

La descarbonización del sistema energético global.

Enseñanzas de los escenarios del Grupo
Intergubernamental de Expertos sobre
el Cambio Climático

José M^a Martín-Moreno

Jorge Blázquez

Documento de Trabajo

Número 41

Junio 2022

B 21662-201

La descarbonización de la economía es uno de los principales retos a los que se enfrenta la sociedad en general y el sector energético en particular. La transición energética requerirá esfuerzos importantes en todos los sectores, así como el uso de todas las tecnologías limpias disponibles. Este trabajo tiene como objetivo ilustrar, usando los escenarios del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), el impacto de la descarbonización sobre el sistema energético o, al menos, sobre algunas variables que consideramos críticas. Hay características comunes en todos ellos como la rápida electrificación, el crecimiento de las energías renovables, la fuerte caída en el consumo de carbón o el uso de captura y secuestro de carbono. Pero, además, el análisis de clústeres llevado a cabo sugiere tres posibles estrategias consistentes con el Acuerdo de París: una primera estrategia con fuerte crecimiento de la electricidad y las renovables y la expulsión del gas natural y el carbón. Una segunda estrategia con un crecimiento más lento del consumo de energía y desplazamiento progresivo de los combustibles fósiles. Y una tercera estrategia, donde el aumento del gas natural combinado con la captura y secuestro de carbono y la energía nuclear permite una rápida electrificación del sistema energético, a la vez que se reducen las emisiones.

1. Introducción

El Acuerdo de París, firmado en 2015, fijaba como objetivo evitar un incremento de la temperatura media global del planeta por encima de los 2°C respecto a los niveles preindustriales. Además, promovía esfuerzos adicionales para limitar ese aumento de temperatura a 1,5°C con respecto a niveles preindustriales. En 2021, y de acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (2022), las emisiones anuales alcanzaron niveles máximos superando los niveles previos a la crisis pandémica de Covid-19. El aumento de las emisiones anuales de CO₂ en más de 2 gigatoneladas (GtCO₂) fue el más grande de la historia en términos absolutos, corrigiendo la caída que tuvo lugar en 2020 con motivo de la pandemia.

Sin embargo, y a pesar de los pobres resultados en términos de emisiones de carbono, se ha producido un aumento de las ambiciones políticas relativas al cambio climático. En los últimos dos años diferentes naciones han ido anunciando, progresivamente, planes para alcanzar las emisiones cero. En la actualidad, los objetivos de alcanzar cero emisiones cubren a más del 90% de las emisiones globales (Climate Action Tracker, 2022). La Unión Europea, Estados Unidos, Japón, Corea del Sur, el Reino Unido, Canadá, etc. tienen como objetivo alcanzar las emisiones cero en 2050.

China, Nigeria y Brasil en 2060. India ha anunciado que fija este objetivo para el año 2070.

La transición energética hacia una economía neutra en carbono requerirá esfuerzos importantes en todos los sectores, así como el uso de las tecnologías limpias disponibles. En consecuencia, la descarbonización de la economía es uno de los principales retos a los que se enfrenta la sociedad en general y el sector energético en particular. Actualmente, el consumo de combustibles fósiles representa 4/5 del total de energía primaria consumida (BP 2021). En una economía descarbonizada esta ratio se reduce significativamente, hasta niveles alrededor del 20 % en 2100.¹ Se trata de una transformación radical que requiere una concepción diferente de los sistemas energéticos.

Este trabajo tiene como objetivo ilustrar, usando los escenarios del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, el impacto de la descarbonización sobre el sistema energético, al menos, sobre algunas variables que consideramos críticas utilizando un análisis deliberadamente sencillo. Hay que destacar, este estudio se focaliza sobre escenarios que mantienen la temperatura global por debajo de los 2°C, pero por encima de 1,5°C respecto de los niveles preindustriales. Se trata de escenarios que son consistentes con el Acuerdo de París, pero se descartan aquellos más ambiciosos.

2. Metodología, bases de datos y selección de escenarios

La base de datos de este trabajo es la utilizada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático para el informe *Special Report Global Warming of 1.5°C* publicado en el año 2018. Esta base de datos se publicó en 2019 y se puede acceder libremente a toda la información en *IAMC 1.5°C Scenario Explorer* en la página web de IIASA (Huppmann et al. 2019 y Rogelj et al. 2018).

Esta base de datos está compuesta por 414 escenarios que ofrecen información sobre emisiones del carbono de combustibles fósiles y procesos industriales. Esta es la variable normalmente utilizada para medir el nivel de emisiones asociada a la energía, que es el objeto de este estudio (véase International Energy Agency, 2021). De todos estos escenarios integrados en la base de datos nosotros seleccionamos una submuestra, siguiendo la metodología sugerida por bp en su *Energy Outlook 2020*. La base de datos agrupa los escenarios usando sus proyecciones en términos de incremento de la temperatura global a lo largo del siglo XXI. De todos los escenarios escogemos aquellos que son consistentes con el Acuerdo de París, en particular, aquellos escenarios en lo que

¹ Esta ratio se obtiene como la mediana de los escenarios que se describen en la sección 2.

la temperatura aumenta por debajo de 2°C con una probabilidad de 66%. Además, seleccionamos aquellos denominados *Lower 2°C*, compatibles con mantener el incremento en la temperatura global por debajo de 2°C, pero que a su vez superan el límite de 1.5°C, es decir, aquellos que están en un rango [1.5°C, 2°C]. En resumen, la base de datos que vamos a tomar como referente en este artículo tiene 69 escenarios², compatibles con el Acuerdo de París.

De estos escenarios seleccionados calcularemos la mediana y el rango intercuartílico³ como indicadores claves las siguientes variables: el CO₂ procedente del uso de energía y procesos industriales, la intensidad energética, la energía primaria, el consumo de petróleo, el gas natural, el carbón, la energía hidráulica, la nuclear, la biomasa, las energías renovables, el hidrógeno, la electricidad, la energía solar, la energía eólica y, finalmente, la captura y el almacenamiento de carbono. Todos los valores son en términos anuales salvo que se diga lo contrario. Esto nos permitirá identificar las principales características de la transición energética. Hay que señalar que únicamente nos centraremos en los datos a nivel mundial, descartando los análisis regionales.

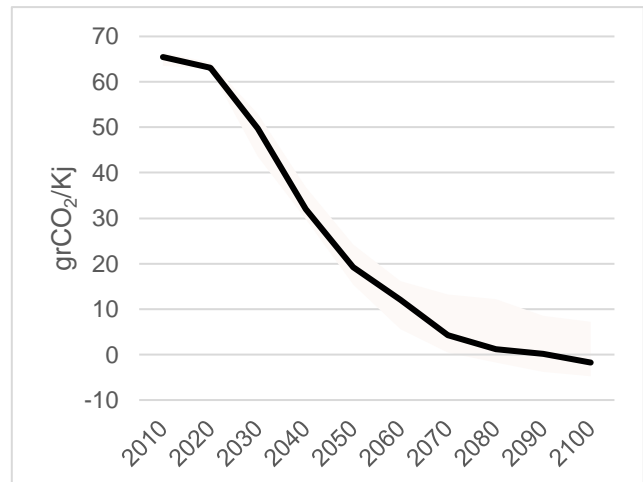
Adicionalmente, llevaremos a cabo un análisis de clúster para agrupar escenarios e identificar posibles estrategias de descarbonización de la economía.

Finalmente, el año de comparación usando datos reales es el 2019 y no el 2020, a pesar de que hay datos disponibles. El motivo es que el año 2020 está muy distorsionado por el efecto del Covid-19.

3. ¿Cuál es el ritmo necesario de descarbonización del sistema energético para mantener el calentamiento global por debajo de los 2 grados?

El gráfico titulado “Emisiones de CO₂ por unidad de energía primaria” muestra la mediana y el rango intercuartílico de los escenarios seleccionados. Merece la pena destacar que este trabajo no se centra en todas las emisiones de gases de efecto invernadero, sino únicamente en las emisiones de CO₂ procedentes de la combustión de energías fósiles y las emisiones de procesos industriales. Las emisiones de CO₂ procedentes del sector forestal o de cambios en el uso del suelo quedan fuera de este análisis, así como otro tipo de gases de efecto invernadero. Hay tres elementos que definen el proceso de descarbonización del sistema energético.

Gráfico 1. Emisiones de CO₂ por unidad de energía primaria



Fuente: IPCC (2018) y elaboración propia

Primero, los escenarios consistentes con el Acuerdo de París tienen una fuerte caída de emisiones en 2020-2040 y luego el ritmo de caída se ralentiza. En este primer periodo las emisiones de CO₂ se reducen al ritmo de 0,9 gigatoneladas (GtCO₂) por año, mientras que en 2040-2060 el ritmo prácticamente se reduce a la mitad (0,5 GtCO₂) por año. Segundo, la mediana de estos escenarios alcanza un nivel de emisiones cercano a cero alrededor de 2070. Estos escenarios sugieren que hay una ventana de unos 50 años para descarbonizar el sistema energético. Tercero, alrededor de la mitad de los escenarios tienen emisiones negativas en 2100. Esto sugiere que el sistema energético opera con una cantidad significativa de bioenergía con captura y secuestro del carbono (BECCS por sus siglas en inglés), lo que permite compensar otras emisiones producidas fuera del sistema energético. Existen otras tecnologías de captura y secuestro del carbono, como captura directa de carbono o la reforestación, pero están fuera de los que se considera el sistema energético que es el objeto de este artículo.

Para entender qué factores explican la caída de las emisiones, es conveniente utilizar la identidad de Kaya (1997).

$$CO_{2,t} = \frac{CO_{2,t}}{Energia_t} \frac{Energia_t}{PIB_t} \frac{PIB_t}{POB_t} POB_t$$

Donde la variable $CO_{2,t}$ representa las emisiones de carbono en el periodo t , $\frac{CO_{2,t}}{Energia_t}$ es la intensidad de carbono o cantidad de carbono por unidad de energía, $\frac{Energia_t}{PIB_t}$ es la intensidad energética o energía consumida por unidad de PIB producida, $\frac{PIB_t}{POB_t}$ es el PIB per cápita y, finalmente, POB_t es la población.

² Nota técnica. Para evitar una muestra poco representativa, por una parte se descartan los escenarios cuyas emisiones de CO₂ de energía y procesos industriales en 2010 se alejan en más de un 5% de la media de los escenarios y, por otra, aquellos en que el

precio sombra del carbono a nivel global exceda los 30 dólares en 2020 (año base 2010) por ser considerados demasiado optimistas.

³ Se trata de los escenarios que están en un rango [25%, 75%]. Es una metodología destinada a eliminar los valores más extremos de una muestra.

Dado que la población y el PIB per cápita crecen en estos escenarios, la caída del CO₂ solo puede originarse por la caída de la intensidad de carbono o de la intensidad energética.

La intensidad energética tiene una caída muy acelerada en 2020-2030 o, lo que es lo mismo, aumenta la eficiencia energética del sistema económico. Si en 2010-2020 la mayor eficiencia energética permite reducir a la mitad el consumo de energía por unidad de PIB cada 31 años, en 2020-2030 esta se multiplica por 2, reduciendo ese periodo a unos 16 años. La mejora en la eficiencia energética en estos escenarios ha sido cuestionada desde ámbitos académicos. En particular, Semieniuk *et al.* (2021) plantean que la eficiencia energética contemplada en estos escenarios solo ha ocurrido una vez en el pasado, coincidiendo con la crisis del petróleo a comienzos de los años 70.

Una variable clave para entender la descarbonización de la economía es la descarbonización de las fuentes energéticas, es decir, las emisiones de CO₂ por unidad de energía consumida: $\frac{CO_{2,t}}{Energia_t}$. La senda de esta variable es que la determina el ritmo de caída de las emisiones del consumo de combustibles fósiles y de procesos industriales.

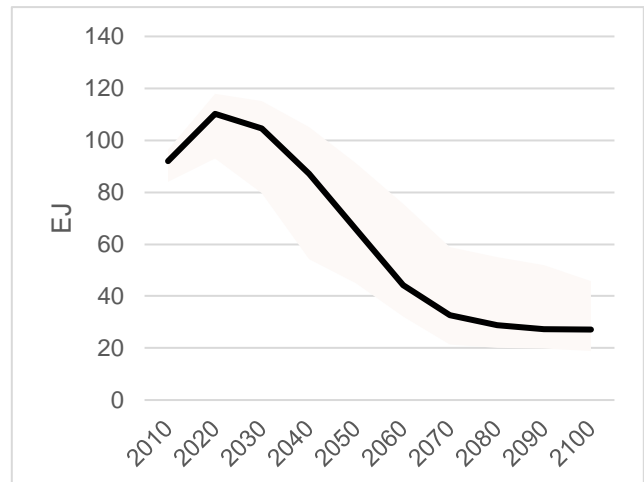
4. ¿Hasta qué punto es posible descarbonizar el transporte? Y ¿cuál es el papel del petróleo en una economía descarbonizada?

El petróleo tiene un papel clave en el sistema energético actual, en particular, para el transporte. Alrededor de 2/3 del petróleo consumido en 2019 se utilizó por el sector transporte, 1/5 para la industria, y resto en el sector residencial, comercial, y la generación de energía eléctrica (International Energy Agency, 2021).

El transporte por carretera de mercancías de larga distancia, la aviación y el transporte marítimo son sectores difíciles de descarbonizar porque no se pueden electrificar, al menos con las tecnologías actuales (Energy Transitions Commission, 2018). No ocurre lo mismo con el transporte de pasajeros. Escenarios consistentes con el Acuerdo París muestran precisamente la dificultad de reemplazar el petróleo en el sector transporte.

El gráfico “Consumo de petróleo del sector transporte” muestra una caída en el periodo 2020-2100, pero está lejos de sugerir una completa desaparición del petróleo en este sector. En 2050 la demanda de crudo del sector transporte se mueve en un rango de 45-91 EJ/año (22-44 millones de barriles al día), lo que representa una caída entre el 17%-59% respecto a la mediana de 2020. En 2100, el consumo de petróleo ha caído más y el rango está entre 19-49 EJ/año (9 y 22 millones de barriles al día). Estas cifras sugieren dos cosas: una gran incertidumbre a largo plazo (2050) sobre la facilidad para reemplazar el crudo en el transporte y un consumo también en el largo plazo que no es residual.

Gráfico 2. Consumo de petróleo del sector transporte



Fuente: IPCC (2018) y elaboración propia

Es importante indicar que el consumo de petróleo en el sector transporte no está totalmente descarbonizado. El consumo de petróleo representa alrededor de ¼ del total de la energía final demandada por este sector, y la electricidad y los biocombustibles aportan prácticamente buena parte del resto. Un análisis sencillo sobre el carbono emitido por la combustión de petróleo sugiere que en 2100, el sector transporte emitiría entre 1 y 3 GtCO₂, frente a las aproximadamente 8GtCO₂ de 2019. Dado que los escenarios tienden a tener cero emisiones en el año 2070, eso implica que algún otro sector de la economía está compensando las emisiones del transporte con emisiones negativas. Este punto lo clarificaremos más adelante.

Hay que destacar el papel de la electricidad en la descarbonización del sector transporte. La demanda de electricidad por el sector transporte crece exponencialmente, multiplicándose la demanda por 50. En particular en 2020-2030 hay un proceso acelerado de electrificación y la demanda se dobla cada 9 años.

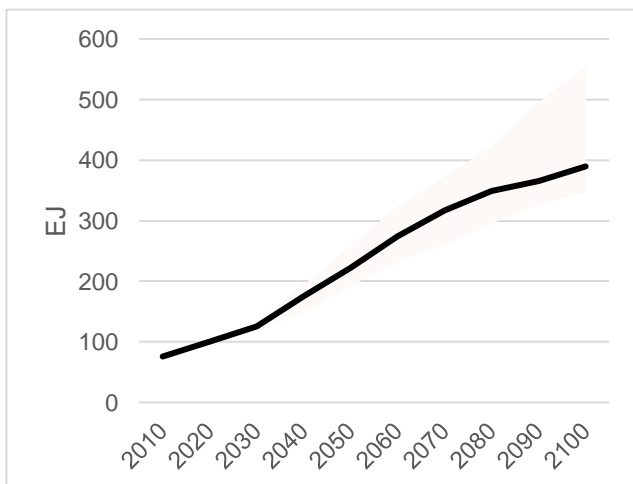
5. ¿Qué tan deprisa hay que descarbonizar el sector eléctrico?

El sector eléctrico es el principal responsable de las emisiones de carbono del sistema energético. En 2019, este sector representa 1/3 de las emisiones totales de CO₂, siendo el principal sector responsable de dichas emisiones. La industria representó una ¼, el sector transporte otra 1/5, el sector residencial y edificios comerciales alrededor de un 10% y, el resto, el sector de generación de calor y el agrícola. Por otra parte, la descarbonización del sector eléctrico es, seguramente, la más sencilla de llevar a cabo dados los notables avances tecnológicos y de costes de las energías solar y eólica.

En 2019 el carbón y el gas natural contribuyeron más del 60% de la generación eléctrica. La energía nuclear representó un 10% y la hidráulica un 16%. Las renovables modernas como la energía eólica, la solar y la biomasa contribuyeron con un 5%, 3% y 2%, respectivamente. En todos los escenarios de descarbonización estas proporciones cambian sustancialmente.

El primer mensaje de esta sección es que la electricidad crece significativamente en todos los escenarios. La descarbonización lleva unida un proceso de fuerte electrificación. El gráfico titulado “Generación de electricidad” muestra qué generación eléctrica se multiplica por 2 o por 3 en 2020-2050. Este gráfico no es una sorpresa. De hecho, en estos escenarios la electricidad sobre el consumo final de energía se incrementa desde 23% en 2020 al 48% y al 76% en 2050 y 2100, respectivamente.

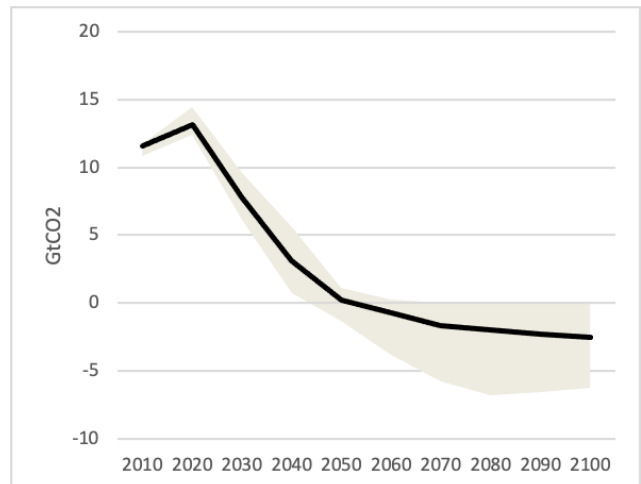
Gráfico 3. Generación de electricidad



Fuente: IPCC (2018) y elaboración propia

Otro elemento clave de estos escenarios son las “Emisiones de CO₂ del sector eléctrico”, tal y como muestra el gráfico con dicho título. En estos escenarios el sector eléctrico alcanza las cero emisiones alrededor de 2050. En 2050-2100 el sector eléctrico compensará las emisiones positivas de otros sectores, como el transporte, usando la captura y secuestro de carbono combinado con la biomasa. La escasa amplitud del rango intercuartílico en 2050, indica que hay un elevado consenso entre los investigadores del IPCC respecto de la rápida descarbonización de este sector.

Gráfico 4. Emisiones de CO₂ del sector eléctrico

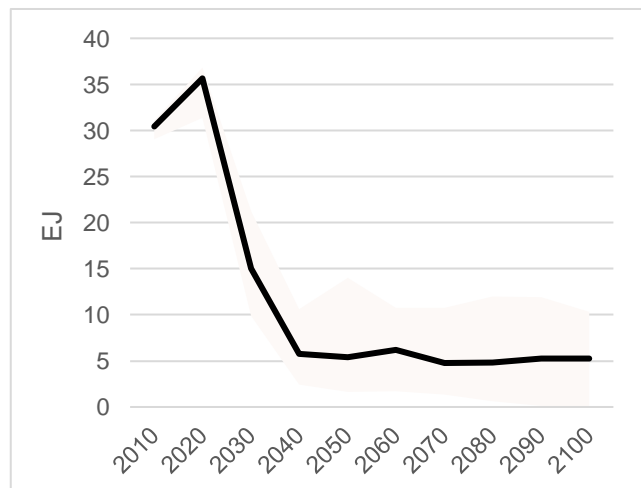


Fuente: IPCC (2018) y elaboración propia

Esta descarbonización se produce mediante un aumento exponencial de la energía eólica y solar. Estas dos fuentes energéticas, que representan alrededor del 8% en 2020, aumentan hasta el 54% en 2050, siendo el rango intercuartílico del 41%-64%. En 2100 la mediana de estos escenarios se incrementa ligeramente hasta alrededor del 60%, pero el rango intercuartílico es de 53%-80%. Merece la pena señalar que, en estos escenarios, donde las emisiones del sector llegan a cero alrededor de 2050, la energía nuclear se multiplica por 2 en 2020-2050 y vuelve a multiplicarse por 2 en 2050-2100.

Podría pensarse que un escenario de rápida descarbonización implica la práctica desaparición de los combustibles fósiles del sector eléctrico. En realidad, esta intuición es solo cierta para el carbón. Este combustible prácticamente desaparece de la amalgama de generación en 2040. En 2020-2040, la mediana de los escenarios seleccionados tiene una reducción de casi el 85% (véase el gráfico titulado “Generación eléctrica con carbón”).

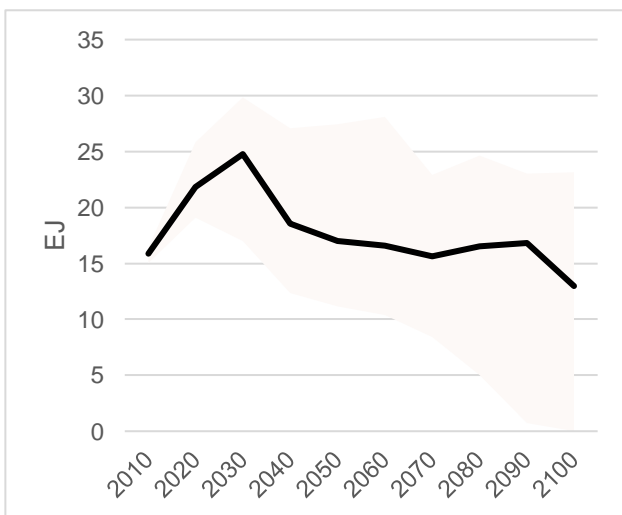
Gráfico 5. Generación eléctrica con carbón



Fuente: IPCC (2018) y elaboración propia

El papel del gas natural es muy diferente, permaneciendo estable alrededor de los 15-20 EJ desde 2040, tal y como se observa en el gráfico “Generación de electricidad con gas natural”. Es igualmente estable el aumento en la generación de electricidad usando gas natural en 2020-2030. En este periodo, el uso de carbón en el sector eléctrico cae con fuerza y el aumento de las energías renovables no es suficiente como para satisfacer la demanda de electricidad. Por este argumento, se considera que el gas natural es un “puente hacia la descarbonización” a medio plazo. Dadas las tecnologías actuales es posible reemplazar 1 kWh generado con carbón por otro generado con gas natural con una reducción aproximada del 50% en las emisiones. También hay que indicar que la incertidumbre sobre el uso del gas natural en este sector es muy grande, algo evidente dado el tamaño del rango intercuartílico que se observa en el gráfico.

Gráfico 6. Generación de electricidad con gas natural



Fuente: IPCC (2018) y elaboración propia

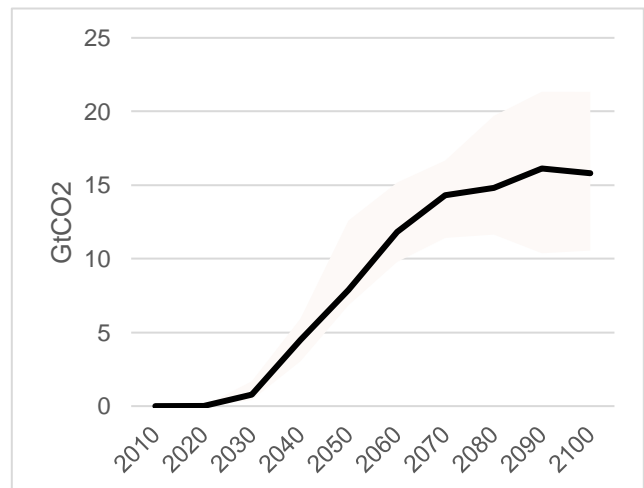
La pregunta que, lógicamente, queda en el aire es ¿cómo es posible descarbonizar completamente el sector eléctrico en 2050 con unos niveles relativamente altos de generación con gas natural? Esto lo responderemos más adelante.

6. ¿Cuál es el papel de la captura y almacenaje de carbono en la transición energética?

Los escenarios seleccionados tienen una cantidad significativa de emisiones de carbono que son capturadas y secuestradas, lo que se conoce como CCS por sus siglas en inglés. En particular, en 2030 esta tecnología empieza a jugar un papel relevante y el CO₂ capturado se sitúa en torno a los 0,8 GtCO₂ al año. En 2019 se estima que el CO₂ capturado es de unas 0,04 GtCO₂, lo que significa, que se multiplica por 20 en una década. En 2050, la mediana llega a 8 GtCO₂, tal y como

se observa en el gráfico titulado “Captura y secuestro de CO₂”. Esta cantidad se dobla de nuevo en 2050-2100. Estos resultados se alinean con el trabajo de Haszeldine *et al.* (2018) donde se afirma que sin CCS no es posible mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C respecto de los niveles preindustriales. El uso de CCS en este tipo de escenarios es compatible con el artículo de Blázquez (2021) para escenarios *Net-Zero*.

Gráfico 7. Captura y secuestro de CO₂



Fuente: IPCC (2018) y elaboración propia

Merece la pena destacar el artículo de Bui *et al.* (2018) donde se pone de manifiesto que esta tecnología permite descarbonizar el sistema energético de forma más económica. En particular, si la CCS no estuviese disponible, el coste de descarbonización usando otras tecnologías bajas en carbono aumentaría casi un 140%.

Aunque los escenarios del IPCC señalan que la CCS es parte de una solución eficiente desde un punto de vista económico, la CCS tiene menos apoyo en comparación con otras tecnologías. Este hecho podría generar la percepción de que los escenarios con altos niveles de CCS no son realistas.

Además de capturar las emisiones de carbono de los combustibles fósiles procedentes de la industria y el sector eléctrico, la CCS combinada con biomasa (BECCS por sus siglas en inglés) se utiliza para generar emisiones negativas y compensar las emisiones de otros sectores. En el año 2050, las emisiones negativas de BECCS son de 4GtCO₂ y en 2100 de 10 GtCO₂.

7. ¿Cuáles son las estrategias de descarbonización energética a medio plazo? Un análisis de clústeres

El análisis clúster (AC) es un método estándar del análisis multivariante que puede reducir una compleja cantidad de información en pequeños grupos o clústeres, donde los miembros de cada uno de ellos comparten características similares (Lin&Chen, 2006). Este análisis se considera una técnica eminentemente exploratoria que no utiliza ningún tipo de modelo estadístico para llevar a cabo el proceso de clasificación (Hair *et al.*, 1999; Peterson, 2002) y, por ello, se le podría calificar como una técnica de aprendizaje no supervisada, es decir, una técnica muy adecuada para extraer información de un conjunto de datos sin imponer restricciones previas en forma de modelos estadísticos (Barrios & Carvajal, 2006). El análisis de clústeres tiene por objeto formar grupos homogéneos (clúster) en función de las similitudes entre ellos (Peña, 2002). Los grupos se forman de tal manera que cada objeto es parecido a los que hay dentro del clúster con respecto a algún criterio de selección predeterminado (Rao&Srinivas, 2006; Hair *et al.*, 1999).

Para llevar a cabo este análisis se han elegido las variables del consumo de energía primaria, la generación eléctrica, la energía eólica y solar, el consumo de biomasa, el consumo de gas natural, el consumo de petróleo, el consumo de carbón, la energía nuclear, y la captura y secuestro de carbono. Para cada variable y escenario se calcula la diferencia entre 2020 y 2050. Se trata, por tanto, de agrupar los escenarios que tienen estrategias de descarbonización parecidas en el periodo 2020-2050, es decir, a medio plazo.

En este caso, hemos seleccionado 9 variables para llevar a cabo el análisis. La generación de electricidad (1), la energía eólica y solar (2), el consumo de bioenergía (3), el de carbón (4), el de gas natural (5), el de petróleo (6), la generación nuclear (7), la captura y secuestro de CO₂ (8) y el consumo total de energía primaria (9). El análisis es de medio plazo por lo que el periodo estudiado es el cambio absoluto de estas variables en 2020-2050. Todas las variables están expresadas en exajulios, salvo las variables (8) que están en GtCO₂. Usando estas variables hemos identificado 3 clústeres o tres tipos de estrategias para descarbonizar el sistema energético. La tabla recoge la media de las variables en 2020-2050 para cada clúster.

Lógicamente hay patrones comunes en los clústeres presentados, pero el objetivo de este análisis es precisamente mostrar en qué son diferentes. El primer clúster se caracteriza por un escaso aumento de la energía primaria. Esta estrategia de descarbonización se centra en la eficiencia energética y en una brusca reducción de los combustibles fósiles acompañada con un uso moderado de la captura y secuestro de carbono. El segundo clúster se caracteriza por un sorprendente aumento del gas natural, la energía nuclear, una caída moderada del carbón y, sobre todo, un fuerte aumento de la captura y

secuestro de carbono. Esta estrategia va acompañada de un fuerte aumento de la energía primaria. Finalmente, la última estrategia es posiblemente la más intuitiva. Hay un fortísimo aumento de la electrificación del sistema eléctrico impulsado por las energías renovables, compensado una fuerte caída de los combustibles fósiles.

Hay que señalar nuevamente que las tres estrategias son compatibles con el Acuerdo de París.

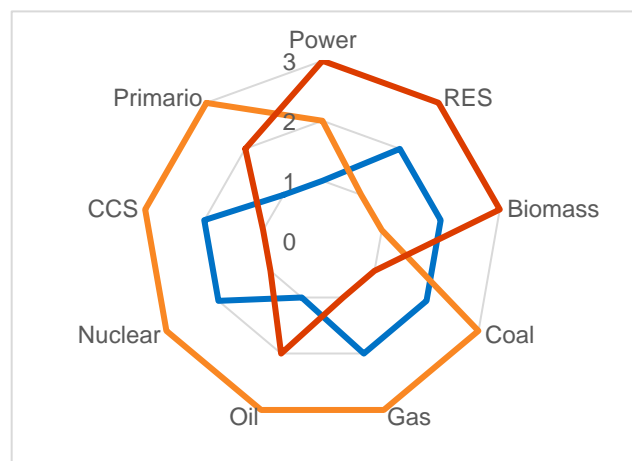
Tabla 1. Estrategias compatibles con el acuerdo de París

CLÚSTER	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	8	78	7	-93	-	-55	1	8	1
	5		7		16		2		0
2	1	66	5	-51	61	-	3	1	8
	1		3			117	1	6	2
	5								
3	1	17	7	-	-	-66	1	5	5
	6	0	9	126	58		1		2
	4								

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 8 trata de representar visualmente estos clústeres. Para ellos hemos ordenado las estrategias de mayor a menor. La línea naranja representa la estrategia que apuesta por la electricidad y las renovables, la línea azul – interior– es la estrategia que apuesta por la eficiencia energética, y la línea roja la que apuesta por el gas natural, la nuclear y el uso de la CCS.

Gráfico 8. Análisis Cluster



Fuente: Elaboración propia

8. Algunas consideraciones para España

La Unión Europea tiene como objetivo alcanzar la neutralidad climática no más tarde de 2050, teniendo como objetivo intermedio una caída de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2030 del 55% respecto a las emisiones de 1990. España, como miembro de la UE, tiene que alinear su estrategia con este objetivo. Los detalles del nuevo plan están aún pendientes.

Más allá de consideraciones precisas en torno a la senda de emisiones y la evolución de la diversidad energética, España percibe el cambio climático como una oportunidad para modernizar su economía (*Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050*). Para alcanzar las cero emisiones en 2050 se debe actuar en múltiples frentes. En particular, el desarrollo de las energías renovables dará un impulso al sector industrial nacional y permitirá abrir nuevos sectores en el ámbito del almacenamiento de la energía y del hidrógeno.

Adicionalmente, se utilizarán los Fondos de recuperación y resiliencia, ideados por la Unión Europea como un instrumento para superar las cicatrices económicas derivadas de la crisis del Covid-19, para acelerar la descarbonización de la economía. Se espera que estas medidas tengan un impacto muy positivo en la generación de empleo y la inversión. El documento *Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050* estima que las inversiones adicionales anuales se situarán en torno a un 1% del PIB.

Dicho documento tiene algunos datos concretos relevantes que destacar. Primero, la eficiencia energética, medida en términos de PIB, se multiplicará por 2,5 en 2050. Segundo, la penetración de la energía renovable se situará en el 97% para toda la energía. En el caso, del transporte esta penetración alcanzará el 79%. Tercero, el sector eléctrico será 100% renovable antes de 2050. Cuatro, el consumo de energía primaria se reducirá un 40%.

Claramente estas grandes líneas de política energética son más ambiciosas que lo que hemos descrito a lo largo del artículo en términos de descarbonización. La Unión Europea pretende ser un líder en este campo y sus políticas energéticas buscan una completa descarbonización para 2050, mientras que los escenarios del IPCC que hemos presentado en este artículo son compatibles con una completa descarbonización mundial alrededor de 2070.

9. Conclusiones

Los objetivos firmados en el Acuerdo de París en diciembre de 2015, que tratan de evitar un incremento de la temperatura media global del planeta por encima de los 2°C respecto a los

niveles preindustriales, requieren de una transformación profunda del sistema productivo y energético global.

La transformación hacia una economía baja en carbono irá de la mano de la innovación tecnológica, de políticas climáticas más estrictas y de un cambio en algunos hábitos sociales.

Este trabajo tiene como objetivo ilustrar, usando los escenarios del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, el impacto de la descarbonización sobre el sistema energético o, al menos, sobre algunas variables que consideramos críticas. Para ello hemos llevado a cabo una selección de escenarios consistentes con el Acuerdo de París y hemos buscado tendencias comunes en todos ellos. En particular, se observa que la descarbonización de la economía viene acompañada de una rápida electrificación, el crecimiento de las energías renovables, la fuerte caída en el consumo de carbón y, en menor medida del petróleo, el aumento de la eficiencia energética y el significativo del uso de captura y secuestro de carbono.

Además, el análisis de clústeres llevado a cabo sugiere que existen tres posibles estrategias de descarbonización consistentes con el Acuerdo de París: Una primera estrategia que reside en un fuerte crecimiento de la electricidad y las renovables y la expulsión del gas natural y el carbón del sistema eléctrico de generación, en esta estrategia hay un considerable aumento de la energía primaria usada. Una segunda estrategia estaría asociada a un lento crecimiento del consumo de energía primaria y al desplazamiento progresivo de los combustibles fósiles acompañado de una subida de las energías renovables. Finalmente, hay una tercera estrategia donde se observa un aumento del gas natural y la energía nuclear combinado con un fuerte aumento de la captura y secuestro de carbono, permitiendo una rápida electrificación del sistema energético, a la vez que se reducen las emisiones.

Si hubiera que resumir este artículo en dos ideas centrales, la primera sería que no existe una única tecnología o fuente energética que permita descarbonizar la economía y que se debe usar un amplio abanico de tecnologías y energías y, la segunda, sería que se puede descarbonizar el sistema energético usando diferentes estrategias y, que, por tanto, no existe una única estrategia que se pueda considerar correcta o adecuada.

Finalmente, aunque está fuera del objetivo de este artículo, conviene hacer una mención sobre la guerra entre Rusia y Ucrania. Rusia es un país fundamental en la producción de gas y petróleo, siendo una pieza clave de la seguridad energética global y su papel no puede ser reemplazado fácilmente tal y como apunta Martín-Moreno (2014). Según bp (2021) este país produjo alrededor del 20% del total mundial de gas natural y el 15% del petróleo. Es evidente que la guerra de Ucrania tendrá un impacto sobre los mercados energéticos, así como sobre la percepción de la seguridad energética. De hecho, la penetración del petróleo en la amalgama energética mundial

alcanzó el máximo en 1973, año del embargo del petróleo del OPEP, cayendo casi 10 puntos en los siguientes 10 años. Sin embargo, aun es muy pronto para evaluar el impacto de la crisis en la transición energética.

Bibliografía

- Blazquez, Jorge. *Lessons learnt from the IPCC Net-Zero Energy Scenario, in COP 26 -Examining the Balance Between Ambitious Pledges and Realistic Expectations*. Oxford Energy Forum. Septiembre (2021). Issue 129.
- BP energy outlook, 2020
- BP Statistical Review of World Energy, Julio 2021
- Bui, Mai, Claire S. Adjiman, André Bardow, Edward J. Anthony, Andy Boston, Solomon Brown, Paul S. Fennell et al. "Carbon capture and storage (CCS): the way forward." *Energy & Environmental Science* 11, no. 5 (2018): 1062-1176.
- Climate Action Tracker (2022). *Glasgow's 2030 credibility gap: net zero's lip service to climate action*. [https://climateactiontracker.org/publications/glasgows-2030-credibility-gap-net-zeros-lip-service-to-climate-action/#:~:text=Globally%2C%20around%2090%25%20of%20emissions,quality%20of%20most%20remains%20questionable](https://climateactiontracker.org/publications/glasgows-2030-credibility-gap-net-zeros-lip-service-to-climate-action/#:~:text=Globally%2C%20around%2090%25%20of%20emissions,quality%20of%20most%20remains%20questionable.).
- Daniel Huppmann, ElmarKriegler, VolkerKrey, KeywanRiahi, JoeriRogelj, Katherine Calvin, FlorianHumpeoeder, Alexander Popp, Steven K. Rose, John Weyant, Nico Bauer, ChristophBertram, Valentina Bosetti, Jonathan Doelman, Laurent Drouet, Johannes Emmerling, Stefan Frank, Shinichiro Fujimori, David Gernaat, ArnulfGrubler, CelineGuivarch, Martin Haigh, Christian Holz, Gokullyer, EtsushiKato, KimonKeramidas, AlbanKitous, FlorianLeblanc, Jing-YuLiu, KonstantinLöffler, GunnarLuderer, Adriana Marcucci, David McCollum, Silvana Mima, Ronald D. Sands, Fuminori Sano, Jessica Streffer, JunichiTsutsui, Detlef Van Vuuren, ZoiVrontisi, Marshall Wise, y Runsen Zhang. *IAMC 1.5°C Scenario Explorer and Data hosted by IIASA. Integrated Assessment Modeling Consortium & International Institute for Applied Systems Analysis*, 2019. doi: 10.5281/zenodo.3363345 | url: data.ene.iiasa.ac.at/iamc-1.5c-explorer
- Energy Transitions Commission. *Mission Possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors*, 2018
- European Commission (2019). *A European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent*. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- Gregor Semieniuk, Lance Taylor, ArmonRezaei & Duncan K. Foley. *Plausible energy demand patterns in a growing global economy with climate policy*. *Nat. Clim. Chang.* 11, 313-318 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00975-7>
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. I. y Black, W. (1999). *Análisis Multivariante*. 5 edición. Editorial Prentice Hall. Madrid.
- Haszeldine, R. Stuart, Stephanie Flude, Gareth Johnson, y Vivian Scott. "Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376, no. 2119 (2018): 20160447.
- International Energy Agency. *World Energy Outlook*, 2021.
- International Energy Agency. *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021, 2022*
- Kaya, Yoichi; Yokoburi, Keiichi (1997). *Environment, energy, and economy: strategies for sustainability*. Tokyo [u.a.]: United Nations Univ. Press. ISBN 9280809113.
- Lin, G. y L. Chen. (2006). *Identification of homogeneous regions for regional frequency analysis using the self-organizing map*. *Journal of Hydrology* 324, pp 1-9.
- Peterson, L. (2002). CLUSFAVOR 5.0: Hierarchical cluster and principal-component analysis of microarray-based transcriptional profiles. Departments of Medicine, Molecular and Human Genetics, and Scott Department of Urology, Baylor College of Medicine, One Baylor Plaza, ST-924, Texas, USA. *Genome Biology* 3:software0002.1-0002.8. Available in: <http://genomebiology.com/2002/3/7/software/0002>
- Peña, D. (2002) *Análisis de Datos Multivariantes*. Mc Graw-Hill. España.
- Rao, A. R. y Srinivas, V. (2006). *Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis*. *Journal of Hydrology*, 318, pp 37-56.
- Rogelj Joeri, Drew Shindell, Kejun Jiang, et al. *Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development*, in "Special Report on Global Warming of 1.5°C (SR15)". Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 2018. url: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>

Sobre los autores:

José María Martín-Moreno. Doctor en economía por la UCM, Postgrado in Microeconomics of Competitiveness por Orkestra y Miembro de ECOBAS. En la actualidad, Vicerrector de Economía en la Universidad de Vigo.

Jorge Blázquez. Research Associate en el Oxford Institute for Energy Studies.

Otras publicaciones ODF

Mar	2022	DT	Crisis económica COVID'19: Elementos diferenciales. Una especial consideración a la política monetaria y su impacto en los mercados financieros	David Cano Martínez
Mar	2022	DT	Retos y oportunidades del estrés climático de la banca europea	Francisco del Olmo García y Fernando Rojas Traverso
Feb	2022	NT	Criptoactivos: un nuevo activo de inversión	Carlos de Fuenmayor
Dic	2021	DT	Bonos contingentes convertibles (Coco): de Basilea III a la transición sostenible	Arturo Zamarriego Muñoz
Nov	2021	NT	Special Purpose Acquisition Company (SPAC)	Carlos de Fuenmayor
Oct	2021	DT	Sostenibilidad de la deuda: geometría y límites difusos	Daniel Suárez Montes
Set	2021	NT	Bonos Sociales: Financiando la equidad	Julián Romero Zarco
Set	2021	DT	El imprescindible papel de las agencias de rating en el viraje hacia la sostenibilidad	Antonio Madera del Pozo
Jul	2021	NT	Measuring and targeting systemic cyclical risks – the Countercyclical Capital Buffer	Sofia Velasco
Jun	2021	NT	El Sandbox regulatori: És una oportunitat d'apropar el sector al regulador mitjançant la digitalització?	Pablo Domenech
May	2021	DT	Comportament diferencial en mercats de capital d'empreses sostenibles. Una mirada a les empreses emissores de bons verds	Jorge Sanz González
Abr	2021	NT	Carteres òptimes alternatives a la de mínima volatilitat de Markowitz	Laura Valls Sanchis
Feb	2021	DT	Megatendències i temàtiques en carteres de renda variable	David Cano y Francisco Lomba
Feb	2021	DT	Riscos relacionats amb el clima i mediambientals: una introducció a les expectatives supervisors i al risc	Arturo Fraile Izquierdo
Nov	2020	NT	Nuevos indicadores económicos para una nueva era	Diego Isabel La Moneda
Oct	2020	NT	Aspectos legales de las ISR a las entidades de capital de riesgo	Alex Plana Paluzie
Jul	2020	NT	Dark Pools and High Frequency Trading: A Brief Note	Anna Bayona
Jun	2020	DT	Los emisores soberanos ante la revolución sostenible	Andrés Alonso
Jun	2020	NT	El impuesto español sobre transacciones financieras, una medida alejada de la Tasa Tobin	Jordi Pey Nadal
May	2020	DT	¿Cómo valorar una start-up y qué métodos de valoración son más adecuados?	Roger Martí Bosch
Mar	2020	NT	Libra: ¿La moneda que puede cambiar el futuro del dinero?	Miguel otero Iglesias
Dic	2019	NT	¿Cómo puede un inversor particular implementar una estrategia sencilla y barata en factores? ¿Qué puede esperar de ella?	Ferran Capella Martínez
Dic	2019	DT	Una nota sobre la valoración de cross currency swaps	Lluís Navarro i Girbés
Nov	2019	DT	Criptoactivos: naturaleza, regulación y perspectivas	Víctor Rodríguez Quejido
Oct	2019	NT	¿Qué valor aportan al asesoramiento financiero los principales insights puestos de manifiesto por la behavioral economics?	Óscar de la Mata Guerrero
Jul	2019	NT	El MARF y su positivo impacto en el mercado financiero actual	Aitor Sanjuan Sanz
Jun	2019	NT	Las STO: ¿puede una empresa financiarse emitiendo tokens de forma regulada?	Xavier Foz Giralt
Abr	2019	NT	Criterios de selección para formar una cartera de inversión basada en empresas del Mercado Alternativo Bursátil (MAB)	Josep Anglada Salarich
Mar	2019	DT	Limitaciones del blockchain en contratación y propiedad	Benito Arruñada
Feb	2019	NT	MREL y las nuevas reglas de juego para la resolución de entidades bancarias	Francisco de Borja Lamas Peña

Dic	2018	DT	Principios éticos en el mundo financiero	Antonio Argandoña y Luís Torras
Nov	2018	NT	Inversión socialmente responsable 2.0. De la exclusión a la integración	Xosé Garrido
Nov	2018	NT	Transformación de los canales de intermediación del ahorro. El papel de las fintech. Una especial consideración a los <<robo advisors>>	David Cano Martínez
Oct	2018	DT	La Crisis Financiera 2007-2017	Aristóbulo de Juan
Jul	2018	NT	Evolución del Equity Crowdfunding en España, 2011-2017	Marc Montemar Parejo y Helena Benito Mundet
Jul	2018	NT	Demografía, riesgo y perfil inversor. Análisis del caso español	Javier Santacruz Cano
Jun	2018	NT	Gestión financiera del riesgo climático, un gran desconocido para las las empresas españolas	Ernesto Akerman Brugés
May	2018	NT	Las SOCIMI: ¿Por qué se han convertido en el vehículo estrella del sector inmobiliario?	Pablo Domenech
Mar	2018	NT	Desequilibrios recientes en TARGET2 y sus consecuencias en la balanza por cuenta corriente	Eduardo Naranjo
Ene	2018	NT	La Segunda Directiva de Servicios de Pago y sus impactos en el mercado	Javier Santamaría
Dic	2017	DT	“Factor investing”, el nuevo paradigma de la inversión	César Muro Esteban
Nov	2017	NT	La implantación de IFRS9, el próximo reto de la banca europea	Francisco José Alcalá Vicente
Oct	2017	NT	El Marketplace Lending: una nueva clase de activo de inversión	Eloi Noya
Oct	2017	NT	Prácticas de buen gobierno corporativo y los inversores institucionales	Alex Bardají
Set	2017	NT	El proceso de fundrasing: Como atraer inversores para tu Startup	Ramón Morera Asiain
Jun	2017	NT	Clases de ETF según su método de réplica de benchmarks y principales riesgos a los que están sujetos los inversores, con especial foco en el riesgo de liquidez	Josep bayarri Pitchot
May	2017	NT	Las consecuencias económicas de Trump. Análisis tras los cien primeros días	L.B. De Quirós y J. Santacruz
Mar	2017	DT	Indicadores de coyuntura en un nuevo entono económico	Ramon Alfonso
Ene	2017	NT	La protección del inversor en las plataformas de crowdfunding vs productos de banca tradicional	Álex Plana y Miguel Lobón
Oct	2016	NT	Basilea III y los activos por impuestos diferidos	Santiago Beltrán
Sep	2016	DT	El Venture Capital como instrumento de desarrollo económico	Ferran Lemus
Jul	2016	DT	MAB: una alternativa de financiación en consolidación	Jordi Rovira
Jun	2016	NT	Brasil, un país de futuro incierto	Carlos Malamud
May	2016	DT	La evolución de la estrategia inversora de los Fondos Soberanos de Inversión	Eszter Wirth
Abr	2016	DT	Shadow Banking: Money markets odd relationship with the law	David Ramos Muñoz
Mar	2016	DT	El papel de la OPEP ante los retos de la Nueva Economía del Petróleo	José MªMartín-Moreno
Feb	2016	NT	Guerra de divisas: los límites de los tipos de cambio como herramienta de política económica. Un análisis a partir de los ICM	David Cano
Ene	2016	DT	1+1=3 El poder de la demografía. UE, Brasil y México (1990-2010): demografía, evolución socioeconómica y consecuentes oportunidades de inversión	Pere Ventura Genescà
Nov	2015	DT	¿Un reto a las crisis financieras? Políticas macroprudenciales	Pablo Martínez Casas
Oct	2015	NT	Revitalizando el mercado de titulaciones en Europa	Rosa Gómez Churruca y Olga I.Cerqueira de Gouveia
Abr	2015	NT	Ganancias de competitividad y deflación es España	Miguel Cardoso Lecourtois
Ene	2015	DT	Mercado energético mundial: desarrollos recientes e implicaciones geoestratégicas	Josep M. Villarrúbia
Dic	2014	DT	China's debt problem: How worrisome and how to deal with it?	Alicia García y Le Xía

Nov	2014	NT	Crowdequity y crowdlending: ¿fuentes de financiación con futuro?	Pilar de Torres
Oct	2014	NT	El bitcoin y su posible impacto en los mercados	Guillem Cullerés
Sep	2014	NT	Regulación EMIR y su impacto en la transformación del negocio de los derivados OTC	Enric Ollé
Mar	2014	DT	Finanzas islámicas: ¿Cuál es el interés para Europa?	Celia de Anca
Dic	2013	DT	Demografía y demanda de vivienda: ¿En qué países hay un futuro mejor para la construcción?	José María Raya
Nov	2013	DT	El mercado interbancario en tiempos de crisis: ¿Las cámaras de compensación son la solución?	Xavier Combis
Sep	2013	DT	CVA, DVA y FVA: impacto del riesgo de contrapartida en la valoración de los derivados OTC	Edmond Aragall
May	2013	DT	La fiscalidad de la vivienda: una comparativa internacional	José María Raya
Abr	2013	NT	Introducción al mercado de derivados sobre inflación	Raúl Gallardo
Abr	2013	NT	Internacionalización del RMB: ¿Por qué está ocurriendo y cuáles son las oportunidades?	Alicia García Herrero
Feb	2013	DT	Después del dólar: la posibilidad de un futuro dorado	Philipp Bagus
Nov	2012	NT	Brent Blend, WTI... ¿ha llegado el momento de pensar en un nuevo petróleo de referencia a nivel global?	José M.Domènech
Oct	2012	L	Arquitectura financiera internacional y europea	Anton Gasol
Sep	2012	DT	El papel de la inmigración en la economía española	Dirk Godenau
Jun	2012	DT	Una aproximación al impacto económico de la recuperación de la deducción por la compra de la vivienda habitual en el IRPF	José María Raya
Abr	2012	NT	Los entresijos del Fondo Europeo de Estabilidad Financiera (FEEF)	Ignacio Fernández
Mar	2012	M	La ecuación general de capitalización y los factores de capitalización unitarios: una aplicación del análisis de datos funcionales	César Villazon y Lina Salou
Dic	2011	NT	La inversión socialmente responsable. Situación actual en España	M ^a Ángeles Fernández Izquierdo
Dic	2011	NT	Relaciones de agencia e inversores internacionales	Aingeru Sorarrin y Olga del Orden
Oct	2011	NT	Las pruebas de estrés. La visión de una realidad diferente	Ricard Climent
Jun	2011	DT	Derivados sobre índices inmobiliarios. Características y estrategias	Rafael Hurtado
May	2011	NT	Las pruebas de estrés. La visión de una realidad diferente	Ricard Climent
Mar	2011	NT	Tierras raras: su escasez e implicaciones bursátiles	Alejandro Scherk
Dic	2010	NT	Opciones reales y flujo de caja descontado: ¿Cuándo utilizarlos?	Juan Mascareñas y Marcelo Leporati
Nov	2010	NT	Cuando las ventajas de TIPS son superada por las desventajas: el caso argentino	M. Belén Guercio
Oct	2010	DT	Introducción a los derivados sobre volatilidad: definición, valoración y cobertura estática	Jordi Planagumà
Jun	2010	DT	Alternativas para la generación de escenarios para el stress testing de carteras de riesgo de crédito	Antoni Vidiella
Mar	2010	NT	La reforma de la regulación del sistema financiero internacional	Joaquín Pascual Cañero
Feb	2010	NT	Implicaciones del nuevo Real Decreto 3/2009 en la dinamización del crédito	M. Elisa Escolà y Juan Carlos Giménez
Feb	2010	NT	Diferencias internacionales de valoración de activos financieros	Margarita Torrent
Ene	2010	DT	Heterodoxia Monetaria: la gestión del balance de los bancos centrales en tiempos de crisis	David Martínez Turégano
Ene	2010	DT	La morosidad de banco y cajas: tasa de morosidad y canje de créditos por activos inmobiliarios	Margarita Torrent
Nov	2009	DT	Análisis del TED spread la trascendencia del riesgo de liquidez	Raül Martínez Buixeda