

Usando el método de control sintético para analizar la efectividad del Protocolo de Kioto para reducir las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en España

Recibido: diciembre, 13 de 2017 - Aprobado: junio, 18 de 2018

doi: <http://dx.doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/economia/a.7203>

Joel A. Rosado-Anastacio*

Resumen

En este artículo se examina el efecto del Protocolo de Kioto en España, específicamente se estudia la efectividad de los objetivos del Protocolo de Kioto (PK) en reducir las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en España. Para tal propósito se utilizaron dos conjuntos de datos de panel conformados por información a nivel país (grupo donante formado por información de países) y a nivel estado (grupo donante integrado por información de los estados de Estados Unidos). Para obtener una estimación consistente sobre el efecto del Protocolo de Kioto en España, se utilizó el método de control sintético (MCS), el cual permitió realizar una adecuada hipótesis de contraste. Los hallazgos indican que no existe un efecto de reducción de emisiones para los gases estudiados, no obstante, la evaluación del PK prevé una serie de complicaciones que puede aludir a los descubrimientos dependiendo del enfoque econométrico que se emplee. Los hallazgos son consistentes con la evidencia previa que concluye un efecto nulo del Protocolo de Kioto, y contribuye midiendo el impacto del Protocolo de Kioto en emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en España.

Palabras clave: control sintético, España, CO₂, N₂O, CH₄.

Clasificación JEL: K33, Q54.

* Escuela Superior Politécnica del Litoral (Espol), Facultad de Ciencias Sociales y Humanísticas, Campus Gustavo Galindo km 30,5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863 Guayaquil (Ecuador). Correo electrónico: jarosado@espol.edu.ec

.....
Cómo citar este artículo: Rosado-Anastacio, J. A. (2018). Usando el método de control sintético para analizar la efectividad del Protocolo de Kioto para reducir las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en España. *Revista de Economía del Rosario*, 21(2), 341-379.

doi: <http://dx.doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/economia/a.7203>

Using the Synthetic Control Method to Analyze the Effectiveness of the Kyoto Protocol to Reduce CO₂, CH₄ and N₂O Emissions in Spain

Abstract

This article examines the effect of the Kyoto Protocol in Spain, specifically the effectiveness of the objectives of the Kyoto Protocol (KP) on reducing CO₂, CH₄ and N₂O emissions in Spain is studied. For this purpose, it was used two sets of panel data that consist in information at country-level (donor pool made up for country information) and at state-level (donor group made up of information from us states). To obtain a consistent estimate on the effect of the Kyoto Protocol in Spain, the synthetic control method (SCM) that allows to perform an adequate contrast hypothesis was used. The findings indicate that there is no reducing effect of emissions for the gases studied; however, the evaluation of the Kyoto Protocol (KP) predicts a series of complications that may allude to the findings depending on the econometric approach used. These findings are consistent with the evidence that shows a null effect of the effectiveness of the Kyoto Protocol (KP), and contribute to measure the impact of the Kyoto Protocol (PK) on emissions of CO₂, CH₄ and N₂O in Spain.

Keywords: Synthetic control, Spain, CO₂, N₂O, CH₄

JEL Classification: K33, Q54

Usando o método de controle sintético para analisar a eficácia do Protocolo de Kyoto para reduzir as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O na Espanha

Resumo

Este artigo examina o efeito do Protocolo de Quioto na Espanha, estudando especificamente a efetividade dos objetivos do Protocolo de Quioto (PQ) na redução das emissões de CO₂, CH₄ e N₂O na Espanha. Para este propósito, foram utilizados dois conjuntos de dados de painel que consistem em informação a nível de país (conjunto de doadores composto por informação de país) e a nível de estado (grupo de doadores composto de informação de estados dos EUA). Para obter uma estimativa consistente sobre o efeito do Protocolo de Kyoto na Espanha, utilizou-se o método de controle sintético (MCS) que permite realizar uma hipótese de contraste adequada. Os resultados indicam que não há efeito de redução de emissões para os gases estudados; entretanto, a avaliação do Protocolo de Quioto prevê uma série de complicações que podem aludir aos achados, dependendo da abordagem econométrica utilizada. Estes resultados são consistentes com as evidências que mostram um efeito nulo da eficácia do Protocolo de Quioto, e contribuem para medir o impacto do Protocolo de Quioto sobre as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O em Espanha.

Palavras-chave: controle sintético, Espanha, CO₂, N₂O, CH₄.

Classificação JEL: K33, Q54.

Introducción

El calentamiento global se ha convertido en uno de los problemas ambientales más graves en llamar la atención del mundo en las últimas décadas. Es una opinión de consenso que el calentamiento global es un resultado inequívoco de la emisión antropogénica de gases de efecto invernadero (GEI) que permanecen como una manta en la atmósfera, evitando así el reflejo del calor en el espacio exterior. En consecuencia, la temperatura terrestre promedio ha aumentado 0,7°C desde el período de preindustrialización. Este incremento de la temperatura ha provocado un cambio climático que ha causado devastación en los ecosistemas y está afectando el desarrollo sostenible en términos sociales y económicos (Lau *et al.*, 2012).

El Protocolo de Kioto (PK)¹ fue aprobado el 11 de diciembre de 1997 por un conjunto de países que se comprometieron a reducir sus emisiones de seis GEI en un promedio del 5,2% durante el período comprendido desde el año 2008 hasta el año 2012, en comparación con los niveles que producían estas naciones en el año 1990, con lo que cada país se comprometió con objetivos individuales de emisiones, los cuales debían cumplirse para finales del año 2012.²

Una razón fundamental por la cual estudiar este fenómeno es debido a que el PK introdujo mecanismos flexibles (los 'Mecanismos de Kioto') que permitieron a los países del anexo B³ cumplir sus compromisos de manera eficiente en función de los costos mediante un mecanismo de cooperación internacional, como el comercio internacional de emisiones (CIE), la implementación

1 La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) estableció el PK en 1997, considerándolo indispensable y necesario para frenar los daños causados por el calentamiento global. El PK demarcó que un esfuerzo global en la mitigación del cambio climático tiene como objetivo reducir las emisiones de GEI de los países desarrollados en un 5,2%, con el año 1990 como referencia en el primer período de compromiso de 2008-2012. El PK propuso mecanismos para ayudar a las naciones ratificadas desarrolladas a lograr su compromiso de reducción de emisiones cumplidas (CREC) asignado de una manera económicamente más viable. Por otro lado, los países en desarrollo han participado en la reducción de emisiones de GEI a través de principios de responsabilidad comunes pero diferenciados. Principalmente, los países en desarrollo podrían participar en proyectos MDL o formular nuevas políticas ambientales de acuerdo con los objetivos del PK. Se propuso un segundo período de compromiso del PK en 2012, conocido como la Enmienda de Doha. Sin embargo, varios países que participaron en el primer período de compromiso han retirado su apoyo.

2 De acuerdo con Lau *et al.* (2012), el comienzo del año 2010 significó que el PK había entrado formalmente en el primer período de compromiso por dos años completos. Es esencial para la investigación sobre los logros de las naciones que han ratificado el PK, en términos del objetivo final de las emisiones de GEI, conocer su desempeño en virtud de mitigar el calentamiento global.

3 Ver UNFCCC (2004) para mayor detalle acerca de la conformación de países 'anexo B'.

conjunta (IC) y el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), y este enfoque aparentemente eficiente no se examina completamente en la actual literatura y es una premisa para la formulación de futuros acuerdos. Por lo tanto, una revisión del PK y su impacto neto en la reducción de emisiones es esencial para alcanzar el objetivo de 2°C adoptado en virtud del Acuerdo de París (Kuriyama y Abe, 2018).

El PK tiene dos esencias fundamentales, que son relevantes para el Acuerdo de París. Primero, el artículo 6° del Acuerdo de París decide el mecanismo de cooperación que permite a cada país llevar a cabo una reducción de emisiones en el exterior. La experiencia de los Mecanismos de Kioto, incluido el MDL, podría ser útil para la negociación relacionada con el mecanismo de cooperación internacional (Howard *et al.*, 2017). En segundo lugar, el PK fue el primer compromiso internacional con las reducciones de emisiones de GEI impuestas por un enfoque descendente, para promover acciones nacionales de mitigación de emisiones de GEI. En este sentido, el nivel actual de ambiciones de mitigación de los países es tan insuficiente que puede haber más presión para crear un enfoque descendente (Klein, 2015) en virtud del proceso del artículo 4° del Acuerdo de París, que requiere que los países desarrollen y presenten sus contribuciones determinadas nacionalmente cada cinco años de manera progresiva. Por lo tanto, una revisión del PK debe basarse en las reducciones de emisiones nacionales de un país, siendo España el elegido en este documento.

La literatura existente es amplia tanto apoyando (Aichele y Felbermayr, 2013, 2012; Almer y Winkler, 2017; Grunewald y Martinez-Zarzoso, 2016; Gupta, 2016) como criticando⁴ (Barrett, 1998; Copeland y Taylor, 2005; Finus, 2008; Gallo *et al.*, 2017; Zhang y Wang, 2011) el efecto del PK. En este documento, se prueba la existencia de tentativas reducciones de emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en España bajo el PK. Para tal fin, se considera que la firma del PK es el 'tratamiento' y se investigó su efecto. Consecuentemente, es crucial identificar las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O contrafactuales que España habría emitido en ausencia de tratamiento. La diferencia resultante se comprendería como el efecto del tratamiento, la cual se definiría como una medida que permite cuantificar la eficacia del PK, en el sentido de que mide el éxito de España

4 En diciembre de 1997, *The Economist* (1997) ya había pronosticado que Estados Unidos nunca podría ratificar el PK, ya que nunca sería aprobado por el Senado de este país. Prins y Rayner (2007) critican su arquitectura inflexible de arriba hacia abajo, que había sido tomada prestada de los tratados internacionales anteriores que regulan los clorofluorocarbonos, las emisiones de azufre y las armas nucleares, y "siempre fue la herramienta incorrecta para la naturaleza del trabajo".

para reducir las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en particular, dado que el PK entró en vigor.

En el proceso de obtención del efecto del tratamiento se presentaron varios obstáculos. Para obtener el efecto del tratamiento, es crucial que haya otros países que no recibieron el tratamiento. Con respecto al PK, los países del primer grupo donante (grupo a nivel país) no tenían objetivos vinculantes de emisiones de GEI y, por lo tanto, son candidatos naturales para el grupo de control no tratado.

Adicionalmente, el momento del tratamiento no es obvio, debido a que se podría argumentar que la fecha de ratificación es el evento de tratamiento, ya que solo a partir de ese momento un país adoptó el objetivo de emisiones en la legislación nacional y, por lo tanto, certifica que considera el objetivo de emisión impuesto por el PK como vinculante. Sin embargo, hay otras dos fechas plausibles para el momento del tratamiento: i) Diciembre de 1997, cuando se adoptó el PK puede ser el inicio del período de tratamiento. ii) Cuando Estados Unidos retiró su apoyo en el año 2001, no estaba claro si el PK entraría realmente en vigor, debido a esto los países que ratificaron el PK podrían haber sido renuentes a tomar medidas costosas para reducir las emisiones de GEI antes de que el PK entrara en vigor. Por lo cual la adopción del PK en el año 2001 por parte de España puede ser otra fecha plausible de inicio del tratamiento.

Para abordar estos retos, se empleó el método de control sintético (MCS) desarrollado por Abadie y Gardeazabal (2003), Abadie *et al.* (2010) y Abadie *et al.* (2015), el cual permitió construir un contrafactual para España a través de un promedio ponderado de países y estados no tratados, de manera que España y su contraparte sintética coinciden lo más posible con las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O antes del tratamiento y en todas las demás características económicas relevantes que no son afectadas por el tratamiento.⁵ En particular, el MCS permite abordar la violación del supuesto de tendencia común requilibrando unidades tratadas y controles con respecto al desarrollo previo al tratamiento de emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, y otros predictores importantes de selección en el tratamiento. Además, se utilizaron dos grupos de control diferentes para estimar las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O contrafactuales para España: i) países vinculados al PK sin objetivos vinculantes⁶ y ii) datos a

5 Las estimaciones se realizaron utilizando el código Stata desarrollado por Abadie *et al.* (2011) y su opción que utiliza un método basado en la regresión para minimizar el error cuadrático medio para el período previo a la intervención.

6 Los resultados que surgieron de las estimaciones de España sintética con base en los datos del grupo donante conformado por países para las especificaciones consideradas

nivel estatal de Estados Unidos.⁷ Este último tiene la ventaja de que no sufre de sesgo de selección debido a la conducta estadounidense renuente a los objetivos del PK. No obstante, los datos sobre algunas covariables que están disponibles para el primer grupo donante no forman parte de los datos del grupo donante a nivel estado debido a ausencia de información.

Para abordar la cuestión del momento del tratamiento, se consideró la fecha del evento de tratamiento en la especificación principal y se ejecutaron controles de robustez en el año 1997, en la fecha de adopción del PK (2002) y el año 2004 (fecha de entrada en vigor del PK). Sin embargo, no se encontró ningún efecto estadísticamente significativo y persistente del tratamiento para España; en detalle, las emisiones de CO₂ hubiesen sido menores si España no hubiese tenido relación alguna con el PK, mientras que las emisiones de CH₄ y N₂O no sufren afectación alguna debido a la existencia del PK. Esto se aplica independientemente de la fecha que se considere como el evento de tratamiento, e independiente de los grupos donantes utilizados como grupo control. El presente análisis expande lo propuesto por Almer y Winkler (2017) realizando el estudio a nivel país, e intentando llenar el vacío existente en la literatura, midiendo también el impacto del PK en las emisiones de CH₄ y N₂O, con los supuestos y especificaciones previamente descritas. Por último, se argumenta sobre los retos al analizar otros tipos de políticas ambientales internacionales. Como consecuencia, la aplicación del MCS objetivamente permite abordar todos estos desafíos, por lo cual puede ser preferible a otros enfoques de datos de panel más tradicionales.

1. Marco teórico

En el Protocolo de Kioto (PK), 37 países industrializados (y la Unión Europea) se comprometieron a reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero (GEI) en un promedio del 5,2 % sobre el período comprendido entre el

como inicio del tratamiento (2001-adopción del PK, 2004-ratificación del PK) son presentadas en la parte de Apéndices, debido a que las conclusiones que surgen de estas son iguales a las que surgen de la especificación en la cual se considera como el año del tratamiento la firma del PK.

7 Los resultados que se dieron en las estimaciones de España sintética con base en los datos de los estados de Estados Unidos para todas las especificaciones consideradas como inicio del tratamiento (1997, 2001, 2004) son presentadas en los apéndices, debido a que sus resultados son considerados como de robustez a la especificación funcional principal, dadas las limitaciones de información (disponible solo para los años 1990-2001, además de la no inclusión de la totalidad de variables predictoras utilizadas en el grupo donante conformado por países).

año 2008 hasta el año 2012 en comparación con los niveles de 1990. En este documento, el objetivo es evaluar la eficacia del PK con respecto a su objetivo principal, la reducción de las emisiones de GEI; sin embargo, debido a las limitaciones de información, se analizará tal efecto únicamente con respecto a las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O.

Para estudiar este efecto, se utilizó el caso español, el cual al estar comprometido y poseer objetivos vinculantes de emisión (Almer y Winkler, 2017) representa un caso particular para investigar el efecto del PK para con estos tres gases; en particular, el día 29 de abril de 1998 España firmó en Nueva York el Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), adoptado en Kioto el 11 de diciembre de 1997. El día 11 de abril de 2001, las Cortes Generales, en su sesión plenaria número 152, aprobaron por unanimidad el PK en la CMNUCC (284 votos a favor de 284 votos emitidos). El día 10 de mayo de 2004 se aprobó y ratificó el PK mediante el instrumento de ratificación del PK, publicado en el BOE número 33 el 8 de febrero de 2005. La aprobación y ratificación implicaba cumplir y hacer que se cumpla el PK en España, el cual se incluye íntegramente en la legislación española mediante el instrumento de ratificación de 2005 (Nieto y Santamarta, 2004).

Para identificar el impacto del PK, se han realizado varios estudios utilizando análisis econométricos (Aichele y Felbermayr, 2012; Almer y Winkler, 2017) y no econométricos desde la perspectiva de la evaluación *ex post* (Grubb, 2016; Shishlov *et al.*, 2016). Entre los estudios que utilizaron el análisis econométrico, la mayoría de los estudios se centraron en el efecto de la reducción de emisiones por las medidas nacionales antes de la evaluación completa de los compromisos de los países del anexo B. Por ejemplo, Grunewald y Martínez-Zarzoso (2016) investigaron los efectos del PK sobre las emisiones de CO₂ en una muestra de 170 países durante el período 1992-2009 utilizando un estimador de diferencias en diferencias. Aichele y Felbermayr (2012) evaluaron los efectos de la ratificación de los compromisos vinculantes de Kioto utilizando variables instrumentales. Almer y Winkler (2017) explicaron el efecto de las emisiones de CO₂ en quince países entre el año 2002 y 2011 utilizando datos de panel a nivel de país y de Estados Unidos; sin embargo, y como es evidente en la existente literatura, la gran mayoría de estos análisis se centraron en el impacto en las emisiones de CO₂, dejando de lado el impacto en las emisiones de CH₄ y N₂O (Rosado-Anastacio, 2018).

En cuanto a los estudios relacionados con los efectos después del final del primer período de compromiso, Grubb (2016) resumió los resultados del PK con respecto al derecho internacional, a los efectos y a las implicaciones del Acuerdo de París. Se analizó la existencia de mecanismos flexibles como el

MDL, lo que permite que algunos países con un límite sustancial de emisiones, como Japón, mantengan su cumplimiento. Shishlov *et al.* (2016) documentaron el cumplimiento total de las partes del PK con base en los datos del informe de período, que contiene los resultados de todas las transacciones de las unidades del PK (unidades de Kioto) hasta el final de 2015. Hay críticas que discuten que el PK causó fuga de carbono cuando las regulaciones en algunos países les permitieron cobrar precios de carbono relativamente altos y, por lo tanto, trasladar la producción de bienes intensivos en CO₂ a los lugares que están exentos de dicha regulación (Copeland y Taylor, 2005).

En lo referente a datos españoles, según cifras del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA, 2018), las emisiones de GEI a nivel nacional se estimaron para el año 2016 en 324,7 millones de toneladas de CO₂. El nivel de emisiones brutas totales se situaba en un 13 % más respecto a 1990 y un 26 % menos respecto a 2005. Las principales variaciones en las emisiones se observan en la generación de electricidad que habría disminuido sus emisiones un 20,7 %, debido al desplazamiento del uso de carbón por energías renovables; el transporte por carretera habría aumentado sus emisiones un 2,7 %, la combustión en la industria habría acrecentado sus emisiones un 1,0 %; las emisiones del sector comercial, residencial e institucional habrían incrementado sus emisiones en un 4,7 % y la agricultura ha presentado un ligero descenso del 0,4 %. El sector con más peso es el energético (75 %), seguido de la agricultura (11 %). Por gases, el CO₂ supone un 80 % de las emisiones totales, seguido del CH₄ (12 %), el N₂O (5 %) y los gases fluoruros (3 %).

Ante las tendencias previamente descritas, con el objetivo de evaluar la eficacia del PK con respecto a la reducción de emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, es crucial identificar las emisiones contrafactuales que habría emitido España si no estuvieran sujetas al tratamiento y compararlas con las emisiones reales. La diferencia resultante, el efecto del tratamiento, es una medida de la efectividad del PK en el sentido de que representa los esfuerzos de España para reducir las emisiones de GEI dado que el PK entró en vigor.

Para obtener este efecto de tratamiento, se enfrentaron dos obstáculos principales. En primer lugar, el momento exacto del tratamiento no es obvio, con lo cual se definieron como fechas relevantes y plausibles del tratamiento la fecha de la firma del PK, en diciembre de 1997; la segunda especificación fue cuando se adoptó el PK, en el año 2002; mientras que la tercera fecha definida fue la ratificación del PK, en el año 2004.

Segundo, para obtener el efecto del tratamiento es crucial que haya otra España (o, más en general, entidades regionales) que no recibieron el tratamiento. En este caso, pueden ser regiones sin objetivos vinculantes de

emisión de GEI en el PK o algún país que haya tenido objetivos de emisión vinculantes con el PK pero que no lo hayan ratificado. Si existiese algún país (o entidad regional) igual a España en todos los aspectos, aparte de recibir el tratamiento o no, el efecto del tratamiento estaría dado simplemente por la diferencia en las emisiones de GEI de España y el país no tratado. Por supuesto, ningún país es igual a otro, con lo cual existe un claro sesgo de selección con respecto al tratamiento.

La figura 1 muestra las emisiones (promedio) de CO₂ de los países del grupo donante y España en relación con sus emisiones de 1997 entre 1990 y 2011. Se observa que las emisiones de CO₂ fueron relativamente estables para los países del grupo donante, mientras que aumentaron considerablemente para España en particular después del año 2000. La hipótesis de identificación clave en los entornos donde se observa el resultado de interés para las unidades tratadas y los controles antes y después de la intervención (incluidas las diferencias en diferencias) es la suposición de tendencia común. La cual propone que, en ausencia del tratamiento, las unidades y controles tratados deben compartir una tendencia común. Aunque es imposible evaluar directamente una tendencia común sin imponer suposiciones fuertes sobre el efecto del tratamiento, las diferencias drásticas y estadísticamente significativas previas al período de tratamiento que se muestran en la figura 1 indican claramente una violación del supuesto de tendencia común en el caso del PK. Las figuras 2 y 3 también ilustran esta relación para CH₄ y N₂O. Además de las diferencias en las tendencias, los países del grupo donante también difieren significativamente con respecto a las características de España, como se mostrará en la sección 3.2.

Los países que figuran dentro del grupo donante enfrentan un problema adicional que puede invalidarlos como controles adecuados. Según las normas del PK, los países del grupo donante pueden alcanzar sus objetivos de emisión mediante reducciones de emisiones nacionales o mediante el uso de uno de los tres mecanismos de flexibilidad: comercio de emisiones, implementación conjunta y mecanismo de desarrollo limpio. Aunque el PK establece claramente que el uso de mecanismos de flexibilidad solo debe ser complementario a los esfuerzos de reducción de emisiones nacionales, puede difuminar la distinción entre España como un país tratado y los países no tratados. En particular, el mecanismo de desarrollo limpio alienta a España y los países comprometidos con el PK a cooperar con los países del grupo donante para reducir las emisiones de GEI. Estas reducciones de emisiones en los países del grupo donante se pueden acreditar al objetivo de reducción de los países comprometidos con el PK. Por lo tanto, también las emisiones de los países del grupo donante pueden verse influenciadas por el PK, aunque no enfrentan ninguna obligación de reducción directa.

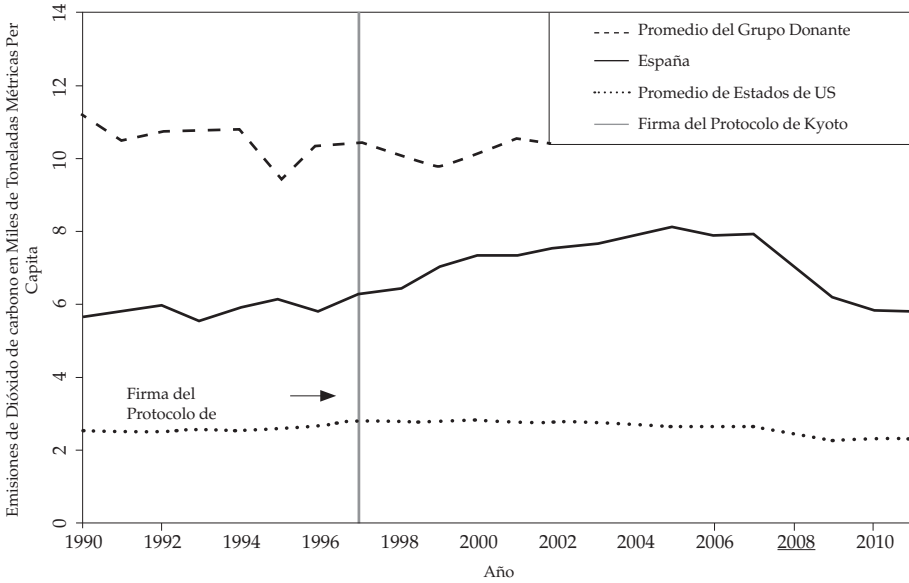


Figura 1. Desarrollo de emisiones promedio de CO₂ para países del grupo donante, España y estados de Estados Unidos

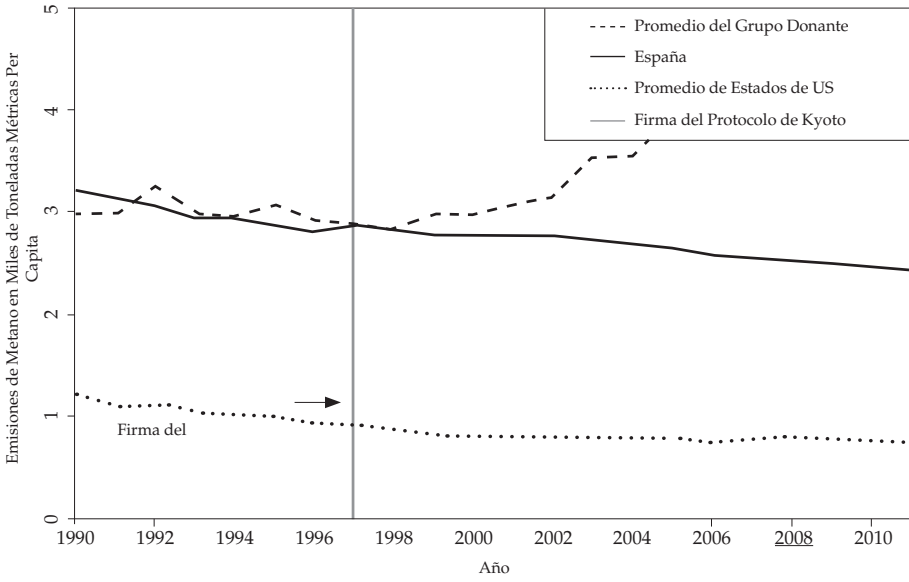


Figura 2. Desarrollo de emisiones promedio de CH₄ para países del grupo donante, España y estados de Estados Unidos

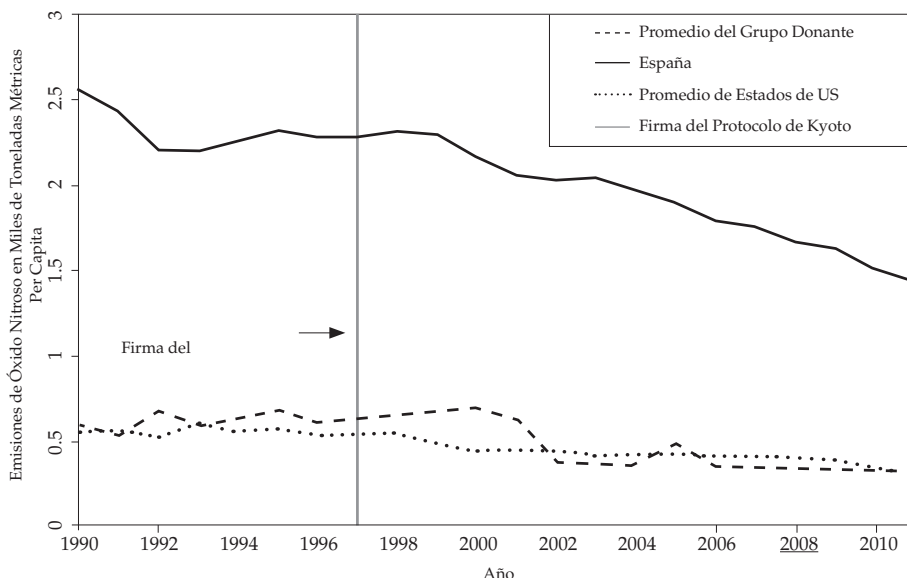


Figura 3. Desarrollo de emisiones promedio de N_2O para países del grupo donante, España y estados de Estados Unidos

Con el fin de eludir los problemas asociados para estimar las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O contrafactuales para España, con el uso de países del primer grupo donante como grupo de control, también se utilizaron los datos a nivel estatal de Estados Unidos, en una especificación alternativa. Los estados de Estados Unidos no reciben tratamiento, ya que dicho país no ratificó el PK y, por lo tanto, nunca tuvo obligaciones vinculantes en virtud del PK. Los datos de estados de Estados Unidos vienen con varias ventajas clave: primero, las diferencias en las tendencias entre las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O de los estados de Estados Unidos y del primer grupo donante son bastante moderadas, como se muestra en las figuras 1, 2 y 3. En segundo lugar, como los estados de Estados Unidos claramente pertenecen al mundo industrializado, las diferencias en otras características clave del país son más moderadas, aunque significativas (ver Apéndices). Finalmente, como Estados Unidos no ratificó el PK, tampoco forma parte de ninguno de los mecanismos de flexibilidad.

2. Modelamiento econométrico

En el contexto de este documento, es decir, un estudio comparativo en el cual se posee una muestra pequeña con intervenciones a nivel agregado (países

y estados), es una complicación fundamental encontrar controles adecuados que no hayan sido afectados por la intervención y que posean características similares a las de la unidad intervenida (Abadie *et al.*, 2010; Collier, 1993; Lijphart, 1971; Sánchez, 2017).

Ante esta limitación surge la necesidad de utilizar el método de control sintético (mcs), el cual posee la fortaleza de que, en lugar de utilizar una sola unidad de control, se utiliza un promedio ponderado de un conjunto de unidades de control potencial para proporcionar una unidad de control sintética que se asemeje a la unidad afectada en términos predictores. Se empleó el mcs para construir una unidad de control sintética para España representando las cifras esperadas de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en un escenario en el que no suscribió compromisos vinculantes con el *PK*. De aquí en adelante esta unidad de control se referirá como 'España sintética'.

El análisis empírico se basa en datos anuales a nivel país y estado para el período 1970-2011.⁸ Como el análisis toma fechas de inicio de intervención en los años 1997, 2002 y 2004, esto produce períodos de preintervención de 27, 32 y 34 años, respectivamente. En este sentido, para los dos grupos donantes, se divide el período previo de tratamiento a un período de formación de 1970 a 1997 y un período de validación de 1998 a 2011, así también con la misma lógica subyacente para los otros períodos de inicio de intervención previamente definidos. El grupo de donantes incluye los siguientes países: Arabia Saudita, Brunei Darussalam, Canadá, Chipre, Corea del Sur, Estados Unidos, Macao, Malta, Singapur y Trinidad y Tobago. A partir de la selección de países comprometidos y relacionados con el *PK*, se limitaron los países del grupo donante a países considerados de ingreso alto según el método Atlas, lo anterior tratando de reducir las posibilidades de estimar un control sintético de España a partir de países con poca o ninguna similitud en términos de ingreso *per capita*, cuyo rol en la formulación del control sintético de España es de alto poder predictivo debido a la específica selección de variables predictoras. Las variables utilizadas en el análisis se enumeran en el apéndice de datos junto con descripciones y fuentes de datos. Las variables de resultado de interés, CO₂, CH₄ y N₂O, son las emisiones medidas en miles de toneladas métricas *per capita* de España en el tiempo *t*.

8 La especificación utilizada para el grupo donante conformado por estados de Estados Unidos consta de información entre los años 1990-2011, cuyos datos y hallazgos son presentados en la sección de Apéndices.

2.1. El método de control sintético

Como se expuso previamente, el diseño de esta investigación necesita de la utilización del mcs, el cual puede equilibrar las unidades y controles tratados con respecto al desarrollo previo al tratamiento de las propias emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, y también con respecto a predictores importantes de selección en el tratamiento, es decir, ser parte del mundo industrializado.

Así también, el mcs permite estimar la ruta de emisiones contrafactuales para España cada año después de la firma del PK. Por lo tanto, no solo se obtiene un efecto promedio para España en todos los períodos de tiempo bajo investigación, sino que también se pueden identificar desarrollos y características específicas de España. Por lo tanto, se pueden determinar efectos de tratamiento potencialmente heterogéneos que pueden ser, por ejemplo, el resultado de objetivos muy heterogéneos. En tercer lugar, y lo más importante, el enfoque de diferencias en diferencias estándar se enfrenta a un desafío adicional al analizar los resultados contrafactuales. Por un lado, el nivel de emisiones de GEI de un país depende de varios factores socioeconómicos que deben controlarse en un análisis de regresión para evitar un sesgo variable omitida. Por otro lado, casi todos estos factores también pueden estar influenciados por el tratamiento y, por lo tanto, constituyen malos controles, de acuerdo con la definición de Angrist y Pischke (2009). En contraste con el enfoque de diferencias en diferencias, el mcs es flexible en el sentido de que uno puede controlar estos factores usando solo información previa al tratamiento. Como consecuencia, la situación hipotética resultante tendrá en cuenta las importantes características socioeconómicas previas al tratamiento de los países que son independientes del tratamiento.

Suponga que hay $J + 1$ países donde $J = 1$ denota el país tratado (en nuestro caso sería España) y $j = 2, \dots, J + 1$ son todos países no tratados o estados de Estados Unidos en el grupo de donantes. Además, se define a T_0 como el momento del tratamiento. Para España, se poseen datos sobre la trayectoria real de emisión (Y_{1t}), pero se desconocen las emisiones contrafactuales que se habrían producido si España no hubiera estado sujeta al tratamiento (Y_{1t}^N para $t > T_0$). Por lo tanto, se tiene que encontrar una estimación de Y_{1t}^N para obtener una estimación del efecto del tratamiento α_{it} :

$$\alpha_{it} = Y_{1t} - Y_{1t}^N \quad (1)$$

Abadie y Gardeazabal (2003), Abadie *et al.* (2010) y Abadie *et al.* (2015) proponen hacer uso de las características observadas de los países en el grupo

de donantes. La idea subyacente es encontrar pesos $W = (w_2, \dots, w_{j+1})'$, con $w_j \geq 0$ para $j = 2, \dots, J + 1$ y $\sum_{j=2}^{J+1} w_j = 1$, de modo que el promedio ponderado de todos los países del grupo de donantes se asemeja al país tratado (España) con respecto a las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O en el período previo a la intervención y todos los demás aspectos relevantes (Z).

Formalmente, se busca W tal que:

$$\sum_{j=2}^{J+1} w_j^* Y_{jt} = Y_{1t} \text{ for all } \sum_{j=2}^{J+1} w_j^* Z_j = Z_1 \quad (2)$$

Entonces $\sum_{j=2}^{J+1} w_j^* Y_{jt}$ para $t \geq T_0$ es una estimación para las emisiones contrafactuales no observadas de Y_{1t}^N que induce a una estimación del efecto del tratamiento:

$$\hat{\alpha}_{1t} = Y_{1t} - \sum_{j=2}^{J+1} w_j^* Y_{jt}, t \geq T_0 \quad (3)$$

En general, un vector W tal que las ecuaciones (2) pueden no existir (en particular, si existen diferencias estructurales entre España y los controles). Sin embargo, se pueden elegir los pesos tales como:

$$\min_W (X_1 - X_0 W)' V (X_1 - X_0 W) \quad (4)$$

donde X_1 denota un vector de $k \times 1$ características previas a la intervención del país tratado, que puede incluir el camino de emisión anterior a la intervención, y X_0 denota una matriz ($k \times j$) de las mismas variables para los países j en el grupo de donantes (Abadie *et al.*, 2015, 2010; Abadie y Gardeazabal, 2003). La matriz definida simétrica y positiva V pondera la importancia relativa de las diversas características incluidas en X . Obviamente, los pesos óptimos X dependen de la matriz de ponderación V . Para las estimaciones se sigue lo propuesto por Abadie *et al.* (2010) al elegir V usando un método basado en la regresión y pesos iguales.

En otras palabras, se usa el mcs para crear a España sintética a través de una combinación convexa de todas las unidades del grupo de donantes. El conjunto de predictores incluye variables tales como PIB *per capita*, crecimiento económico, crecimiento poblacional, urbanización y uso de tierra agrícola. Al hacerlo, se supone que estas variables no se verán afectadas por el tratamiento y, por lo tanto, no constituyen malos controles en el sentido de Angrist

y Pischke (2009). Desafortunadamente, varias de las variables enumeradas anteriormente no están disponibles para los estados de Estados Unidos.

Como el MCS no proporciona errores estándar clásicos para realizar inferencia estadística, Abadie *et al.* (2015, 2010) y Abadie y Gardeazabal (2003) sugieren realizar pruebas de placebo o de permutación. La idea subyacente es estimar las trayectorias de emisión contrafactuales para las entidades regionales en el conjunto de donantes, es decir, para las regiones sin ningún tratamiento. En un mundo ideal en el que existiese el análogo perfecto del país 'tratado' disponible en el conjunto de donantes, no se encontrarían efectos de tratamiento para todos los países del grupo de donantes y todos los años posteriores al tratamiento. Sin embargo, en la práctica siempre se encontrarán efectos del tratamiento con placebo al menos en cierta medida. Como consecuencia, solo se considera que el efecto real del tratamiento es estadísticamente significativo si es significativamente mayor que los efectos del tratamiento con placebo. Este enfoque de inferencia se basa en lo propuesto por Abadie *et al.* (2015), con lo cual se utilizan las pruebas de robustez 'dejando uno fuera', para con esto conocer la fortaleza de las estimaciones sintéticas resultantes.

3. Resultados

3.1. Construcción de España sintética

Como se mostró en las figuras 1, 2 y 3, durante todo el período anterior al tratamiento, existen notables diferencias en las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O de España y el promedio del grupo donante. Sin embargo, como se muestra en la siguiente sección, resulta que el MCS puede reproducir muy de cerca las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O de España durante un largo período de tiempo antes de las sanciones.

3.2. El efecto de la firma del PK

La tabla 1 proporciona la lista de los países donantes y la participación de cada uno en la construcción de España sintética. En el caso de las emisiones de CO_2 , el mejor contrafactual de España es un promedio ponderado de Arabia Saudita, Chipre, Macao, Malta, Singapur y Estados Unidos. La proporción de otros países en el grupo es cero o muy pequeña. Chipre tiene el peso más alto, seguido de Malta. Para el caso de las emisiones de CH_4 , el mejor contrafactual de España es un promedio ponderado de Arabia Saudita, Singapur y Trinidad y Tobago; mientras que para las emisiones de N_2O el mejor contrafactual de

España es un promedio ponderado de Arabia Saudita, Brunei Darussalam, Macao, Malta, Singapur y Trinidad y Tobago.

Tabla 1. Países del grupo donante y ponderación de cada uno en la construcción de España sintética para emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O

País	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	Peso	Peso	Peso
Arabia Saudita	0,051	0,149	0,010
Brunei Darussalam	0,000	0,000	0,067
Canadá	0,000	0,000	0,000
Chipre	0,375	0,000	0,000
Corea del Sur	0,000	0,000	0,000
Estados Unidos	0,000	0,000	0,000
Macao	0,206	0,000	0,054
Malta	0,254	0,000	0,030
Singapur	0,041	0,305	0,050
Trinidad y Tobago	0,073	0,546	0,788

La tabla 2 compara el ajuste previo a la sanción de España sintética y un promedio ponderado de la población de los países del grupo de donantes.

Tabla 2. Medias predictoras de emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O antes del tratamiento

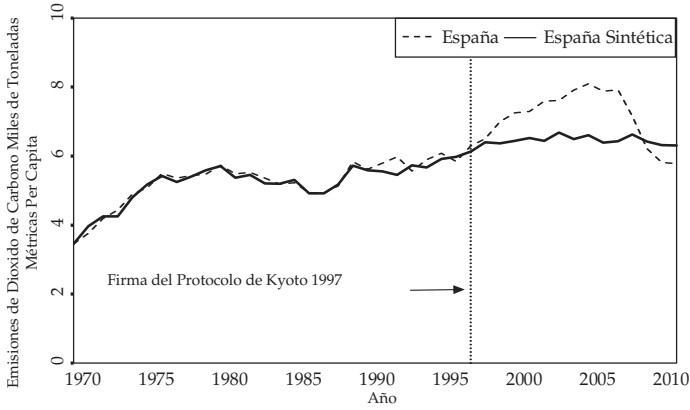
Predictores	CO ₂		
	España	España sintética	Grupo donante
PIB per capita	18872,13	18809,14	22270,82
Crecimiento económico	2,986953	2,986412	5,134948
Crecimiento poblacional	0,653102	0,649804	1,666502
Urbanización	68,69259	68,81264	71,57753
Uso de tierra agrícola	17,89593	17,88131	22,13008
Predictores	CH ₄		
	España	España sintética	Grupo donante
PIB per capita	18872,13	18870,44	22270,82
Crecimiento económico	2,986953	2,694536	5,134948
Crecimiento poblacional	0,653102	0,661426	1,666502
Urbanización	68,69259	69,01659	71,57753
Uso de tierra agrícola	17,89593	17,69474	22,13008

Predictores	N ₂ O		
	España	España sintética	Grupo donante
PIB <i>per capita</i>	18872,13	18872,01	22270,82
Crecimiento económico	2,986953	2,965623	5,134948
Crecimiento poblacional	0,653102	0,651300	1,666502
Urbanización	68,69259	68,68812	71,57753
Uso de tierra agrícola	17,89593	17,89532	22,13008

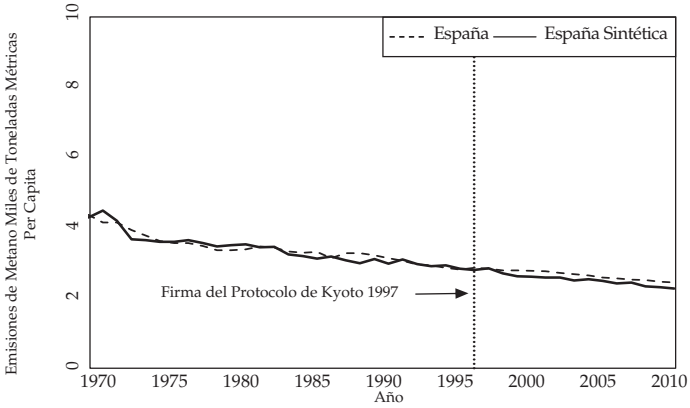
Se observa que el promedio del grupo no muestra similitudes con España en términos de predictores previos a la sanción, sin embargo, la estimación de España sintética proporciona medias mucho más cercanas a la España actual. En general, la tabla 2 sugiere que España sintética proporciona una mejor comparación que el promedio ponderado de la población del conjunto.

La parte superior de la figura 4 muestra las trayectorias de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O de España y España sintética entre el período desde el año 1970 hasta el año 2011. España sintética es una estimación similar a las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O de España durante el período previo a la firma del PK. La estimación del efecto de la firma del PK en 1997 es la diferencia entre las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O de España y España sintética del período 1997-2011. La discrepancia entre los dos después de 1997 sugiere un gran efecto negativo de la firma del PK sobre las emisiones de CO₂ de España, mientras que para las emisiones de CH₄ y N₂O no representa efecto alguno. Para ejemplificar desde otra perspectiva la relación anterior, la parte inferior de la figura 4 muestra gráficas de las brechas, que también representan anualmente el efecto de la firma del PK en las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O. Las gráficas de las brechas proporcionan el valor exacto de las brechas entre las trayectorias de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O ilustradas en la parte superior de la figura 4. En el caso de las emisiones de CO₂, ambas cifras revelan que mientras las emisiones de CO₂ de España sintética se mantienen estables, las emisiones de CO₂ de la España actual se incrementan notablemente después de 1997 con la brecha entre los dos creciendo en magnitud. Las emisiones de CO₂ de España en 2010 fueron de 5,82 miles de toneladas métricas *per capita*, que se estiman en 0,50 miles de toneladas métricas *per capita* menos del valor que hubiera tenido si no hubiera existido la firma del PK en el año 1997. No obstante, en el período comprendido entre los años 1997-2008 las emisiones de España son superiores a las de España sintética.

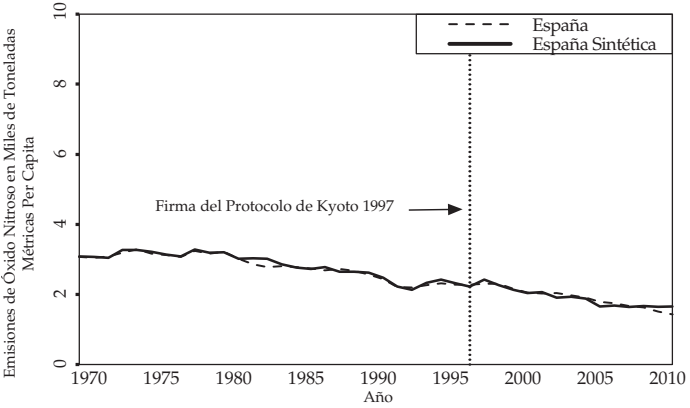
Emisiones de CO2: España vs. España sintética



Emisiones de CH4: España vs. España sintética



Emisiones de N2O: España vs. España sintética



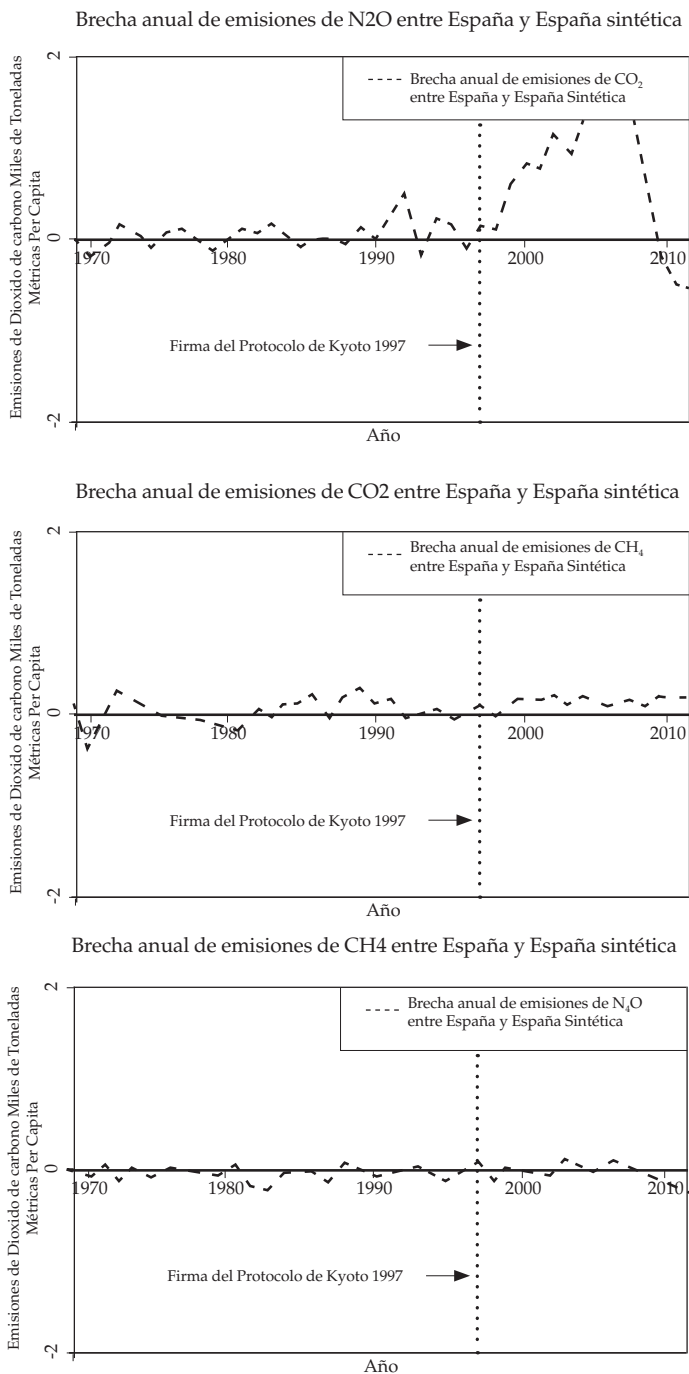


Figura 4. Trayectorias de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O de España versus España sintética

Tabla 3. Estimaciones de diferencias en diferencias (DD) para el efecto del tratamiento en las diferentes fechas

Especificación	Emisiones de CO ₂	Emisiones de CH ₄	Emisiones de N ₂ O
Panel A. Diferencias promedio relativas al control sintético			
Pretratamiento (firma del PK)	0,000	0,000	0,000
Postratamiento (firma del PK)	-0,007	-0,014	-0,003
Pretratamiento (adopción del PK)	0,000	0,000	0,000
Postratamiento (adopción del PK)	-0,006	-0,013	-0,002
Pretratamiento (ratificación del PK)	0,000	0,000	0,000
Postratamiento (ratificación del PK)	-0,004	-0,016	-0,003
Panel B. Firma del PK			
Diferencia pos-pre	-0,197	-0,001	-0,001
Valor <i>p</i> equivalente (prueba de una cola)	0,087	0,043	0,023
Panel C. Adopción del PK			
Diferencia pos-pre	-0,004	-0,007	-0,002
Valor <i>p</i> equivalente (prueba de una cola)	0,015	0,013	0,033
Panel D. Ratificación del PK			
Diferencia pos-pre	0,001	-0,001	0,001
Valor <i>p</i> equivalente (prueba de una cola)	0,061	0,054	0,050

Para medir el efecto del PK en su firma, adopción y ratificación, se empleó el enfoque de diferencias en diferencias. Las tendencias que muestra la figura 4 son similares antes de la firma del PK, pero las diferencias después de la firma del PK son distintas únicamente en el caso de las emisiones de CO₂. La tabla 3 presenta las estimaciones correspondientes. Se muestran las diferencias entre España y el control sintético en las tres fechas de análisis. No hay diferencias significativas en el período de pretratamiento. Por otro lado, las diferencias en el período posterior al tratamiento (firma del PK) entre el año 1997 y 2011 son de 0,7, 1,4 y 0,3 puntos porcentuales respectivamente para las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O.

El panel B de la tabla 3 muestra las estimaciones de diferencias en diferencias para el período posterior al tratamiento en el cual se empleó la firma del PK como período de tratamiento. Debido a que las diferencias en el período de pretratamiento son relativamente pequeñas, estas estimaciones son muy similares a las estimaciones de diferencias simples. En el caso de las emisiones postratamiento, para el caso de las emisiones de CO₂, se evidencia una

reducción de alrededor de 19,7 puntos porcentuales. La aplicación de la prueba de permutación produce un valor p de una cola de 0,087. Para las emisiones de CH_4 , la reducción estimada es de alrededor del 0,1 %, con un valor p de una cola de 0,043. Consecuentemente en el escenario de las emisiones de N_2O se evidencia una reducción del 0,1 %. Las estimaciones para las otras fechas de estudio muestran poseer efectos más pequeños, pero en igual sentido a la de las estimaciones a partir de la firma del PK como período de intervención.

3.3. Pruebas de robustez

En esta sección, se presenta una verificación de robustez para probar la sensibilidad de los principales resultados a los cambios en los pesos de los países donantes, W^* . Se recuerda de la tabla 1 que, para las emisiones de CO_2 , España sintética se estima como un promedio ponderado de Arabia Saudita, Chipre, Macao, Malta, Singapur y Estados Unidos. En el caso de las emisiones de CH_4 , se estima como un promedio ponderado de Arabia Saudita, Singapur y Trinidad y Tobago, mientras que para las emisiones de N_2O se estima como un promedio ponderado de Arabia Saudita, Brunei Darussalam, Macao, Malta, Singapur y Trinidad y Tobago.

Aquí se reestima iterativamente el modelo base para construir una España sintética omitiendo en cada iteración uno de los países que recibieron un peso positivo en la tabla 1.⁹ Excluyendo países que recibieron un peso positivo, se sacrifica alguna bondad de ajuste, pero este control de sensibilidad permite evaluar en qué medida los resultados son impulsados por un país de control en particular.

La figura 5 da cuenta de los resultados y reproduce la figura 4 al tiempo que incorpora las estimaciones de las pruebas de robustez. Estas figuras muestran que los resultados del análisis anterior son bastante robustos a la exclusión de cualquier país en particular de nuestra muestra de países de comparación. El control sintético 'dejando uno fuera', que muestra el efecto más pequeño de la reunificación, es el de Trinidad y Tobago en el caso de las emisiones de CO_2 . Incluso esta estimación es bastante amplia en términos sustantivos: las emisiones de CO_2 durante el período 1997-2011 se reducen en alrededor

9 Precisamente, para $J = 5,4,3,2,1$ (J dependiendo del tipo de variable dependiente) y para todas las combinaciones posibles de países de control, se eligió el que produce la unidad de control sintética que minimiza la pérdida definida en la ecuación (4). Para reducir la complejidad computacional, se utilizaron los pesos W^* obtenidos para el modelo de referencia en lugar de intentar recalcular estos pesos para las diferentes combinaciones de j países. Además, se consideraron todas las combinaciones posibles de países entre los 37 del grupo de donantes, y puede no ser necesariamente el caso para otras aplicaciones.

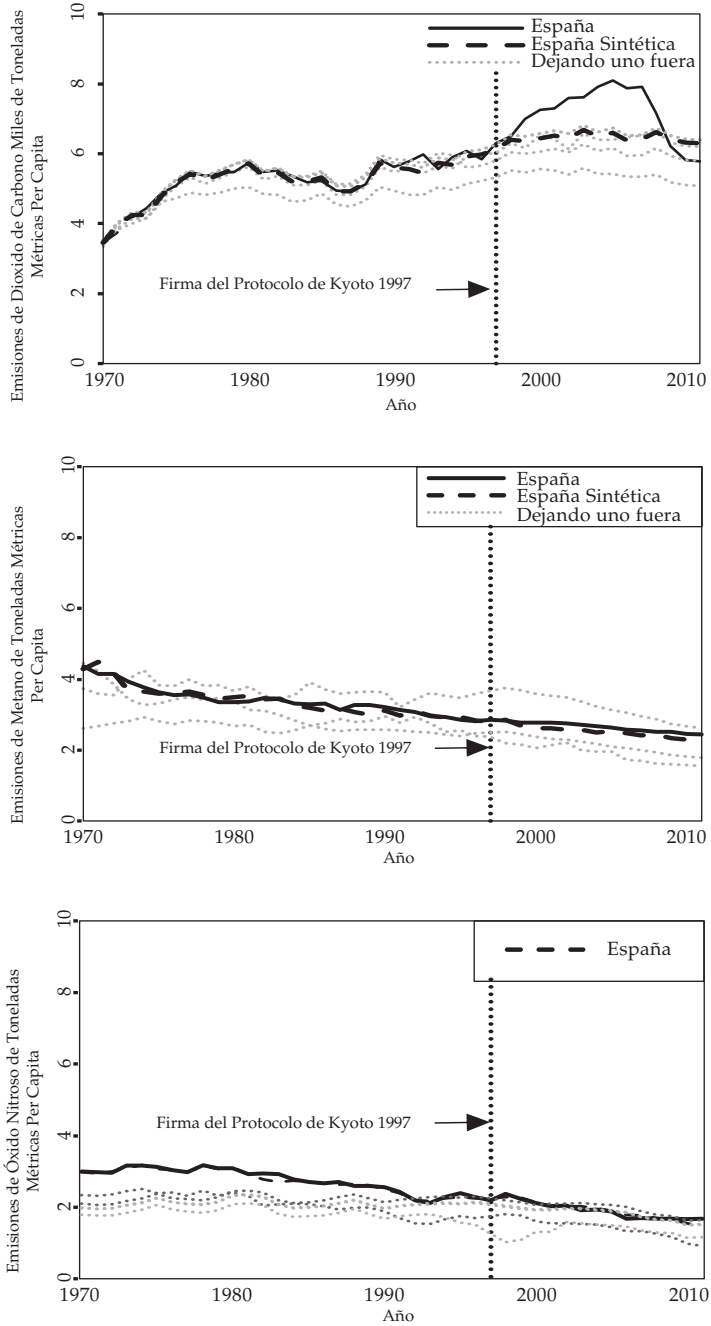


Figura 5. Distribución 'dejando uno fuera' del control sintético para las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O de España

de 0,04 millones de toneladas métricas *per capita* por año en promedio, aproximadamente el 1% del nivel de referencia de 1990. En 2005, se estima que las emisiones de CO₂ en esta España sintética son aproximadamente un 4% menores que en la España actual. Los otros controles sintéticos ‘dejando uno fuera’ exponen un efecto muy similar o ligeramente mayor en comparación con los resultados del análisis anterior. Las estimaciones sintéticas para las emisiones de CH₄ y NO₂ también son las más cercanas a los datos reales de España, no obstante, son muy cercanas y no hay diferencias significativas que permitan inferir sobre el efecto de la firma del PK.

4. Discusión

En este documento se analiza la efectividad del PK con respecto a su objetivo principal, la reducción de las emisiones domésticas de GEI en España, sin embargo, debido a limitaciones de información el análisis se centra en las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O. En las dos especificaciones principales como en los diversos controles de robustez que se realizaron, no se encontró un efecto de reducción de emisiones significativo y persistente en España. Al mismo tiempo, se halló cierta evidencia de que las emisiones de CO₂ reales de España tienen resultados incluso peores que los generados por España sintética. En promedio, las emisiones de CO₂ de España están bastante por encima de su control sintético para el período posterior al tratamiento. Esto contrasta con tres estudios empíricos recientes (Aichele y Felbermayr, 2013, 2012; Grunewald y Martínez-Zarzoso, 2016) que encuentran, en promedio, reducciones sustanciales (7-10%) y significativas de emisiones de CO₂ atribuibles a la adopción de uniones objetivos de emisión bajo el PK. Las estimaciones de CH₄ y N₂O arrojan resultados iguales para la estimación sintética en comparación con las emisiones reales.

Los resultados resaltan la importancia de abordar una serie de desafíos empíricos al estimar el efecto de las políticas ambientales internacionales en general, y el PK en particular. La clave para identificar el efecto del tratamiento ‘verdadero’ es la disponibilidad y la selección de controles apropiados. Para hacerlo, la estrategia empírica difiere de los estudios previos en tres aspectos importantes.

Primero, se empleó el mcs (Abadie et al., 2015, 2010; Abadie y Gardeazabal, 2003), el cual permite construir trayectorias de emisiones contrafactuales para España que coinciden razonablemente con las emisiones observadas en el período de pretratamiento. Esto es posible porque los efectos del tratamiento se pueden estimar individualmente para España, lo que permite identificar a

España sintética contrafactual según sus idiosincrasias, como las diferentes características, trayectorias de emisiones, objetivos y fechas de ratificación.

Segundo, el uso de datos de países donantes para construir trayectorias contrafactuales de emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O para España puede ser problemático debido a i) diferencias estructurales irreconciliables entre países del grupo donante, incluyendo trayectorias de emisiones previas al tratamiento, y ii) un sesgo resultante del uso de mecanismos de flexibilidad que difumina la distinción entre ser un país tratado y no serlo. Para eludir estos problemas, se ejecutó una segunda especificación utilizando datos a nivel de estado de Estados Unidos para construir el contrafactual sintético de España. Aunque la información a nivel estatal de Estados Unidos tiene la desventaja de que no se dispone de datos sobre algunas covariables, así como de la totalidad del período de análisis definido para el estudio, sirve como un control de robustez de las trayectorias de las emisiones contrafactuales.

Los resultados tienen fuertes implicaciones políticas. A pesar de la experiencia persistente de negociaciones fallidas sobre un sucesor del PK durante casi una década, la comunidad internacional parece insistir en un tratado similar al PK pero que también incluye objetivos vinculantes de reducción de emisiones. La evidencia empírica reciente parece apoyar este enfoque, ya que estos estudios encuentran que, al menos en promedio, los objetivos de emisiones vinculantes bajo el PK indujeron un efecto de reducción de CO₂ considerable (7-10%) y estadísticamente significativo. De acuerdo con nuestros resultados, el PK no tuvo un efecto verificable sobre las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O para España. Como consecuencia, no se posee una conducta optimista de que un sucesor potencial del PK basado en los mismos principios, incluso si se adoptara en primer lugar, tuviera un efecto discernible sobre la reducción de las emisiones globales de GEI. De hecho, los acuerdos multilaterales o más pequeños de reducción de emisiones multilaterales, donde el compromiso es lo mejor para todos los países participantes, pueden lograr más (Almer y Winkler, 2017).

Conclusión

El Protocolo de Kioto (PK) ha sido ampliamente criticado por la prensa pública y la comunidad científica por igual. En particular, se han planteado cuestiones relativas a la equidad, la eficiencia y la rentabilidad. En este documento, se cuestiona en qué cantidad el PK cumplió con su objetivo principal, la reducción de las emisiones domésticas de GEI en el mundo industrializado. Para responder a esta pregunta, se analizó el desarrollo de las emisiones de CO₂,

CH₄ y N₂O para España en virtud del PK, mediante el empleo del método de control sintético (MCS). Se encontró muy poca evidencia de un efecto de reducción de emisiones significativo para España, es decir, España no emitió menos CH₄ y N₂O durante el período 1998-2011 de lo que hubiera emitido si no estuviera sujeta a los objetivos de emisión de GEI bajo el PK; no obstante, para el caso de las emisiones de CO₂, hubiese sido más amigable con el medio ambiente no tener relación alguna con el PK.

De manera más general, se sostiene que los desafíos empíricos que se enfrentaron en el presente documento se aplican a muchas políticas ambientales internacionales que solo pueden evaluarse a nivel de país, para así tener una hipótesis correcta del impacto neto del efecto de una política de afectación a nivel macro. Los países tienden a ser muy heterogéneos con diferencias significativas en sus características socioeconómicas y políticas. Como resultado, hay numerosos problemas que deben abordarse, como se discutió en las secciones anteriores. La contabilidad de todos estos desafíos al mismo tiempo puede ser difícil cuando se utiliza el análisis de datos de panel estándar. Por ejemplo, en muchos casos uno tiene que tratar la selección no aleatoria en el tratamiento, una violación de la suposición de tendencia común y la presencia de malos controles entre las covariables importantes. El MCS puede ser más adecuado para abordar estos desafíos que los enfoques de datos de panel estándar.

Con base en este análisis, se deben identificar e implementar medidas específicas para atentamente considerar los fallos del compromiso con el PK en España y promover políticas efectivas para la mitigación de gases. Tales medidas deberían considerar las áreas más urgentes a nivel nacional y regional.

Referencias

- Abadie, A., Diamond, A., & Hainmueller, J. (2015). Comparative politics and the synthetic control method. *American Journal of Political Science*, 59, 495-510. doi: 10.1111/ajps.12116
- Abadie, A., Diamond, A., & Hainmueller, J. (2011). Synt: an R package for synthetic control methods in comparative case studies. *Journal of Statistical Software*, 42, 1-17. doi: 10.18637/jss.v042.i13
- Abadie, A., Diamond, A., & Hainmueller, J. (2010). Synthetic control methods for comparative case studies: estimating the effect of California's Tobacco Control Program. *Journal of the American Statistical Association*, 105, 493-505. doi: 10.1198/jasa.2009.ap08746

- Abadie, A., & Gardeazabal, J. (2003). The economic costs of conflict: a case study of the Basque Country. *American Economic Review*, 93, 113-132. doi: 10.1257/000282803321455188
- Aichele, R., & Felbermayr, G. (2013). The effect of the Kyoto Protocol on carbon emissions. *Journal of Policy Analysis and Management*, 32, 731-757. doi: 10.1002/pam.21720
- Aichele, R., & Felbermayr, G. (2012). Kyoto and the carbon footprint of nations. *Journal of Environmental Economics and Management*, 63, 336-354. doi: 10.1016/J.JEEM.2011.10.005
- Almer, C., & Winkler, R. (2017). Analyzing the effectiveness of international environmental policies: the case of the Kyoto Protocol. *Journal of Environmental Economics and Management*, 82, 125-151. doi: 10.1016/J.JEEM.2016.11.003
- Angrist, J.D., & Pischke, J.-S. (2009). *Mostly harmless econometrics: an empiricist's companion*. Princeton University Press.
- Barrett, S. (1998). Political economy of the Kyoto Protocol. *Oxford Review of Economic Polic*, 14, 20-39.
- Collier, D. (1993). *The comparative method*. American Political Science Association.
- Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2005). Free trade and global warming: a trade theory view of the Kyoto Protocol. *Journal of Environmental Economics and Management*, 49, 205-234. doi: 10.1016/J.JEEM.2004.04.006
- Finus, M. (2008). Game theoretic research on the design of international environmental agreements: insights, critical remarks, and future challenges. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 2, 29-67. doi: 10.1561/101.00000011
- Gallo, C., Faccilongo, N., & La Sala, P. (2017). Clustering analysis of environmental emissions: a study on Kyoto Protocol's impact on member countries. *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.07.194
- Grubb, M. (2016). Full legal compliance with the Kyoto Protocol's first commitment period. Some lessons. *Climate Policy*, 16, 673-681. doi: 10.1080/14693062.2016.1194005
- Grunewald, N., & Martínez-Zarzoso, I. (2016). Did the Kyoto Protocol fail? An evaluation of the effect of the Kyoto Protocol on CO₂ emissions. *Environment and Development Economics*, 21, 1-22. doi: 10.1017/S1355770X15000091
- Gupta, A. (2016). Climate change and Kyoto Protocol. En *Handbook of environmental and sustainable finance* (pp. 3-23). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-803615-0.00001-7
- Howard, A., Chagas, T., Hoogzaad, J., & Hoch, S. (2017). *Features and implications of NDCs for carbon markets*. Amsterdam.

- Klein, N. (2015). *This changes everything: capitalism vs. the climate*. Simon and Schuster.
- Kuriyama, A., & Abe, N. (2018). Ex-post assessment of the Kyoto Protocol —quantification of CO₂ mitigation impact in both annex B and non-annex B countries—. *Applied Energy*, 220, 286-295. doi: 10.1016/J.APE-ENERGY.2018.03.025
- Lau, L. C., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2012). Global warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto Protocol to the Copenhagen Accord. A comment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5280-5284. doi: 10.1016/J.RSER.2012.04.006
- Lijphart, A. (1971). Comparative politics and the comparative method. *American Political Science Review*, 65, 682-693. doi: 10.2307/1955513
- MAPAMA. (2018). *Inventario nacional de emisiones a la atmósfera*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Informe de resumen.
- Nieto, J., & Santamarta, J. (2004). El Protocolo de Kioto en España. *World Watch*, 20-22.
- Prins, G., & Rayner, S. (2007). Time to ditch Kyoto. *Nature*, 449, 973-975. doi: 10.1038/449973a
- Rosado-Anastacio, J. A. (2018). The environmental Kuznets curve hypothesis for CH₄ emissions: evidence from ARDL bounds testing approach in Argentina. *Latin American J. of Management for Sustainable Development*, 4, 1. doi: 10.1504/LAJMSD.2018.091312
- Sánchez, G. (2017). The short-term response of the Hispanic noncitizen population to anti-illegal immigration legislation. The case of Arizona sb 1070. *Journal of Economics, Finance and Administrative Science*, 22, 25-36. doi: 10.1108/JEFAS-02-2017-0034
- Shishlov, I., Morel, R., & Bellassen, V. (2016). Compliance of the parties to the Kyoto Protocol in the first commitment period. *Climate Policy*, 16, 768-782. doi: 10.1080/14693062.2016.1164658
- (December 11, 1997). Global warming. Rubbing sleep from their eyes. *The Economist (us ed.)*.
- UNFCCC. (2004). Cuidar el clima: guía de la Convención Marco sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto. *Servicios de Información de la Secretaría de la UNFCCC*, 13-14.
- Zhang, J., & Wang, C. (2011). Co-benefits and additionality of the clean development mechanism: an empirical analysis. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62, 140-154. doi: 10.1016/J.JEEM.2011.03.003

A. Apéndices

A.1. Datos

Las fuentes de datos empleadas para la aplicación son las siguientes:

- Emisiones de CO₂ (toneladas métricas *per capita*). Fuente: Centro de Análisis de Información de Dióxido de Carbono, División de Ciencias Ambientales, Laboratorio Nacional Oak Ridge (Tennessee, Estados Unidos). Los datos para los estados de Estados Unidos se obtuvieron de los Datos Estatales de Emisiones de Dióxido de Carbono - Administración de Información Energética - EIA - Estadísticas Oficiales de Energía del Gobierno de Estados Unidos.
- Emisiones de CH₄ (toneladas métricas *per capita*). Fuente: Comisión Europea, Centro Común de Investigación (CCI)/Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos (PBL). Base de datos de emisiones para la investigación atmosférica global (Edgar). Los datos para los estados de Estados Unidos se obtuvieron de los Datos Estatales de Emisiones de Dióxido de Carbono - Administración de Información Energética - EIA - Estadísticas Oficiales de Energía del Gobierno de Estados Unidos.
- Emisiones de N₂O (toneladas métricas de CO₂ equivalente). Fuente: Comisión Europea, Centro Común de Investigación (CCI)/Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos (PBL). Base de datos de emisiones para la investigación atmosférica global (Edgar). Los datos para los estados de Estados Unidos se obtuvieron de los Datos Estatales de Emisiones de Dióxido de Carbono - Administración de Información Energética - EIA - Estadísticas Oficiales de Energía del Gobierno de Estados Unidos.
- PIB (US\$ constantes de 2010). Fuente: datos de las cuentas nacionales del Banco Mundial y archivos de datos de las cuentas nacionales de la OCDE. Los datos para los estados de Estados Unidos se obtuvieron de la Oficina de Análisis Económico de Estados Unidos (BEA) y se convirtieron utilizando factores de conversión monetaria PPP (recuperados de la base de datos de salud de la OCDE).
- Crecimiento del PIB (% anual). Fuente: datos de las cuentas nacionales del Banco Mundial y archivos de datos de las cuentas nacionales de la OCDE. Los datos para los estados de Estados Unidos se obtuvieron de la Oficina de Análisis Económico de Estados Unidos (BEA).
- Tierra agrícola (% de la superficie terrestre). Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

- Población urbana (% del total). Fuente: perspectivas de urbanización mundial de la División de Población de las Naciones Unidas.

A.2. El efecto de la adopción del PK

A partir del grupo donante conformado por países.

Tabla 4. Países del grupo donante y ponderación de cada uno en la construcción de España sintética para emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O

País	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	Peso	Peso	Peso
Arabia Saudita	0,049	0,163	0,009
Brunei Darussalam	0,000	0,000	0,071
Canadá	0,000	0,000	0,000
Chipre	0,364	0,000	0,000
Corea del Sur	0,000	0,000	0,000
Estados Unidos	0,000	0,000	0,000
Macao	0,198	0,000	0,051
Malta	0,268	0,000	0,028
Singapur	0,039	0,335	0,049
Trinidad y Tobago	0,082	0,502	0,792

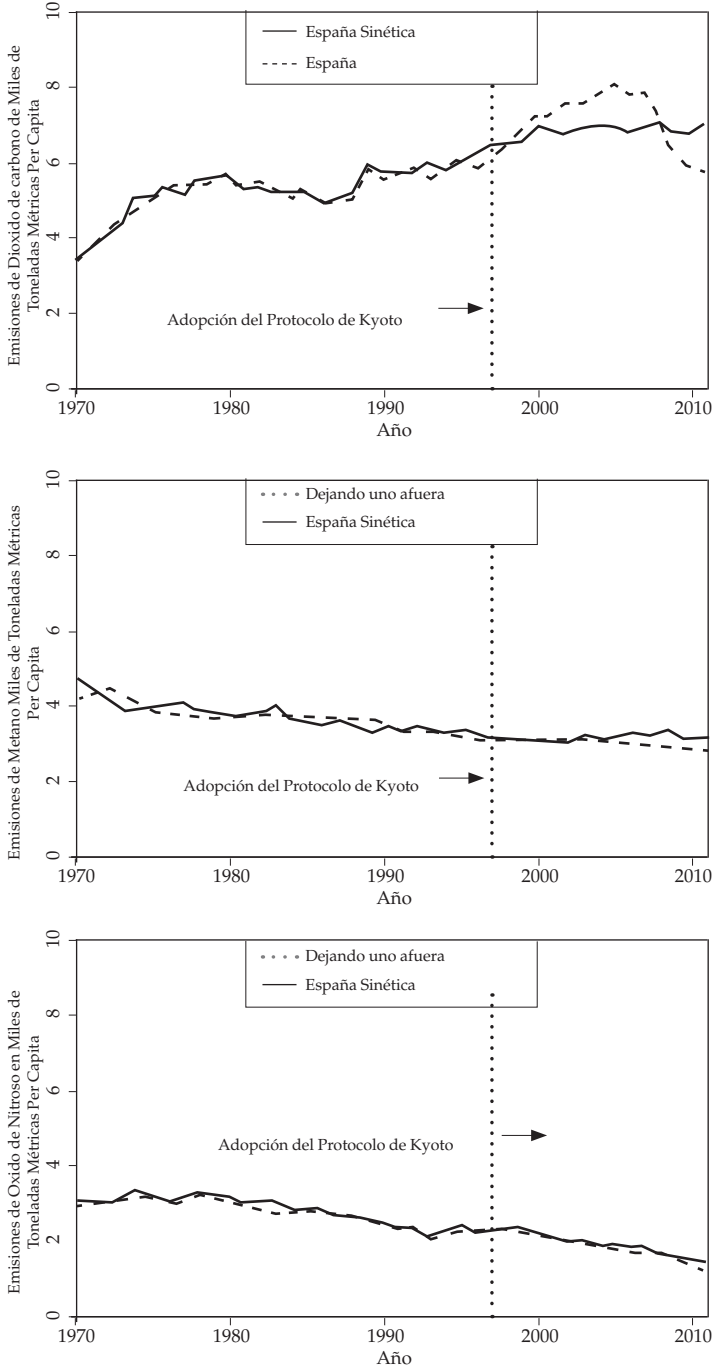


Figura 6. Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O España versus España sintética

A.3. El efecto de la ratificación del PK

A partir del grupo donante conformado por países.

Tabla 5. Países del grupo donante y ponderación de cada uno en la construcción de España sintética para emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O

País	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	Peso	Peso	Peso
Arabia Saudita	0,050	0,111	0,004
Brunei Darussalam	0,000	0,000	0,097
Canadá	0,000	0,000	0,000
Chipre	0,388	0,000	0,000
Corea del Sur	0,000	0,000	0,000
Estados Unidos	0,000	0,000	0,000
Macao	0,195	0,000	0,084
Malta	0,244	0,000	0,013
Singapur	0,032	0,359	0,065
Trinidad y Tobago	0,091	0,530	0,701

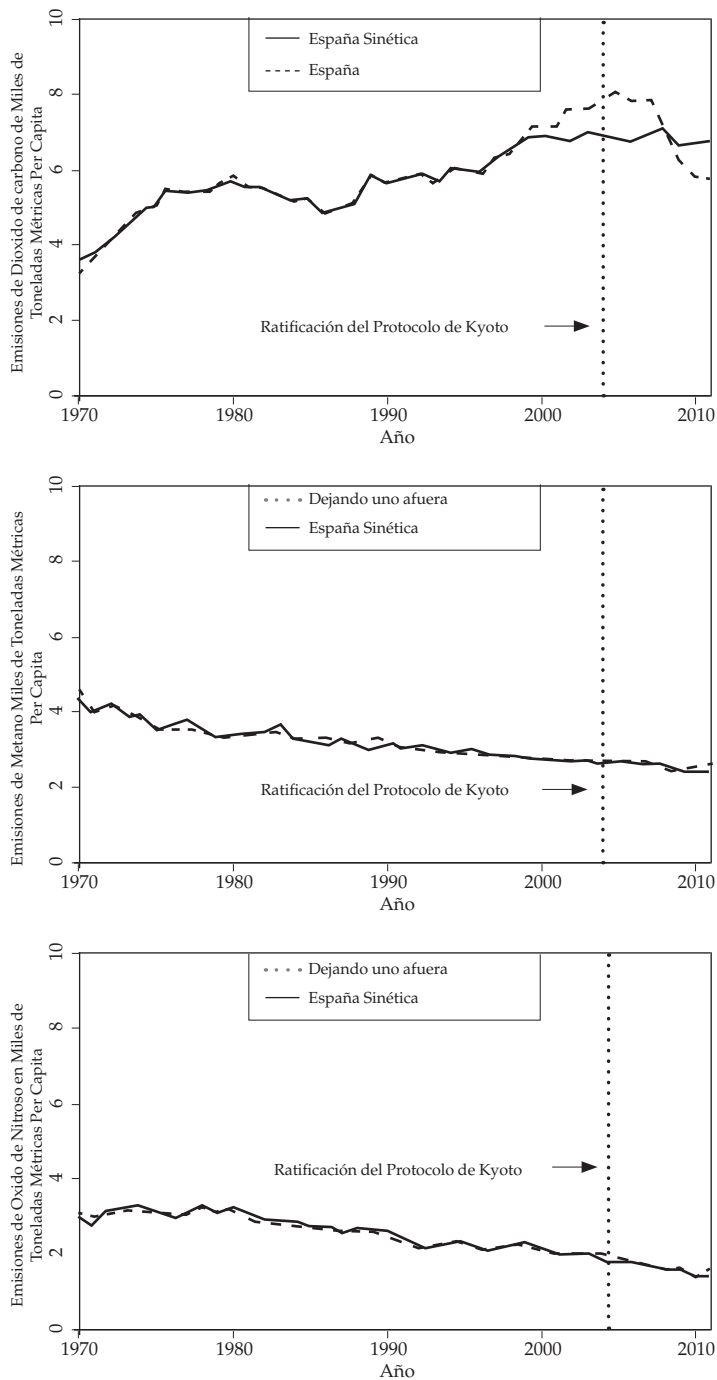


Figura 7. Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O España versus España sintética

A.4. Resultados desde el grupo donante conformado por los estados de Estados Unidos para el efecto de la firma (1997), adopción (2001) y ratificación (2004) del PK

Tabla 6. Grupo donante conformado por los estados de Estados Unidos y ponderación de cada uno en la construcción de España sintética para emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O

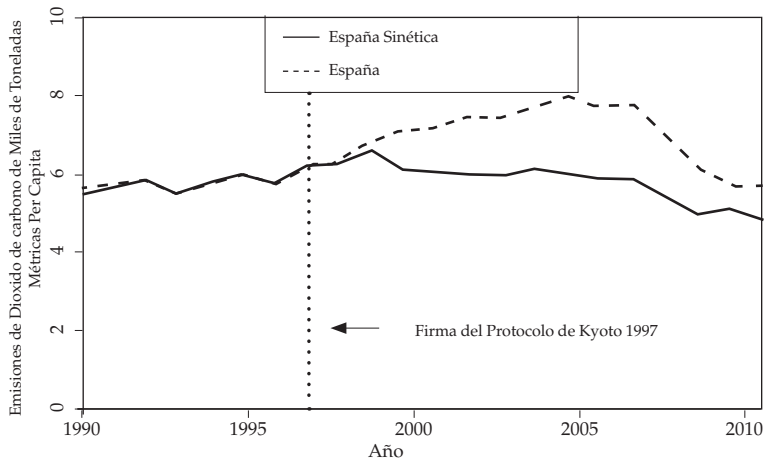
Estado	CO ₂ Peso			CH ₄ Peso			N ₂ O Peso		
	1997	2001	2004	1997	2001	2004	1997	2001	2004
Alabama	0,061	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Alaska	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Arizona	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Arkansas	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
California	0,270	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Colorado	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,630	0,000	0,000	0,000
Connecticut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Delaware	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,071	0,087	0,069
Distrito de Columbia	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Florida	0,669	0,905	0,888	0,346	0,125	0,000	0,000	0,000	0,000
Georgia	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Hawái	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Idaho	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Illinois	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Indiana	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Iowa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Kansas	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Kentucky	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Luisiana	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Maine	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Maryland	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Massachusetts	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Michigan	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Minnesota	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Misisipi	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Continúa

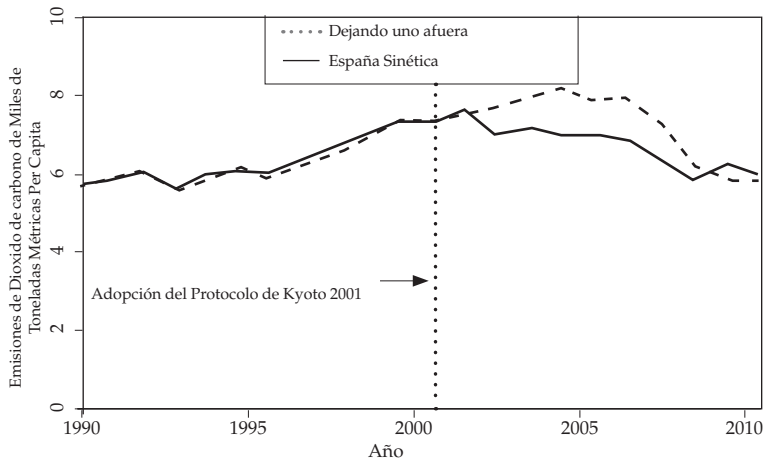
Estado	CO ₂ Peso			CH ₄ Peso			N ₂ O Peso		
	1997	2001	2004	1997	2001	2004	1997	2001	2004
Misuri	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Montana	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nebraska	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nevada	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,929	0,913	0,931
New Hampshire	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nueva Jersey	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nuevo México	0,000	0,000	0,000	0,068	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nueva York	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Carolina del Norte	0,000	0,000	0,000	0,151	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Dakota del Norte	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ohio	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Oklahoma	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Oregón	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Pensilvania	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Rhode Island	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Carolina del Sur	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Dakota del Sur	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Tennessee	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Texas	0,000	0,095	0,112	0,346	0,293	0,370	0,000	0,000	0,000
Utah	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Vermont	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Virginia	0,000	0,000	0,000	0,088	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Washington	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Virginia del Oeste	0,000	0,000	0,000	0,000	0,227	0,000	0,000	0,000	0,000
Wisconsin	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Wyoming	0,000	0,000	0,000	0,000	0,355	0,000	0,000	0,000	0,000

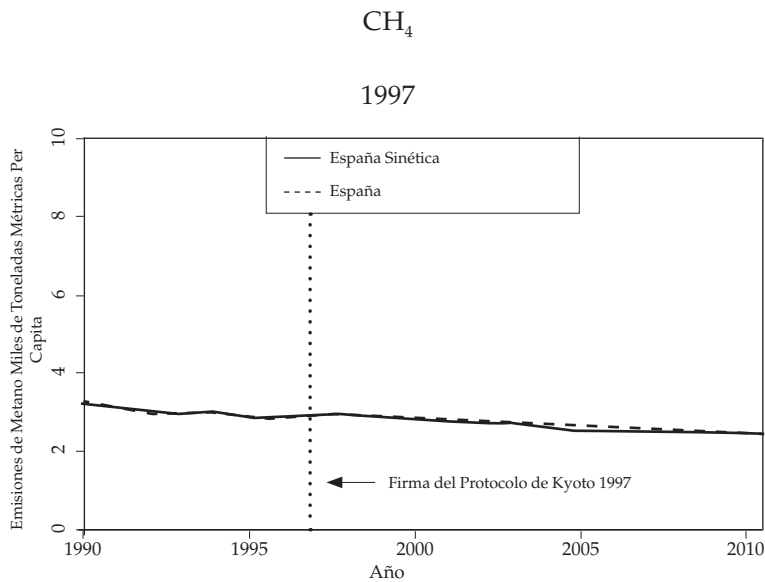
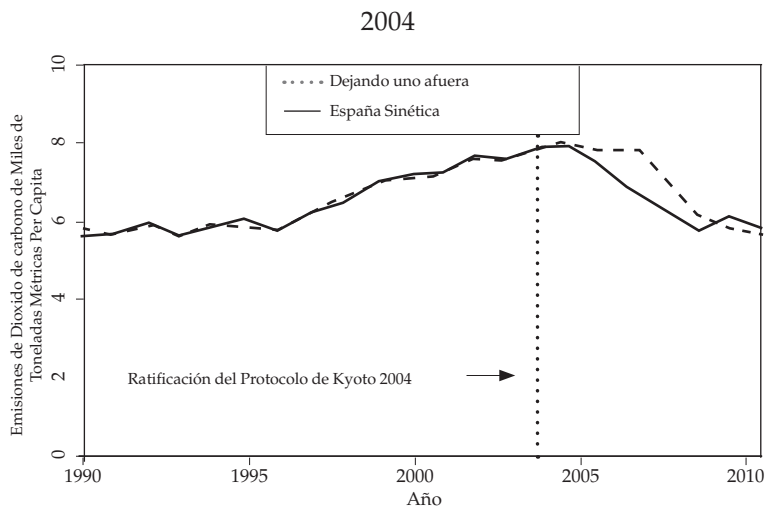
CO₂

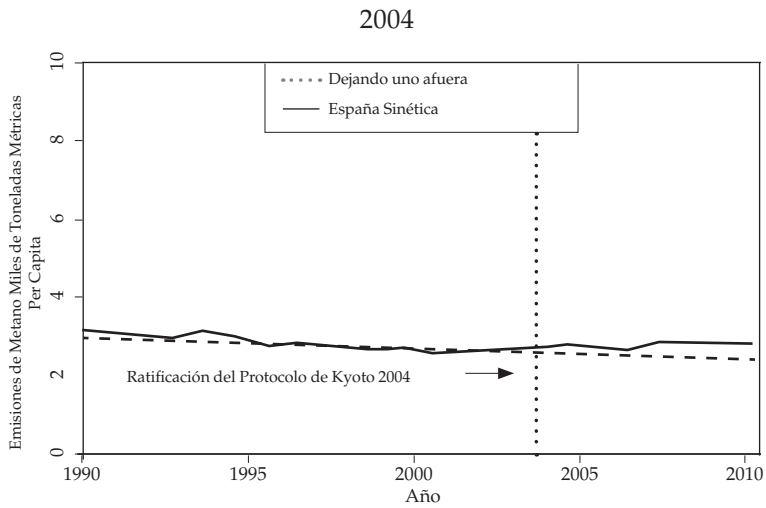
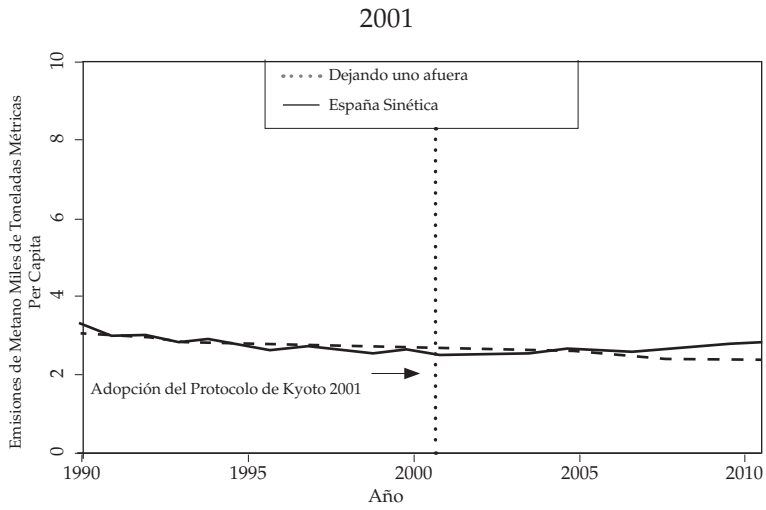
1997



2001

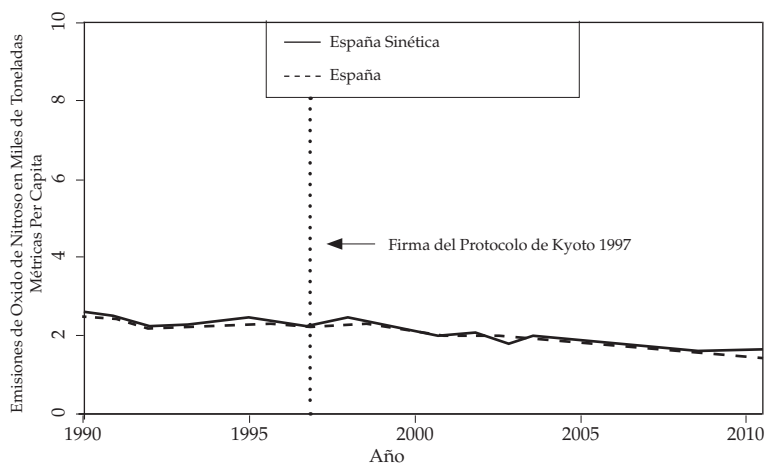




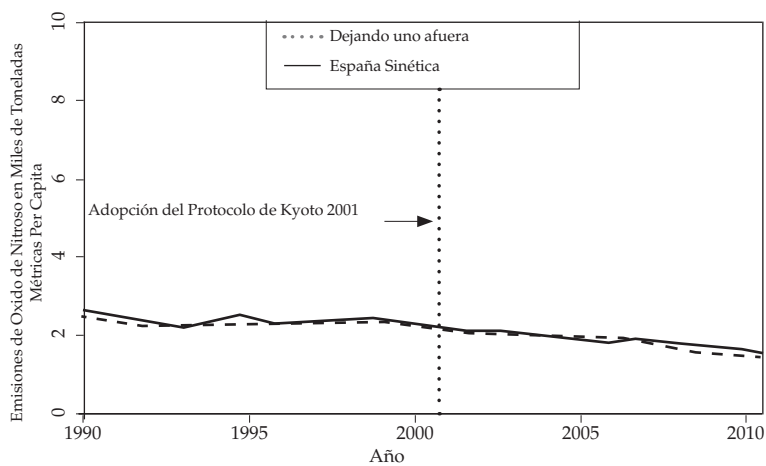


N₂O

1997



2001



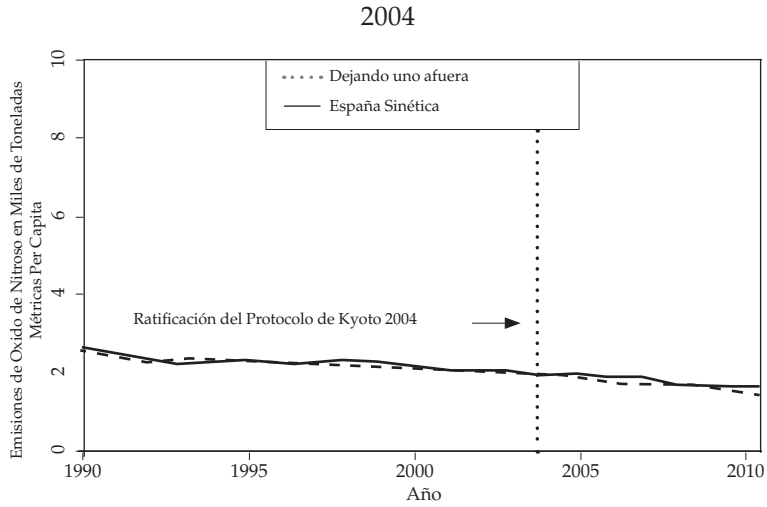


Figura 8. Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O España versus España sintética (grupo donante conformado por estados de Estados Unidos)

