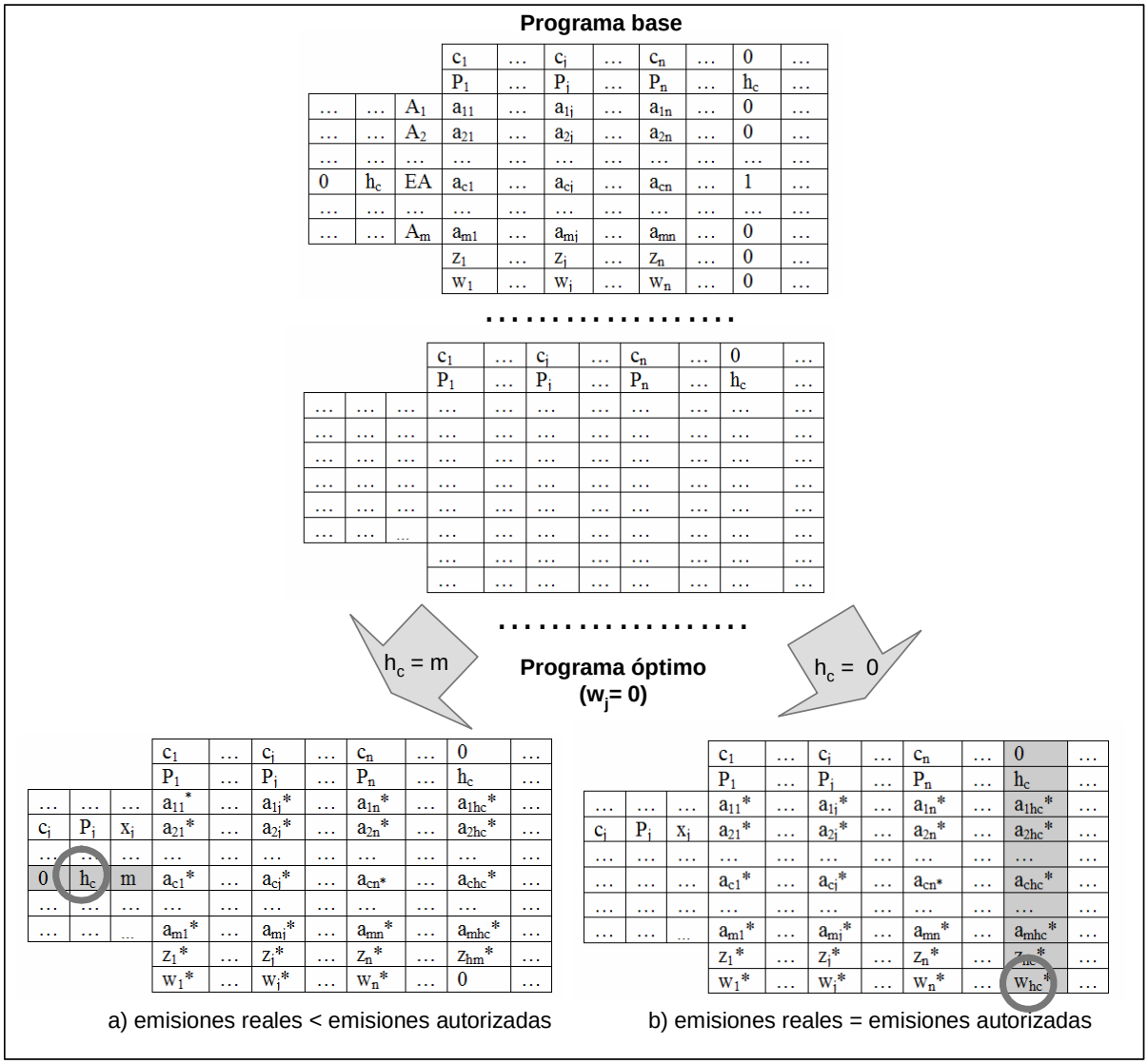
[20] Seguiremos la metodogía utilizada por: Domínguez y otros (1995) y Miranda y otros (2004).

valor (m) nos indicará la cantidad de emisiones asignadas no utilizadas en la producción, es decir, los derechos de emisiones sobrantes.

b) Emisiones reales = Emisiones autorizadas:

El programa óptimo de producción implica el consumo del total de las emisiones autorizadas, de manera que la variable de holgura relativa a la restricción de las emisiones de CO_2, no aparecerá en el programa óptimo (h_c*= 0), cuyo rendimiento marginal (w_{hc}*) nos permitirá, como veremos a continuación, determinar el precio máximo que estaría dispuesta la empresa a pagar por emitir más contaminante CO_2 a la atmósfera del permitido.

Figura 2. Cálculo del programa óptimo según el método simplex.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Medidas de ajuste

Ante las dos circunstancias con las que nos podemos encontrar en el programa óptimo, emisiones reales menores que las autorizadas o iguales a esta última, a la empresa se le plantean varias alternativas de actuación, que pasamos a analizar en los apartados siguientes.

3.2.1. Emisiones reales menores que las emisiones autorizadas

La empresa no agota las emisiones autorizadas, de manera que los derechos de emisión sobrantes pueden ser vendidos en el mercado de derechos, obteniendo así, un beneficio extraordinario que engrosará los beneficios totales de la empresa. El valor de este beneficio se calculará por diferencia entre el precio de asignación del derecho y el precio de venta que vendrá dado por la oferta y demanda de dicho mercado, aunque en la primera etapa establecida por el Protocolo de Kioto (años 2005 a 2007) los derechos de emisión asignados por el PNA español han sido gratuitos.

La producción de la empresa se encuentra limitada por algún otro factor productivo que impide aumentar los volúmenes de fabricación. Para averiguarlo se analizará qué variables de holgura, referentes a los distintos factores productivos, no aparecen en el programa óptimo, lo que indicará que se han utilizado todas las existencias disponibles. Tras determinar los factores que limitan la producción la empresa se planteará el aumento de la disponibilidad de todos ellos en conjunto.

3.2.2. Emisiones reales iguales a las emisiones autorizadas

La producción de la empresa se encuentra limitada por la restricción de las emisiones de CO_2, ya que emiten gases por el total de emisiones autorizadas. La empresa se planteará si le interesa comprar derechos de emisión en el mercado para aumentar las emisiones y, de esa manera, producir más y conseguir mayores beneficios.

En este sentido, a la empresa le interesará comprar permisos de emisión si el precio de estos derechos es igual o inferior al beneficio que obtendría si se aumentase las emisiones autorizaras en el mismo volumen. Este último valor es reflejado por el rendimiento marginal de la variable de holgura de la restricción relativa a los derechos (w_{hc}*) en el programa óptimo, cuyo significado no es otro que el coste máximo que la empresa pagaría por unidades adicionales de ese recurso limitado[21] (en este caso por el incremento unitario de las emisiones de CO_2). Así, si el precio de mercado del permiso es superior a w_{hc}* la empresa no comprará derechos y, por tanto mantendrá el programa óptimo; y si el precio del permiso de emisión en el mercado es igual o inferior a w_{hc}* la empresa comprará derechos de emisión, aumentando así las emisiones totales autorizadas.

El volumen de derechos que la empresa adquirirá en el mercado, a un precio máximo de w_{hc}*, está limitado por el resto de las restricciones productivas de la empresa. En concreto será necesario observar si existe alguna variable de holgura, de otra restricción productiva, cuyo valor sea también cero, en cuyo caso la compra de derechos no cambiará el programa óptimo, ya que a la empresa no le interesará comprar permisos mientras que no aumente las disponibilidades del factor productivo más restrictivo.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Aunque aún es pronto para confirmar las consecuencias del Protocolo de Kioto para el sector industrial de los países comprometidos, es indiscutible que las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación del Real Decreto Ley 5/2004, que regula el régimen de comercio de derechos de emisión de GEI, se enfrentan, en los próximos años, a nuevos retos para seguir siendo competitivas.

[21] Denominado precio sombra o dual o coste de refecncia.

Son muchos los factores que van a condicionar el desarrollo de las estrategias medioambientales de las empresas españolas para reducir sus emisiones de CO_2 y, por tanto, su participación en el mercado de emisiones, actuando como compradoras y/o vendedoras de permisos, en función de los derechos asignados en el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión y de las otras posibles alternativas de actuación para mitigar su impacto (proyectos limpios en otros países, I+D, tecnologías limpias, modificación en procesos y productos, etc.).

En cualquier caso, la búsqueda del equilibrio entre producción, emisiones de CO_2 y eficiencia constituye la base de las actuaciones en los próximos años de la industria incluida en el ámbito de aplicación del Protocolo de Kioto.

Es por ello que en este trabajo, en una primera aproximación, hemos analizado las implicaciones de la puesta en marcha del mercado de emisiones de CO_2 sobre la planificación de la producción industrial, mediante la aplicación de un modelo de programación lineal, que si bien no nos permite representar totalmente la nueva situación marcada en el mercado (ya que realiza un análisis estático a partir de la estimación de los valores de determinados parámetros y considera relaciones lineales entre las variables), sí consigue realizar una aproximación a la incidencia que tendrá este sobre el beneficio de la empresa, dependiendo de que las emisiones reales derivadas de sus procesos productivos sean inferiores o iguales a las emisiones autorizadas inicialmente.

Por su aportación a la comprensión de las decisiones de las empresas implicadas respecto a la compra de nuevos derechos para producir más y por tanto, emitir más CO_2 a la atmósfera, destacamos del estudio realizado la interpretación de los precios sombra o de referencia en el análisis de la dualidad del programa (representados en las tablas del método simplex por el rendimiento marginal de la variable de holgura correspondiente a la restricción relativa a las emisiones de CO_2), que permitirá a las empresas delimitar la cantidad máxima que estarían dispuesta a pagar en el mercado de emisiones por incrementos adicionales en las cantidades permitidas inicialmente y así maximizar su beneficio.

Sin duda el Protocolo de Kioto constituye una oportunidad para modernizar el sistema productivo hacia un modelo sostenible de producción y consumo. Pero este desafío de largo alcance requiere un esfuerzo importante para el sector industrial español, donde el comercio de derechos de emisiones de CO_2 desempeñará un papel fundamental en los próximos años, constituyendo la base sobre la que se tomarán futuras decisiones a nivel internacional, en diferentes foros, respecto al cambio climático y que marcarán las líneas de actuación en este ámbito en la etapa post-Kioto.

5. BIBLIOGRAFÍA

Álvarez-Arenas Bayo, M. y otros (2006): *Tendencias y proyecciones de las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa, 2003: seguimiento del Protocolo de Kioto*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

Aragón, J.A.; Senise, M.E. y Matias, F. (1998): "Estrategia, estructura organizativa y desempeño medioambiental: repercusiones del ajuste", *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, vol. 4, nº 3, pp.41-56.

Brío, J.A., Férnández, E. y Junquera, B. (2003): "Implantación de sistemas de gestión medioambiental en las empresas industriales españolas: un análisis empírico de la influencia de las actitudes y de las actuaciones directivas", *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de las Empresa*, vol. 9, nº. 1, pp. 155-178.

Brío, J.A., Férnández, E. y Junquera, B. (2003): "Importancia formal del área medioambiental en la empresa: estudio empírico para el caso español", *Revista Europea de Dirección y Economía de las Empresa*, vol. 12, nº. 1, pp. 23-42.

Churchman, C. W., Ackoff, R. L. y Arnoff, E. L. (1971): *Introducción a la Investigación Operativa*, Aguilar.

Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 2003 por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo, (DOCE L275, de 10 de octubre de 2003).

Domínguez Machuca, J. A., García González, S., Domínguez Machuca, M. A., Ruíz Jiménez, A. y Álvarez Gil, M. J. (1995): *Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.

Escuela de Organización Industrial (2005): *Repercusión del Protocolo de Kioto y del comercio de emisiones en la competitividad del sector industrial español.* Ed. Escuela de Organización Industrial, Madrid.

Flecher, A. y Clarke, G. (1966): *La Investigación Operativa en la Práctica de la Empresa*, Deusto.

Fundación Entorno (2006): *Entorno 2006. Informe sobre la gestión de la sostenibilidad en la empresa española*, Madrid.

Hillier, F. S. y Lieberman, G. J. (1989): *Introducción a la Investigación de Operaciones*, McGraw-Hill.

Informes de cumplimiento de los años 2005 y 2006 de las instalaciones afectadas por la Ley 1/2005, Mayo 2006 en https://www.renade.es/HiddenDoc/informeCumplimiento.pdf.

Junceda Moreno, J. (2005): *Comentarios a la Ley 1/2005, de 9 de marzo, de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, y a la normativa complementaria de aplicación del Protocolo de Kioto.* Ed. Thomson-Civitas. Madrid.

Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen de comercio de emisión de gases de efecto invernadero (BOE nº 59 de 10/03/2005).

Miranda, F. J., Rubio, S., Chamorro, A. y Bañeguil, T. (2004): *Manual de dirección de operaciones*, Thomson.

Nieto, J. y Santamarta, J. (2003): Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (1990-2004) en http://www.ccoo.es/publicaciones/Emisionesco2_2004.pdf.

Oficemen: Agrupación de Fabricantes de Cemento de España en http://www.oficemen.com

Orden Pre/3420/2007, de 14 de noviembre, por la que se publica el Acuerdo de Consejo de Ministros por el que se aprueba la asignación individual de derechos de emisión de gases de efecto invernadero a las instalaciones incluidas en el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012.

Real Decreto 1866/2004, de 6 de septiembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-07 (BOE nº 216 de 7/09/04).

Real Decreto 777/2006, de 23 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 1866/2004, de 6 de septiembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión, 2005-07 (BOE nº 150 de 24/06/06).

Real Decreto Ley 5/2004, de 27 de agosto, por el que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero (BOE nº 208 de 28/08/04).

Real Decreto Ley 5/2005, de 11 de marzo, de reformas urgentes para el impulso a la productividad y para la mejora de la contratación pública (BOE nº 62, de 12/03/05).

Resolución de 26 de enero de 2005, de la Subsecretaría, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros, de 21 de enero de 2005, por el que se aprueba la asignación individual de derechos de emisión a las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación del real Decreto Ley 5/2004.

Ríos Insua, S. (1996): *Investigación operativa: programación lineal y aplicaciones*. Centro de Estudios Ramón Areces, D.L.

Rosado Cubero, A. (2004): "La industria del cemento en España. Magnitudes y evolución entre 1994 y 2003" *Economía Industrial*,nºs 355 y 356, pp. 239-249.

Rubio de Urquía, F. (2006): *Cambio climático más allá de Kioto: elementos para el debate*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

Rubio, V. (2004): *La gestión ambiental en la pequeña y mediana empresa*, http://www.ces-cv.es/conferencias_medio_ambiente/segundas/3.pdf

Sharma, S. (2000): "Managerial Interpretations and Organizational Context as Predictors of Corporate Choice of Environmental Strategy", *Academy of Management Journal*, vol. 43, nº 4, pp. 681-697.

Vela Ortiz, S. (2005): "Marco teórico de la Directiva de Comercio de Emisiones", *Información Comercial Española*, nº 822, pp. 39-50.