



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Análisis del funcionamiento del modelo DICE y su aplicación a la economía del cambio climático

Trabajo realizado por:

Mario Ruiz Velasco

Dirigido:

Pedro Díaz Simal

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería
de Caminos, Canales y Puertos**

Santander, Septiembre de 2017

TRABAJO FINAL DE MASTER

RESUMEN

Título: “Análisis del funcionamiento del modelo DICE y su aplicación a la economía del cambio climático”

Autor: Mario Ruiz Velasco

Director: Pedro Díaz Simal

Convocatoria: Septiembre, 2017

Palabras clave: modelo DICE, Nordhaus, Análisis coste-beneficio, análisis de escenarios, modelo neoclásico, Ramsey, IAMs, cambio climático, economía.

“El calentamiento en el sistema climático es inequívoco”. Así resumió el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 2014 su Quinto Informe de Evaluación sobre el cambio climático.

En las últimas décadas, la constante búsqueda del crecimiento económico y el consumo indiscriminado de recursos energéticos por parte de la sociedad ha alterado el equilibrio climático del planeta, generando consecuencias globales que afectan a diferentes áreas, tanto económicas como sociales.

Por ello, el cambio climático es el tema de política más discutible, polémico y urgente de nuestro tiempo. Los responsables políticos se enfrentan a grandes desafíos al decidir cuándo y cómo responder. La incertidumbre científica sobre la dinámica y las consecuencias del cambio climático impide que los tomadores de decisiones sean capaces de comprender completamente los impactos prácticos de las opciones alternativas de mitigación y adaptación.

Los problemas son graves y además las soluciones son a largo plazo. En ese caso, se ha de construir escenarios de análisis en que contrastar la eficiencia de las medidas. Para construir escenarios consistentes, se construyen modelos razonablemente representativos.

Desde principios de los 90, cuando el cambio climático apareció en la agenda política, los modelos integrados de evaluación (IAMs, sus siglas en inglés) del cambio climático global se han convertido en herramientas estándar para apoyar la política climática. Los IAMs son modelos informáticos que combinan representaciones de sistemas biofísicos y sistemas socioeconómicos. Se utilizan para simular las causas, la dinámica y los impactos del cambio climático. Mientras que los IAMs son típicamente desarrollados por científicos, su propósito explícito es generar información relevante para la política.

Los IAMs necesariamente incluyen suposiciones y simplificaciones sobre cómo funciona el sistema climático, así como la interacción de variables demográficas, políticas y económicas. Es esencial, si los IAMs ayudan efectivamente a dar forma a la política de cambio climático, que estas suposiciones subyacentes así como los insumos del modelo sean explícitos. Sólo entonces se puede probar la solidez y el significado de sus resultados

El concepto económico más importante en la economía del cambio climático es el costo social del carbono (SCC, sus siglas en inglés). Este término designa el costo económico causado por una tonelada adicional de emisiones de dióxido de carbono o su equivalente.

Las estimaciones cuantitativas de SCC utilizadas en la elaboración de normas gubernamentales provienen de modelos de evaluación integrados (IAMs). Según William Nordhaus, el creador del primer IAM, (el modelo DICE), hay tres modelos que son la base de prácticamente todas las estimaciones:

- Uno de ellos es el modelo DICE, desarrollado por el propio William Nordhaus.
- Un segundo es el modelo PAGE, que se originó con el trabajo de Chris Hope de la Universidad de Cambridge.
- El tercero es el modelo FUND, desarrollado por Richard Tol, de la Universidad de Sussex, junto con David Anthoff de la Universidad de California.

En este estudio se tratará de analizar el funcionamiento del modelo DICE y su aplicación a la economía del cambio climático. Para poder trabajar con el modelo es necesario conocer y comprender las suposiciones subyacentes así como los insumos del mismo. También se analizarán las ecuaciones que conducen al modelo para poder comprender los mecanismos responsables de las proyecciones y predicciones. Para ello, se ha realizado un análisis del modelo a través de su modelo en Excel.

El modelo desarrollado por Nordhaus (1991) hace más de dos décadas fueron los primeros intentos de integrar la ciencia climática con los efectos económicos de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

El modelo DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy model) es un modelo analítico y empírico simplificado desarrollado por William Nordhaus que integra la economía, el ciclo del carbono, la ciencia climática y los impactos en un modelo altamente agregado que permite pesar los costos y beneficios de tomar pasos para reducir el calentamiento del invernadero.

Considera el cambio climático en el marco de la teoría del crecimiento económico. En un modelo neoclásico estándar de crecimiento óptimo conocido como el modelo de Ramsey, las economías realizan inversiones en capital, educación y tecnologías, reduciendo así el consumo en la actualidad, con el fin de aumentar el consumo en el futuro.

El modelo se divide tres bloques o módulos de ecuaciones:

- Función de bienestar: es la función objetivo del modelo, la función a maximizar. Esto se debe a que el supuesto fundamental que adopta el modelo es que las

políticas deben ser diseñadas para maximizar el nivel de consumo ahora y en el futuro.

- Bloque económico: la maximización de la función objetivo está sujeta a una serie de restricciones económicas. El modelo DICE considera la economía del cambio climático desde la perspectiva de la teoría neoclásica del crecimiento económico mediante el modelo de Ramsey.
- Bloque geofísico: El modelo DICE incluye varias relaciones geofísicas que relacionan la economía con las diferentes fuerzas que afectan al cambio climático. Estas relaciones incluyen las emisiones totales, el ciclo del carbono, una ecuación de forzamiento radiativo y ecuaciones de cambio climático.

Una vez definido el esquema del modelo, se han analizado todas las variables y parámetros del mismo, indicando sus hipótesis y sus fuentes de información.

Comprendido el funcionamiento del modelo, el siguiente paso ha sido realizar una discusión del mismo. Se han hecho unas críticas a las hipótesis que más controversia creaban, con el fin de saber las limitaciones del modelo y las perturbaciones que creaban al mismo.

A continuación, se ha ejecutado el modelo y se han discutido los resultados. Se corrieron cinco escenarios diferentes:

- Escenario Base.
- Escenario Óptimo.
- Escenario Acuerdo de París:
 - Limitación del aumento de la temperatura global a 2°C.
 - Limitación de las emisiones al 50% en el año 2050 respecto a los niveles de 1990.
 - Limitación de las emisiones al 50% en el año 2050 respecto a los niveles de 1990 con la salida de EEUU del Acuerdo.

Por último, tras analizar el modelo, ejecutarlo y discutir sus resultados se han llegado a una serie de conclusiones. Entre las más importantes se pueden citar:

- La estructura, las ecuaciones, los datos y los parámetros del modelo tienen elementos inciertos. Además, debido a que el modelo incorpora proyecciones a largo plazo de fenómenos mal entendidos, los resultados deben ser vistos como una tendencia a un error creciente a medida que las proyecciones avanzan hacia el futuro.
- Una segunda conclusión, relacionada con la primera, es que el modelo DICE no es más que un enfoque para comprender las cuestiones económicas y de política relacionadas con el calentamiento global. Es decir, Nordhaus no pretende ser certero, sino ser consistente.
- Por último, el modelo ha servido para evaluar distintas propuestas, por lo que ha sido de aplicación. Se debe de tener claro que ninguna política se presenta como un modelo medioambiental que promulga cánones infalibles que serán religiosamente seguidos por todos. Aunque unas políticas sean mejores que otras, sean más eficientes, están condicionadas por las hipótesis subyacentes del modelo. Por lo tanto,

una trayectoria política será la mejor para esta economía teórica, para estas condiciones teóricas.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- Acosta, Bethencourt, Marrero, & Perera. (2012). *El modelo Neoclásico con tasa de ahorro endógena*.
- Gillingham, K., Nordhaus, W., Anthoff, D., Blanford, G., Bosetti, V., Christensen, P., y otros. (2015). *Modeling Uncertainty in Climate Change: a Multi-Model Comparison*. New Haven.
- Metcalf, G., & Stock, J. (2015). *The Role of Integrated Assessment Models in Climate Policy*.
- Nordhaus, W. (1994). *Managing the global commons " The economics of climate change"*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Nordhaus, W. (2008). *A Question of Balance*. New Haven & London: Yale University Press.
- Nordhaus, W. (2017). *Revisiting the social cost of carbon*. National Academics of Science.
- Nordhaus, W., & Boyer, J. (2000). *Warming the world*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Nordhaus, W., & Sztorc, P. (2013). *DICE 2013R: Introduction and User's Manual*.
- Tol, R. S. (s.f.). *Economic impacts of climate change*.
- Trausury, H. (2003). *The Green Book*. London.
- Zuluaga, B., & Raffo, L. (2008). *Optimización dinámica y modelos de crecimiento con consumo óptimo: Ramsey-Cass-Koopmans*.

ABSTRACT

Title: “DICE model working analysis and its applicableness to climate change economy”

Author: Mario Ruiz Velasco

Director: Pedro Díaz Simal

Call: September, 2017

Keywords: DICE model, Nordhaus, cost-gain analysis, analysis of frameworks, neoclassical model, Ramsey, IAMs, climate change, economy.

“Global warming is unmistakeable”. That’s how IPPC summed up its Fifth climate change review report back in 2014.

In the last decades, finding economic increase and indiscriminate consumption by society have changed the climatic balance of planet Earth, bringing many global consequences that affect to different areas, both economic and social.

That’s why climate change is the main politic matter nowadays. Political leaders are facing pretty big challenges in order to know when and how to respond. The scientists’s doubt about climate change dynamic and consequences prevent them from completely know the impacts of other relief and adjustment options.

Problems are pretty serious and, furthermore, every solution is long term. In this case, analysis framework must be setted up to check the efficiency of any taken action, and these have to be representative.

Since early 90’s, when climate change first showed up in political agenda, IAMs (integration action model) have become the basic way to support the climate policy. IAMs are computer models that mix both biophysical and socioeconomic systems depiction. They are used to simulate climate changes reasons, dynamics and impacts, and their main purpose is making politically relevant data.

IAMs include guessings about how physic weather system works, as well as demographic, political and economic variables interplay. These guessings must be explicit. That is when we can check the consistency and the meaning of its results.

The main economic concept in climate change economy is SCC (th social carbon cost). This term means the money cost made by extra carbon dioxide emission ton or its equivalent.

SCC quantitative estimation used to elaborate government rules come from IAMs. As the first IAM creator, William Nordhaus, says, there are three models that are the base of all estimation:

- DICE model, developed by William Nordhaus.
- PAGE model, originated by Chris Hope (University of Cambridge).

- FUND model, developed by Richard Tol (University of Sussex) along with David Anthoff (University of California).

This research will try to analyse the DICE model in order to thoroughly know it as well as get to work with it. To get started, a DICE model analysis has been made through its Excell model.

The model developed by Nordhaus (1991) was the very first try to integrate climate science with GHG (greenhouse gases) emissions economic effects.

DICE model is an analytic and empirical one developed by William Nordhaus that mixes economy, the carbon cycle, weather science and the impacts in a highly mixed model that allows to count the cost and gain of taking the steps to reduce greenhouse warming.

It considers climate change within the framework of economic growth theory. In a neoclassical positive growth standard known as Ramsey Model, economics carry out capital, education and technology invest, with the purpose of rising consumption in the future.

This model has three modules:

- Welfare function: is the main goal function, the maximize function. The model fundamental assumption is politics must be designed to maximize the consumption level now and within the future.
- Economic block: maximizing the welfare function depends on a series of economic constraints. DICE model considers climate change economy from the neoclassical economic growth theory view through Ramsey model.
- Geophysical block: DICE model includes some geographic bind that links up economy with some different strength that affect to climate change. This links include the total emissions number, carbon cycle, a radiative forcing equation and climate change equations.

Once the model sketch is set up, every variable and parameter has been analyzed, naming its hypothesis and data source.

Once understood how the model works, the next step has been to discuss its hypothesis, in order to know the limits of the model and how the different hypothesis affected the model.

Five different frameworks were executed:

- Base framework.
- Optimal framework.
- Paris Agreement framework:
 - Global temperature increase limit to 2°C.
 - Emissions limit to 50% in 2050 compared to 1990 levels.
 - Emissions limit to 50% in 2050 compared to 1990 levels after EEUU being getting out the Agreement.

By last, after analyzing the model, executing and discussing it, they have come to some conclusions:

- Its structure, equations, data and parameters have uncertain elements. Furthermore, due to the model has some long term misunderstood acts, result must be seen as a growing error tendency as projections move forward.
- DICE model is just a way to understand economic and political issues related to global warming. This means Nordhaus doesn't want to be accurate but steady.
- Finally, the model has served to evaluate different proposals, so it has been applied. It should be clear that no policy is presented as an environmental model that promulgates infallible canons that will be religiously followed by all. Although some policies are better than others, more efficient, they are conditioned by the underlying assumptions of the model. Therefore, a political trajectory will be the best for this theoretical economy, for these theoretical conditions.

BASIC BIBLIOGRAPHY

- Acosta, Bethencourt, Marrero, & Perera. (2012). *El modelo Neoclásico con tasa de ahorro endógena*.
- Gillingham, K., Nordhaus, W., Anthoff, D., Blanford, G., Bosetti, V., Christensen, P., y otros. (2015). *Modeling Uncertainty in Climate Change: a Multi-Model Comparison*. New Haven.
- Metcalf, G., & Stock, J. (2015). *The Role of Integrated Assessment Models in Climate Policy*.
- Nordhaus, W. (1994). *Managing the global commons " The economics of climate change"*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Nordhaus, W. (2008). *A Question of Balance*. New Haven & London: Yale University Press.
- Nordhaus, W. (2017). *Revisiting the social cost of carbon*. National Academics of Science.
- Nordhaus, W., & Boyer, J. (2000). *Warming the world*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Nordhaus, W., & Sztorc, P. (2013). *DICE 2013R: Introduction and User's Manual*.
- Tol, R. S. (s.f.). *Economic impacts of climate change*.
- Trausury, H. (2003). *The Green Book*. London.
- Zuluaga, B., & Raffo, L. (2008). *Optimización dinámica y modelos de crecimiento con consumo óptimo: Ramsey-Cass-Koopmans*.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. ¿Qué es realmente el efecto invernadero?	7
1.1.1. El ciclo del carbono.....	8
1.1.2. Aportes antropogénicos.....	8
1.2. ¿Qué problemas puede causar el cambio climático?	9
1.3. Políticas frente al cambio climático.....	10
1.3.1. El coste social del carbono	10
1.4. Modelos Integrados de Evaluación (IAMs).....	14
1.4.1. IAMs y el uso del SCC en las políticas climáticas.....	15
2. OBJETO DEL PROYECTO	18
3. MODELO DICE.....	19
3.1. ¿Quién es William Nordhaus?.....	21
4. DESCRIPCIÓN DE LOS MÓDULOS DEL MODELO	23
4.1. Función de bienestar	23
4.1.1. Variables de la función de bienestar	24
4.1.2. Variables datos y resultado	26
4.2. Módulo económico.....	27
4.2.1. Variables del módulo económico.....	27
4.2.2. Variables dato y resultado	29
4.3. Módulo geofísico.....	29
4.3.1. Variables del módulo geofísico.....	29
4.3.2. Variables dato y resultado	32
4.4. Esquema final de los flujos	33
5. DESARROLLO DEL MODELO DICE.....	34
5.1. Función objetivo.....	34
5.1.1. Función de utilidad instantánea	34
5.1.2. Tasa de descuento.....	42
5.2. Ecuaciones económicas.....	47
5.2.1. Producción.....	48
5.2.2. Consumo	78

5.3.	Ecuaciones geofísicas.....	79
5.3.1.	Emisiones totales	80
5.3.2.	Modelo climático	81
5.4.	Coste social del carbono	88
6.	RESUMEN ECUACIONES DEL MODELO	90
7.	VARIABLES Y PARÁMETROS DEL MODELO DICE	92
8.	ANÁLISIS CRÍTICO DE LA CONSISTENCIA DE LAS HIPÓTESIS	95
8.1.	Elasticidad de la utilidad marginal del consumo.....	95
8.2.	Función de daño.....	96
8.3.	Tasa de descuento de bienes.....	98
8.4.	Sensibilidad climática.....	101
8.5.	Tasa de crecimiento de la productividad total de los factores.....	102
8.6.	La tasa de descarbonización	104
8.7.	El coste de la tecnología de backstop.....	105
8.8.	La fracción de retención atmosférica de CO ₂	106
8.9.	Inconsistencia ente el crecimiento de la población y el crecimiento de la función de daños	107
8.10.	Inconsistencia entre el crecimiento del PIB y el crecimiento de los daños climáticos	107
9.	RESULTADOS	108
9.1.	Escenarios.....	108
9.1.1.	Escenario Base	108
9.1.2.	Escenario Óptimo.....	108
9.1.3.	Escenario Acuerdo de París	109
9.2.	Vista general de los resultados	111
9.2.1.	Controles de emisiones, el costo social del carbono y los precios del carbono	116
9.2.2.	Emisiones, concentraciones y cambio climático.....	119
9.2.3.	Otras variables económicas.....	123
10.	CONCLUSIONES.....	126
11.	CONCLUSIONES PEDAGÓGICAS	128
12.	BIBLIOGRAFÍA	130

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MÓDULOS Y ENTRADAS/SALIDAS DE UN IAM GENÉRICO.....	16
FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA ESTRUCTURA LÓGICA DEL MODELO DICE.....	20
FIGURA 3. ESQUEMA DE LOS MÓDULOS DEL MODELO DICE.....	23
FIGURA 4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FUNCIÓN DE BIENESTAR.....	25
FIGURA 5. DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÓDULO ECONÓMICO.....	27
FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÓDULO GEOFÍSICO.....	30
FIGURA 7. ESQUEMA DEL PROCESO DE LOS CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA.....	31
FIGURA 8. DIAGRAMA DE FLUJO COMPLETO DEL MODELO DICE.....	33
FIGURA 9. REPRESENTACIÓN DE LA FUNCIÓN DE UTILIDAD.....	35
FIGURA 10. REPRESENTACIÓN DE LA FUNCIÓN DE POBLACIÓN.....	36
FIGURA 11. REPRESENTACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN.....	37
FIGURA 12. FUNCIÓN DE UTILIDAD PARA $A=0$	38
FIGURA 13. FUNCIÓN DE UTILIDAD PARA $A=\infty$	39
FIGURA 14. REPRESENTACIÓN DE LA UTILIDAD CON DIFERENTES A	40
FIGURA 15. REPRESENTACIÓN DE DIFERENTES SOCIEDADES CON LA ELASTICIDAD MARGINAL.....	41
FIGURA 16. TASA DE DESCUENTO DEL CONSUMO EN EL ESCENARIO BASE.....	47
FIGURA 17. PRODUCTIVIDAD DEL TRABAJO.....	52
FIGURA 18. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DEL TRABAJO.....	52
FIGURA 19. PRODUCTIVIDAD DEL CAPITAL.....	54
FIGURA 20. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DEL CAPITAL.....	54
FIGURA 21. STOCK DE CAPITAL CON DIFERENTES α	57
FIGURA 22. FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN.....	59
FIGURA 23. CRECIMIENTO DE LA FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN.....	59
FIGURA 24. CURVA DE APRENDIZAJE.....	60
FIGURA 25. FUNCIÓN PTF.....	62
FIGURA 26. CRECIMIENTO DE LA PTF.....	62
FIGURA 27. AFECCIÓN DE Δ AL CRECIMIENTO DE LA PTF.....	63
FIGURA 28. STOCK DE CAPITAL.....	64
FIGURA 29. TRAYECTORIA DE LA TASA DE AHORRO.....	66
FIGURA 30. FUNCIÓN DE DAÑOS CLIMÁTICOS.....	67
FIGURA 31. FUNCIÓN DE COSTE DE LA REDUCCIÓN.....	68
FIGURA 32. PRECIO DE LA TECNOLOGÍA BACKSTOP.....	71
FIGURA 33. INTENSIDAD DEL CO_2 EN EL TIEMPO (FUENTE: “QUESTION OF BALANCE”, NORDHAUS.).....	72
FIGURA 34. SENDA ÓPTIMA DEL PRECIO.....	74
FIGURA 35. TASA DE CONTROL DE EMISIONES (ESCENARIO BASE).....	75
FIGURA 36. COSTES DE REDUCCIÓN (ESCENARIO BASE).....	75
FIGURA 37. TASA DE CONTROL EN ESCENARIO 50 % DE REDUCCIÓN EN 2050.....	76
FIGURA 38. COSTES DE REDUCCIÓN EN ESCENARIO 50 % DE REDUCCIÓN EN 2050.....	76
FIGURA 39. PRECIO DEL CO_2 INFLUENCIADO.....	78
FIGURA 40. EMISIONES POR CAMBIO DE USO DE LA TIERRA.....	81
FIGURA 41. ESQUEMA DEL CICLO DEL CARBONO.....	82
FIGURA 42. FORZAMIENTOS EXÓGENOS.....	86
FIGURA 43. ELASTICIDAD DE LA UTILIDAD MARGINAL DEL CONSUMO.....	96
FIGURA 44. SENSIBILIDAD DE LA ECUACIÓN DE DAÑOS AL PARÁMETRO ψ_1	97
FIGURA 45. COMPARACIÓN TASAS DE DESCUENTO.....	99

FIGURA 46. COSTES TOTALES A LO LARGO DEL TIEMPO CON DIFERENTES TASAS DE DESCUENTO	100
FIGURA 47. DIFERENCIA ENTRE LOS COSTES POR LA VARIACIÓN DE LA TASA DE DESCUENTO	100
FIGURA 48. AUMENTO DE T^a PARA DISTINTOS VALORES DE LA SENSIBILIDAD CLIMÁTICA.....	102
FIGURA 49. PTF PARA DIFERENTES TASAS DE CRECIMIENTO	103
FIGURA 50. VARIACIÓN DE LA PRODUCCIÓN CON DISTINTOS VALORES DE LA TASA DE DECRECIMIENTO.....	103
FIGURA 51. VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD DE EMISIONES PARA DISTINTA TASA DE DESCARBONIZACIÓN.....	104
FIGURA 52. VARIACIÓN DE LAS EMISIONES INDUSTRIALES SEGÚN LA TASA DE DESCARBONIZACIÓN.....	105
FIGURA 53. VARIACIÓN DEL PRECIO DE LA TECNOLOGÍA BACKSTOP SEGÚN SU TASA DE DECRECIMIENTO.....	106
FIGURA 54. COMPARACIÓN DE LA FUNCIÓN DE BIENESTAR CON RESPECTO AL ESCENARIO BASE	115
FIGURA 55. COMPARACIÓN DE LOS COSTES TOTALES CON RESPECTO AL ESCENARIO BASE	115
FIGURA 56. TASA DE CONTROL DE EMISIONES	117
FIGURA 57. PRECIO DEL CARBONO	118
FIGURA 58. EMISIONES INDUSTRIALES DE CO_2	120
FIGURA 59. CONCENTRACIÓN ATMOSFÉRICA DE CO_2	121
FIGURA 60. AUMENTO DE LA T^a ATMOSFÉRICA.....	122
FIGURA 61. PRODUCCIÓN BRUTA GLOBAL.....	124
FIGURA 62. CONSUMO PER CÁPITA	124
FIGURA 63. TASA DE INTERÉS	125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. EMISIONES ANTROPOGÉNICAS DE CO ₂ (FUENTE: HTTPS://EARTHOBSERVATORY.NASA.GOV)	9
ILUSTRACIÓN 2. WILLIAM NORDHAUS	22
ILUSTRACIÓN 3. CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS (FUENTE: HTTPS://DIALNET.UNIRIOJA.ES).....	98

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. REGLAS PROPUESTAS O FINALES DONDE SE HA UTILIZADO EL SCC (FUENTE: (NORDHAUS, ESTIMATES OF THE SOCIAL COST OF CARBON, 2014))	13
TABLA 2. DATOS Y RESULTADOS DEL MÓDULO DE LA FUNCIÓN DE BIENESTAR.....	26
TABLA 3. DATOS Y RESULTADOS DEL MÓDULO ECONÓMICO.....	29
TABLA 4. DATOS Y RESULTADOS DEL MÓDULO GEOFÍSICO.....	32
TABLA 5. TASAS DE DESCUENTO A LARGO PLAZO SEGÚN "THE GREEN BOOK.....	99
TABLA 6. RESUMEN DIFERENTES ESCENARIOS.....	113
TABLA 7. COMPARACIÓN FRENTE AL ESCENARIO BASE	114
TABLA 8. COMPARACIÓN DE LOS ESCENARIOS FRENTE AL ESCENARIO ÓPTIMO.....	116
TABLA 9. TASA DE CONTROL DE EMISIONES.....	117
TABLA 10. PRECIO DEL CARBONO	118
TABLA 11. SCC	119
TABLA 12. EMISIONES INDUSTRIALES CO ₂	119
TABLA 13. CONCENTRACIÓN ATMOSFÉRICA DE CO ₂	120
TABLA 14. AUMENTO DE LA Tª ATMOSFÉRICA	121
TABLA 15. PRODUCCIÓN BRUTA.....	123
TABLA 16. CONSUMO PER CÁPITA	123
TABLA 17. TASA DE INTERÉS REAL.....	123

1. INTRODUCCIÓN

"El calentamiento en el sistema climático es inequívoco". Así resumió el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 2014 su Quinto Informe de Evaluación sobre el cambio climático.

En las últimas décadas, la constante búsqueda del crecimiento económico y el consumo indiscriminado de recursos energéticos por parte de la sociedad ha alterado el equilibrio climático del planeta, generando consecuencias globales que afectan a diferentes áreas, tanto económicas como sociales.

La contaminación ambiental reflejada en el aumento de temperatura global, el aumento del nivel del mar, la lluvia ácida, la sequía y otros problemas, es causada principalmente por las emisiones de CO₂ y otros gases a la atmósfera. La presencia del CO₂ se debe a la deforestación y la quema de combustibles fósiles como petróleo, carbón y gas natural. Del mismo modo, otros gases de efecto invernadero como el metano y el óxido nitroso son liberados por las prácticas agrícolas y la gestión de residuos, entre otras actividades.

1.1. ¿Qué es realmente el efecto invernadero?

Si no existiera la atmósfera, la temperatura media en el planeta sería de -20°C, incompatible con la vida tal y como la conocemos. Gracias a ella, nuestro planeta presenta una temperatura media de unos 15°C.

El fenómeno que permite comprender este incremento de más de 30°C de la temperatura media producido por la atmósfera terrestre, es el balance energético del planeta o, dicho de otro modo, la cantidad de energía que la atmósfera recibe y devuelve al espacio.

Si la Tierra recibiera más energía de la que pierde, estaría calentándose de forma continua, mientras que si perdiera una cantidad mayor que la recibida, estaría enfriándose de forma constante. Por lo tanto, es lógico pensar que para que la temperatura del planeta se mantenga constante es imprescindible que la cantidad de energía recibida sea igual a la cantidad emitida al exterior.

La mayor parte de la energía que llega a la Tierra lo hace en forma de radiación electromagnética proveniente del Sol, y la pérdida se produce hacia el espacio. El Sol emite radiación en todo el espectro electromagnético, pero la porción más significativa es la que comprende, de mayor a menor longitud de onda:

- Radiación infrarroja.
- Luz visible.
- Luz ultravioleta.

Al llegar la radiación a la Tierra proveniente del Sol, parte de la misma es reflejada por las nubes y aerosoles atmosféricos de vuelta al espacio, mientras que la otra parte atraviesa la atmósfera. La atmósfera, al estar compuesta por varios gases, no se comporta de igual forma con toda la radiación. Algunos gases como el O₂ y el N₂ son atravesados libremente, mientras

que otros como el CO_2 , el CH_4 o el vapor de agua son atravesados libremente por las longitudes de onda corta (luz ultravioleta y luz visible) pero absorben las de onda larga (radiaciones infrarrojas). De esta forma, la fracción infrarroja es absorbida en su paso a través de la atmósfera, calentándola.

La radiación que atraviesa libremente la atmósfera, al llegar a la superficie terrestre, una parte de la misma es reflejada de vuelta a la atmósfera y otra parte es absorbida por el suelo y los océanos. La porción absorbida calienta la superficie y se vuelve a emitir lentamente hacia la atmósfera en forma de radiación infrarroja. Al aumentar su longitud de onda, ahora puede ser absorbida por el CO_2 , vapor de agua y el CH_4 de la atmósfera, calentándola aún más.

En esto consiste el efecto invernadero, y por ello se denomina al CO_2 y a los otros gases capaces de absorber radiación infrarroja, “gases de efecto invernadero”. Gracias a ellos, la radiación que atravesó limpiamente la atmósfera en su llegada es atrapada cuando vuelve hacia el espacio, al haber aumentado su longitud de onda.

1.1.1. El ciclo del carbono

El carbono está presente en todo el medio ambiente en una cantidad fija. Toma muchas formas (estado gaseoso, líquido y sólido) y se mueve a través del medio ambiente a través del ciclo del carbono. El ciclo del carbono es el flujo de carbono a través de la atmósfera, océanos, biosfera terrestre, y litosfera.

Un aspecto importante del ciclo del carbono es la velocidad con la que el carbono se mueve de una fuente de carbono a un sumidero de carbono y viceversa. Mientras que una porción de la cantidad total de carbono presente en la tierra atraviesa el ciclo del carbono relativamente rápido, pasando del dióxido de carbono atmosférico a la materia vegetal y animal, y volviendo al dióxido de carbono atmosférico en centenas de años, otra porción del mismo es atrapada en sumideros duraderos y estables de carbono. Ejemplos de estos sumideros estables son los depósitos de hidrocarburos subterráneos a partir de los cuales se producen petróleo y gas, y los yacimientos de carbón.

Los ciclos de carbono rápido y lento mantienen una concentración relativamente constante de carbono en la atmósfera, la tierra, las plantas y el océano. Pero cuando algo cambia la cantidad de carbono en un depósito, el efecto se agita a través de los demás.

1.1.2. Aportes antropogénicos

Durante la mayor parte de la historia de la tierra, grandes cantidades de carbono permanecieron encerradas en los depósitos de carbón, petróleo y gas. Sin embargo, desde el comienzo de la era industrial, los seres humanos han explotado y quemado estos depósitos para obtener energía, liberando los compuestos de carbono a la atmósfera en forma de CO_2 y otros gases.

Debido a la actividad humana, se liberan cantidades significativas de compuestos de carbono a la atmósfera a un ritmo mucho más rápido de lo que habrían sido liberados naturalmente. Esta

liberación rápida es la causa principal del calentamiento global antropogénico (influenciado por el hombre) actualmente observado.

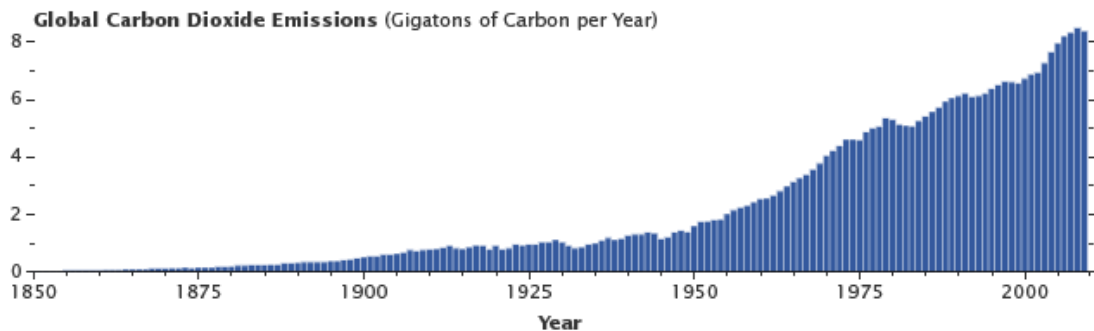


Ilustración 1. Emisiones antropogénicas de CO₂ (Fuente: <https://earthobservatory.nasa.gov>)

Este aumento repentino de la concentración de CO₂ en la atmósfera induce la respuesta del sistema para equilibrarlo, lo cual ya supone un importante impacto ambiental. Entre otros factores, un aumento de la temperatura media global y una mayor acidificación de los océanos debida a un mayor aporte de CO₂.

El problema es que no se sabe con exactitud hasta qué punto se mantendrá el equilibrio en los parámetros tolerables. Dicho de otra forma: no se sabe qué cantidad de emisiones es capaz de soportar el sistema sin alterar la temperatura media de una forma sensible. Si la emisión sigue aumentando, previsiblemente el equilibrio a corto plazo se irá desplazando hacia una temperatura mayor. Se ignora lo lejos que de lo que se está de los puntos de inestabilización del sistema.

El verdadero problema es que se desconoce hasta dónde puede llegar. A pesar de que las variaciones estimadas no son demasiado grandes ni rápidas, no se conoce si existe un punto crítico a partir del cual no sea capaz de mantenerse un balance neutro, y mucho menos donde se encuentra este punto de no retorno.

1.2. ¿Qué problemas puede causar el cambio climático?

El cambio climático está modificando nuestra economía, salud y comunidades de formas diversas. Los científicos advierten de que si no se pone el freno sustancialmente al cambio climático ahora, los resultados probablemente serán desastrosos. Si la Tierra se sigue calentando, algunos de los efectos derivados de ello serán:

1. Aumento del nivel del mar.
2. Olas de calor.
3. Tormentas asesinas.
4. Sequía.
5. Especies en extinción.

6. Enfermedades.
7. Desaparición de glaciares.
8. Guerras.
9. Inestabilidad económica.
10. Destrucción de ecosistemas.

En conjunto, cambios en el estado del sistema y aumento de la frecuencia de eventos extremos. El problema es que no se sabe la magnitud a la que podrían llegar estos efectos.

1.3. Políticas frente al cambio climático

El cambio climático es el tema de política más discutible, polémico y urgente de nuestro tiempo. Los responsables políticos se enfrentan a grandes desafíos al decidir cuándo y cómo responder. La incertidumbre científica sobre la dinámica y las consecuencias del cambio climático impide que los tomadores de decisiones sean capaces de comprender completamente los impactos prácticos de las opciones alternativas de mitigación y adaptación. Además, los diversos actores involucrados con el problema del cambio climático no están de acuerdo con los valores que deben guiar la política; incluso su encuadre básico como un problema político es políticamente disputado. Además, el riesgo de que los puntos de inflexión en el sistema climático puedan ser cruzados, desencadenando consecuencias irreversibles y posiblemente catastróficas, plantea la urgencia de tomar decisiones, lo cual aumenta el costo de equivocarse (Lenton y Ciscar, 2013).

Los problemas son graves y además las soluciones son a largo plazo. En ese caso, se han de construir escenarios de análisis en los que contrastar la eficiencia de las medidas. Para construir escenarios consistentes, se construyen modelos razonablemente representativos.

Desde principios de los 90, cuando el cambio climático apareció en la agenda política, los modelos integrados de evaluación (IAMs, sus siglas en inglés) del cambio climático global se han convertido en herramientas estándar para apoyar la política climática. Los IAMs son modelos informáticos que combinan representaciones de sistemas biofísicos y sistemas socioeconómicos. Se utilizan para simular las causas, la dinámica y los impactos del cambio climático. Mientras que los IAMs son típicamente desarrollados por científicos, su propósito explícito es generar información relevante para la política. Pero ante la incertidumbre y las disputas de valor, la construcción de IAMs requiere que los modeladores hagan suposiciones y opciones sustantivas.

Las IAMs son herramientas potencialmente poderosas, y los resultados de ellas ya han sido incorporados en los Informes de Evaluación del IPCC. Se analizarán en más detalle en los pasos siguientes.

1.3.1. El coste social del carbono

El concepto económico más importante en la economía del cambio climático es el coste social del carbono (SCC, sus siglas en inglés). Este término designa el coste económico causado por una tonelada adicional de emisiones de dióxido de carbono o su equivalente.

El SCC es importante para el diseño de políticas de cambio climático destinadas a reducir las emisiones de CO₂ porque el beneficio marginal de reducir las emisiones son los daños marginales evitados de las mismas. Los principios económicos básicos nos dicen que las políticas deben reducir las emisiones hasta que el beneficio marginal sea igual al costo marginal.

El SCC se ha convertido en una herramienta central utilizada en la política de cambio climático, particularmente en la determinación de políticas reguladoras que involucren emisiones de gases de efecto invernadero. Las estimaciones del SCC son necesariamente complejas porque involucren toda la gama de impactos de las emisiones, a través del ciclo del carbono y el cambio climático, e incluyen los daños económicos causados por el cambio climático. En la actualidad, existen pocos modelos de evaluación integrada (IAMs) que estén disponibles para la estimación de toda la trayectoria de causa y efecto y, por lo tanto, puedan calcular un SCC internamente consistente.

El informe de la Quinta Evaluación del IPCC observó que las estimaciones de SCC omiten varios impactos que probablemente aumentarían los daños. Los modelos utilizados para desarrollar estimaciones de SCC no incluyen actualmente todos los importantes impactos físicos, ecológicos y económicos del cambio climático reconocidos en la literatura sobre cambio climático debido a la falta de información precisa sobre la naturaleza de los daños y porque la ciencia incorporada en estos modelos naturalmente va un paso por detrás de la investigación más reciente. No obstante, las estimaciones actuales del SCC son una medida útil para evaluar los impactos climáticos de los cambios en las emisiones de CO₂.

Tal cuantificación sugiere que el SCC se derive de métodos económicos rigurosos, con una base sólida en la teoría y una evidencia empírica real sobre cómo el rendimiento económico se ve afectado negativamente por el aumento de los niveles atmosféricos de CO₂.

1.3.1.1. Aplicaciones actuales del SCC en las políticas de cambio climático

Las estimaciones del SCC son un ingrediente crítico en la política del cambio climático. Actualmente juegan dos papeles:

- En el nivel más amplio, proporcionan orientación sobre el nivel adecuado de control de emisiones o fijación de precios de carbono en las políticas de reducción de emisiones a nivel nacional o internacional.
- Una segunda aplicación es para la elaboración de normas cuando los países no cuentan con políticas integrales que cubran todos los GEI. En este contexto, los reguladores podrían utilizar el SCC en un cálculo de los costes y beneficios sociales de las políticas que involucren la energía o las decisiones que afectan el clima.

El cálculo del SCC por parte de economistas ha permitido a agencias federales como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) llevar a cabo análisis de coste-beneficio de las acciones regulatorias que reducen dichas emisiones. En EEUU, en enero de 2014, había 58 reglas propuestas o finales que han utilizado el SCC para calcular los beneficios. La Tabla 1

presenta una lista de reglamentos propuestos o definitivos para los Estados Unidos hasta 2012. Además de la agencia, la fecha y el nombre de la norma, la tabla muestra tanto los beneficios totales como la proporción de los beneficios totales derivados de la reducción de las emisiones de CO₂. La última columna muestra el porcentaje de beneficios monetizados totales que provienen de incluir beneficios climáticos. Aunque en la Tabla 1 solo se muestren los reglamentos de EEUU, se debe saber que también se han utilizado políticas paralelas en el Reino Unido y en la Unión Europea.

AGENCIA	NORMA	FECHA	Beneficios totales (Billones de \$)	Beneficios totales de CO2 (Billones de \$)	CO ₂ como participación de los Beneficios Monetizados Totales
EPA	Final Cross-State Air Pollution Rule (CSAPR)	8/8/2011	183.3	0,6	0,3
EPA/DOE	Final Light Duty Vehicle GHG Standards (2017–25)	10/15/2012	126.0	46.6	37,0
EPA/DOE	Final Light Duty Vehicle GHG Standards (2012–16)	5/7/2010	58.4	17.0	29,1
EPA	Final MATS Rule	2/16/2012	57.7	0,4	0,6
EPA	Final Boiler MACT (CO2 disbenefits)	12/20/2012	42.5	-0,0	-0,1
EPA	Proposed GHG Standards for New Stationary Source EGU	4/13/2012	21.4	11.0	51,3
EPA	Final Cement NESHAP/NSPS (CO2 disbenefits)	9/9/2010	11.5	0,0	0,2
DOE	Final ECS for Residential Refrigerators and Freezers	9/15/2011	9.9	9.0	91,0
EPA/DOE	Final Medium-Heavy Duty Vehicles GHG Standards	9/15/2011	7.3	5.7	78,1
DOE	Final ECS for Fluorescent Lamp Ballasts	11/14/2011	1.3	1.3	96,6
DOE	Final ECS for Residential Water Heaters	4/16/2010	0.2	0,2	95,3
DOE	Proposed ECS for Battery Chargers and External Power Supplies	3/27/2012	0,1	0,1	94,1
DOE	Final ECS for Small Electric Motors	4/9/2010	0,1	0,1	95,2
DOE	Final ECS for Residential Dishwashers	5/30/2012	0,1	0,1	96,6
EPA	Final Sewage Sludge Incinerators NSPS/Emissions Guidelines (CO2 disbenefits)	3/21/2011	0,0	-0,0	-0,3
EPA	Proposed (supplemental) NESHAP: Mercury Cell Chlor-Alkali Plants Amendments	3/14/2011	0,0	0,0	21,1

Tabla 1. Reglas propuestas o finales donde se ha utilizado el SCC (Fuente: (Nordhaus, Estimates of the Social Cost of Carbon, 2014))

Nota: EPA: Agencia de Protección Ambiental; DOT : Departamento de Transporte; DOE: Departamento de energía.

1.4. Modelos Integrados de Evaluación (IAMs)

Los IAMs poseen un fundamento matemático que logra representar interacciones complejas entre diferentes escalas espaciales y temporales, procesos y actividades (IPCC-WGI, 2007). Los IAMs proporcionan un esquema relativamente simple para abordar la problemática multidimensional de cambio climático, mediante la generación de escenarios posibles que asistan a la toma de decisiones y a la evaluación de políticas. Estos modelos producen información que difícilmente podría obtenerse con otros enfoques de evaluación y, por eso, han sido frecuentemente utilizados por diversas dependencias gubernamentales para evaluar los costes de los impactos del cambio climático y de las acciones para reducirlos. En su forma más general, estos modelos pueden incluir:

- Factores socioeconómicos, demográficos, tecnológicos, de producción y de consumo, que intervienen en la generación de emisiones de GEI.
- Representaciones simples de la bioquímica del ciclo de carbono y la química atmosférica que determinan las concentraciones atmosféricas de éstos y otros gases.
- Módulos simples de clima para estimar el forzamiento radiativo y los cambios en el clima global y regional.
- Módulos para estimar los impactos en sistemas biofísicos y en la economía regional y global.

Los IAMs son ampliamente utilizados para orientar la política climática y constituyen una de las pocas herramientas disponibles para analizar la economía de cambio climático a nivel global, regional e incluso, en escalas más finas de una manera en la que se mantiene la consistencia interna. El conjunto de IAMs disponible actualmente varía ampliamente en cuanto a sus objetivos, sectores y procesos que incluyen, nivel de detalle y complejidad de modelación, así como en su estructura y especificación.

Un IAM típico combina un modelo simple del sistema climático de la Tierra con una ciencia social o un modelo económico. Los IAMs necesariamente incluyen suposiciones y simplificaciones sobre cómo funciona el sistema de clima físico, así como la interacción de variables demográficas, políticas y económicas. Es esencial, si los IAMs ayudan efectivamente a dar forma a la política de cambio climático, que estas suposiciones subyacentes así como los insumos del modelo sean explícitos. Sólo entonces se puede probar la solidez y el significado de sus resultados. Igual de importante, las ecuaciones que conducen los IAMs deben especificarse para permitir a los usuarios comprender los mecanismos responsables de las proyecciones y predicciones del modelo. Esa transparencia debería ayudar a evitar la impresión de que los IAMs son “cajas negras”, cuyo funcionamiento interno es inescrutable, incluso para los expertos, para evaluar si las proyecciones del modelo son realistas.

Estos modelos pueden agruparse en dos grandes clases:

- Modelos de evaluación de políticas.
- Modelos de optimización de políticas.

El empleo de los modelos IAM como instrumento de evaluación de políticas conlleva generalmente a elaborar trayectorias consistentes y plausibles en que otorgar el comportamiento de las medidas en un entorno simulado.

Los modelos de optimización de políticas se plantean la configuración de un escenario de llegada óptimo, para lo cual requieren de una función objetivo que permita comparar la adecuación de las soluciones alternativas. En los modelos que tienen una estructura económica, la función objetivo es generalmente una medida del bienestar económico.

Estos dos enfoques no son tan diferentes como se podría suponer, ya que los modelos de optimización de políticas se pueden ejecutar en un modo sin políticas, mientras que los modelos de evaluación de políticas pueden comparar diferentes políticas con diversos escenarios, como el llamado Business as usual o escenario de base sin actuación para contar con una base de comparación. Se trata más de discutir si se aborda el problema con una óptica positiva: que puede ocurrir, o con una óptica normativa: qué debe ocurrir.

1.4.1. IAMs y el uso del SCC en las políticas climáticas

William Nordhaus (Manual DICE-2013) define los modelos integrados de evaluación como "enfoques que integran el conocimiento de dos o más dominios en un único marco". La definición de Nordhaus es amplia e incluye una variedad de modelos que, por sí mismos, no generan estimaciones del SCC. Los modelos que se pueden utilizar para estimar el SCC combinan un modelo de la economía con un modelo de la atmósfera y el océano que permite al investigador rastrear variables geofísicas y económicas de interés. Un IAM construido para abordar el cambio climático debe ser capaz de reconocer las emisiones, la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera así como la de otros sumideros de carbono, la temperatura y otros impactos climáticos derivados del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera y los daños resultantes de esos impactos climáticos.

Las emisiones se derivan del comportamiento económico y se pueden postular escenarios de políticas que afectan las emisiones a lo largo de varias generaciones. La Figura 1 ilustra los módulos (rectángulos) y las entradas / salidas modelo (cuadrados) de un IAM genérico. No todos los IAMs contienen todos los elementos de la Figura 1. Por ejemplo, no se tiene conocimiento de ningún IAM que contenga un módulo de respuesta política explícita que muestre cómo los responsables políticos reaccionan ante los daños causados por el cambio climático a través de acciones políticas que conducen a reducciones de emisiones.

Los IAMs típicamente modelan la respuesta política como parte de un escenario dado. Los escenarios de casos de referencia en los que no se adoptan medidas para abordar el cambio climático suponen una respuesta política implícita, mientras que los escenarios políticos óptimos plantean una respuesta política diferente que establece un precio implícito o explícito sobre las emisiones de gases de efecto invernadero a la tasa óptima.

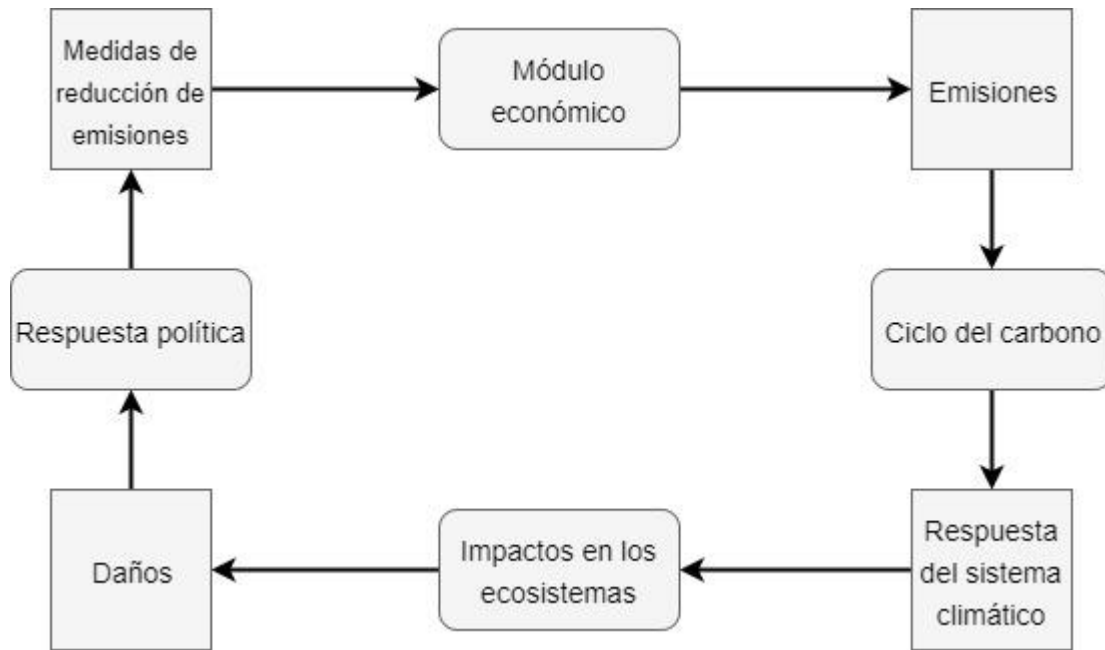


Figura 1. Módulos y entradas/salidas de un IAM genérico.

Las estimaciones cuantitativas de SCC utilizadas en la elaboración de normas gubernamentales provienen de modelos de evaluación integrados (IAMs). Según William Nordhaus, el creador del primer IAM, el modelo DICE), hay tres modelos que son la base de prácticamente todas las estimaciones:

- Uno de ellos es el modelo DICE, desarrollado por William Nordhaus.
- Un segundo es el modelo PAGE, que se originó con el trabajo de Chris Hope de la Universidad de Cambridge.
- El tercero es el modelo FUND, desarrollado por Richard Tol de la Universidad de Sussex, con David Anthoff de la Universidad de California.

1.4.1.1. Modelo DICE

El modelo DICE (Modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía) se desarrolló por primera vez alrededor de 1990 y ha pasado por varias extensiones y revisiones. El modelo DICE es un modelo agregado global que ve la economía del cambio climático desde la perspectiva de la teoría neoclásica del crecimiento económico. En este enfoque, las economías realizan inversiones en capital y reducciones de emisiones, reduciendo el consumo actual, con el fin de reducir los daños climáticos y aumentar el consumo en el futuro. La característica especial del modelo es la inclusión de todos los elementos principales de manera altamente agregada. El modelo contiene aproximadamente 25 ecuaciones e identidades dinámicas, incluyendo las de la producción global, las emisiones y concentraciones de CO₂, la temperatura media global y los daños. Se puede ejecutar en una versión de Excel o en una versión de GAMS.

1.4.1.2. Modelo FUND

El modelo del FUND (Marco Climático para la Incertidumbre, Negociación y Distribución) fue creado inicialmente por Richard Tol (Tol, 1997) para estudiar el papel de las transferencias internacionales de capital en la política climática, pero pronto se convirtió en un banco de pruebas para estudiar los impactos del cambio climático en un contexto dinámico. Ahora se utiliza para realizar análisis coste-beneficio y análisis de la eficacia en función de los costes de las políticas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, estudiar la equidad del cambio climático y la política climática y apoyar las investigaciones teóricas de los acuerdos internacionales sobre el medio ambiente.

El modelo tiene 16 regiones y contiene una representación explícita de cinco gases de efecto invernadero. Los impactos del cambio climático son monetizados e incluyen la agricultura, la silvicultura, el aumento del nivel del mar, los impactos en la salud, el consumo de energía, los recursos hídricos, los ecosistemas no administrados y los impactos de las tormentas. Cada sector de impacto tiene una forma funcional diferente y se calcula por separado para cada una de las 16 regiones. El modelo se ejecuta de 1950 a 3000 en pasos de tiempo de 1 año.

1.4.1.3. Modelo PAGE

El modelo PAGE (Análisis Político del Efecto Invernadero) de Chris Hope proyecta futuros aumentos de la temperatura media global, los costes económicos de los daños causados por el cambio climático y los costes económicos de las políticas de mitigación. Tiene una estructura económica relativamente simple, tomando la producción y las emisiones como exógenas con muchos períodos, países y sectores. Las principales innovaciones son los inventarios detallados de los gases de efecto invernadero; tratamiento en forma reducida de la química atmosférica de los gases; modelos climáticos globales y regionales simplificados, incluidos los aerosoles. Además, el modelo PAGE hace de la incertidumbre un foco central, con 31 variables inciertas (como la sensibilidad climática, la dinámica del ciclo del carbono, los impactos y los impactos discontinuos). La estructura de daños está altamente desarrollada, con umbrales catastróficos y discontinuidades bruscas introducidas probabilísticamente.

2. OBJETO DEL PROYECTO

Este estudio se centrará en el análisis del modelo DICE 2016. Se realizará un análisis a fondo del modelo, buscando conocer cómo funciona, cuáles son sus fuerzas motrices, sus datos de alimentación, sus hipótesis, etc.

Para ello se ha usado la última versión del modelo DICE-2016R, en su formato en Excel. La metodología seguida ha sido la siguiente:

- Análisis celda a celda del modelo.
- Comprensión del significado de cada una de las variables y parámetros.
- Identificación de las fuerzas motrices del modelo.
- Análisis de sus fuentes de alimentación.
- Análisis de las entradas y salidas del modelo.
- Análisis de las hipótesis del modelo.

Una vez comprendido el funcionamiento del modelo, se ha realizado una discusión sobre las hipótesis que presentan mayor controversia.

A continuación, se ha ejecutado el modelo y se han interpretado los resultados obtenidos.

Por último, se han realizado unas conclusiones, tanto del modelo como de lo aprendido con la realización de este análisis.

3. MODELO DICE

Como se ha comentado anteriormente, el modelo DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy model) es un modelo analítico y empírico simplificado desarrollado por William Nordhaus que integra la economía, el ciclo del carbono, la ciencia climática y los impactos en un modelo altamente agregado que permite pesar los costos y beneficios de tomar pasos para reducir el calentamiento del invernadero.

El modelo desarrollado por Nordhaus (1991) hace más de dos décadas fueron los primeros intentos de integrar la ciencia climática con los efectos económicos de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos modelos ayudaron a los economistas a comprender cómo las emisiones de GEI se acumulan en la atmósfera, cómo esta acumulación puede afectar a las temperaturas medias globales y cómo las temperaturas más altas podrían afectar al PIB y al consumo. Al incluir una función de bienestar social que valora el flujo de consumo a lo largo del tiempo, los modelos también pueden usarse para ilustrar los posibles efectos sobre el bienestar de diferentes políticas de reducción de GEI.

El modelo DICE considera el cambio climático en el marco de la teoría del crecimiento económico. En un modelo neoclásico estándar de crecimiento óptimo conocido como el modelo de Ramsey, las economías realizan inversiones en capital, educación y tecnologías, reduciendo así el consumo en la actualidad, con el fin de aumentar el consumo en el futuro. El modelo DICE extiende este enfoque al incluir el "capital natural" del sistema climático. En otras palabras, considera las concentraciones de GEI como un capital natural negativo y las reducciones de emisiones como inversiones que aumentan la cantidad de capital natural (o reducen el capital negativo).

La Figura 2 muestra un diagrama de flujo esquemático de los módulos principales y la estructura lógica del modelo DICE:

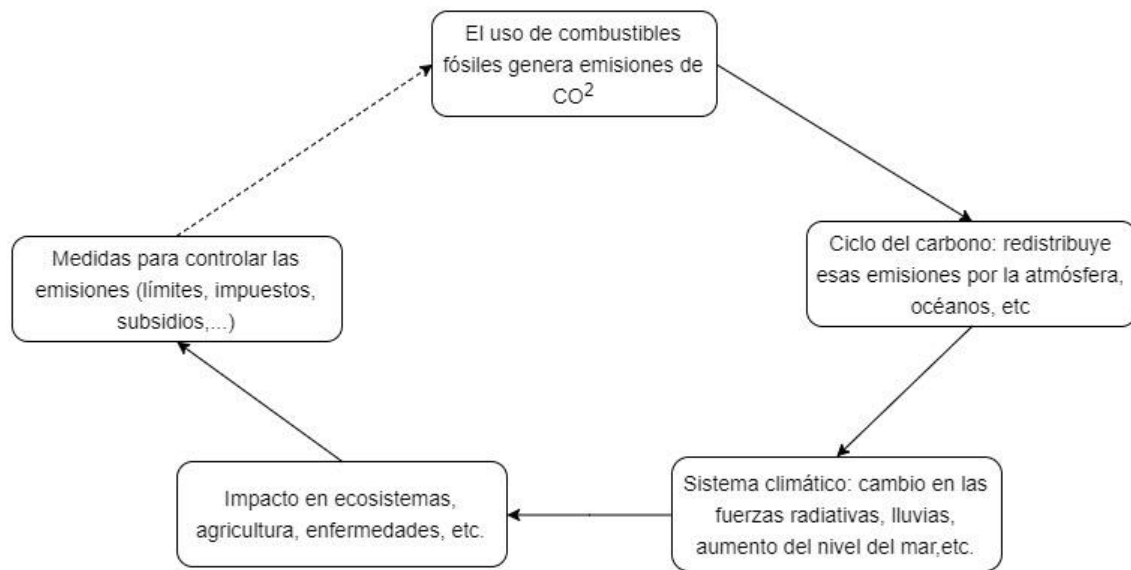


Figura 2. Diagrama de flujo de la estructura lógica del modelo DICE

Los problemas se vuelven particularmente difíciles debido a la gran diferencia de tiempo entre las emisiones y los impactos y, por tanto, entre las políticas preventivas y los daños atenuados. Las naciones deben decidir si van a tomar medidas ahora (en efecto, invertir en reducciones de emisiones) para reducir el cambio climático en los próximos siglos. Hay mucha separación temporal entre las causas y los efectos, dependemos sobremanera de una acumulación de emisiones pasadas que hacen que toda medida presente se enfrente a enormes inercias y tan solo ofrezca resultados en el muy largo plazo desincentivando a los sujetos presentes a sufragarlos.

Una manera útil de ver las decisiones que involucran horizontes tan largos es con la teoría del crecimiento óptimo, en la que se basa el modelo DICE. Este enfoque fue desarrollado por Frank Ramsey en la década de 1920. Fue refinado décadas después por Cass (1965) y Koopmans (1965). Se trata del primer modelo de crecimiento económico en el que el patrón de ahorro y, por ende, el de consumo, no están dados a priori, sino que son endógenos y responden a las preferencias y restricciones presupuestarias en el tiempo de las familias consumidoras. Logra explicar de forma consistente y simplificada el proceso de crecimiento en economías con rendimientos constantes a escala y productividades marginales decrecientes en el capital, en las que se supone que tanto las firmas como las familias actúan de forma racional.

El modelo Dice es la extensión del modelo Ramsey a la política ambiental, con las reducciones de emisiones en el modelo extendido desempeñando el papel de inversión en el modelo. La sociedad debe tomar medidas hoy, reduciendo el consumo dedicando recursos a la reducción de las emisiones de GEI, con el fin de prevenir un cambio climático nocivo desde el punto de vista económico y aumentar así las posibilidades de consumo en el futuro.

El modelo es un modelo de crecimiento óptimo de la economía mundial. Está diseñado para maximizar el valor descontado de la "utilidad" o satisfacción del consumo sujeto a una serie de restricciones económicas y geofísicas. Las variables de decisión que están disponibles para su economía son el consumo, la tasa de inversión en capital tangible y la tasa de reducción de emisiones de GEI (gases de efecto invernadero).

El modelo utiliza un enfoque económico para considerar opciones alternativas para hacer frente al cambio climático. La esencia de un análisis económico es convertir o traducir todas las actividades económicas en una unidad de cuenta común y luego comparar diferentes enfoques por su impacto en el monto total. Las unidades son generalmente el valor de las mercancías en los precios constantes (tales como 2010US\$). Sin embargo, los valores no son realmente dinero. Más bien, representan un paquete estándar de bienes y servicios (como 1,000\$ de alimentos, 3,000\$ de vivienda, 900\$ de servicios médicos, etc.). Así que realmente se están traduciendo todas las actividades en el número de tales paquetes estandarizados. El consumo incluiría todos los bienes y servicios del mercado, así como el valor de los bienes y servicios no comerciales y ambientales. Es decir, el bienestar económico -medido apropiadamente- debe incluir todo lo que es de valor para las personas, incluso si esas cosas no están incluidas en el mercado.

3.1. ¿Quién es William Nordhaus?

William Dawbney "Bill" Nordhaus (nacido el 31 de mayo de 1941) es un economista y profesor de economía de la Universidad de Yale, muy conocido por su trabajo en la modelación económica y el cambio climático.

Entre muchos honores, es miembro de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos y miembro elegido de la Academia Americana de Artes y Ciencias. Ha sido miembro extranjero de la Real Academia Sueca de Ciencias de la Ingeniería desde 1999.

En 2004, Nordhaus fue designado miembro distinguido de la American Economic Association (AEA), junto con George P. Shultz y William A. Brock. La declaración de la AEA se refería a su "habilidad para hacer preguntas grandes sobre la medición del crecimiento económico y el bienestar, y abordarlos con ideas simples pero creativas". Entre ellos, su trabajo pionero en el ciclo político del negocio de utilizar los datos de las cuentas de la renta nacional para elaborar medidas económicas que reflejen una mejor salud, un aumento del tiempo de ocio y de la esperanza de vida y "la construcción de modelos económicos y científicos integrados para determinar el camino eficaz para hacer frente al cambio climático". En 2013, Nordhaus se convirtió en presidente electo de la AEA.

Nordhaus es experto en economía energética y ha publicado numerosos ensayos académicos sobre crecimiento y recursos, algunos de ellos en colaboración con el Premio Nobel Paul Samuelson, con quien ha sido coautor de su renombrado manual de economía, que ha sido el manual de referencia para la formación de economistas durante gran parte del siglo XX.

Nordhaus es el autor de numerosos libros, en especial en áreas relacionadas con el medio ambiente y el calentamiento global, destacándose las obras:

- “Managing the Global Commons”,
- “The Economics of Climate Change”
- “Warming the World, Economic Models of Global Warming” (en coautoría con Joseph Boyer).

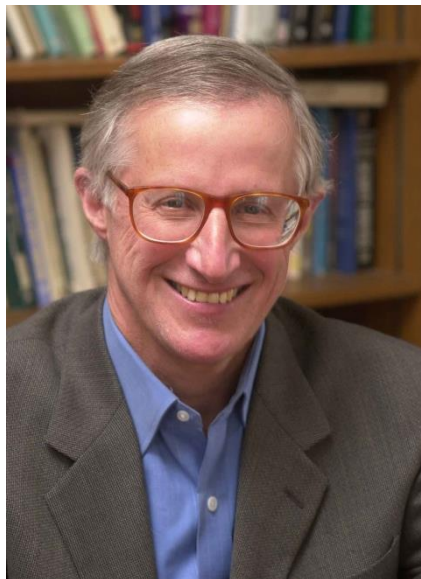


Ilustración 2. William Nordhaus

4. DESCRIPCIÓN DE LOS MÓDULOS DEL MODELO

El modelo DICE se divide en tres bloques o módulos de ecuaciones:

- Función de bienestar
- Bloque económico
- Bloque geofísico

La Figura 3 presenta el esquema general del mismo:

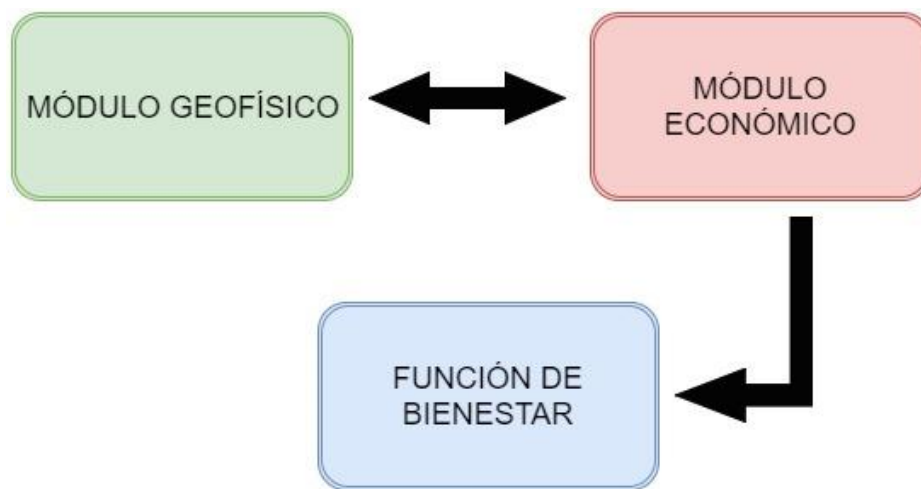


Figura 3. Esquema de los módulos del modelo DICE

En la Figura 3 se pueden observar los tres bloques mencionados y como se relacionan entre sí. El módulo climático y económico interactúan entre ellos con el fin de maximizar la función objetivo, que es la función de bienestar.

En resumen, el modelo trata de maximizar la función de bienestar a través de unas restricciones económicas y geofísicas. En ese sentido, el modelo valora los esfuerzos que una sociedad podría asumir a la vista de lo que cuesta reunir los recursos y los de los usos alternativos de los mismos.

4.1. Función de bienestar

El modelo DICE asume que el propósito de las políticas es mejorar el nivel de vida o el consumo humano, tanto ahora como en el futuro. Este consumo es interpretado como un “consumo generalizado”, lo que incluye no solo los bienes y servicios tradicionales de mercado como la comida o el hogar, sino también el ocio, el estado de salud y los servicios medioambientales.

Por lo tanto, el supuesto fundamental que se adopta es que las políticas deben ser diseñadas para maximizar el nivel de consumo ahora y en el futuro. Este enfoque se basa en la opinión de que la sociedad prefiere más consumo que menos consumo (generalizado) y que los incrementos de consumo se vuelven menos valiosos a medida que aumenta el nivel de consumo. En términos técnicos, estas suposiciones se representan maximizando una función de bienestar social que es la suma descontada de la utilidad del consumo per cápita. Esta función de bienestar social es una representación matemática de tres juicios de valor básicos:

- Que los mayores niveles de consumo tienen mayor valor.
- Que existe una disminución de la valoración marginal del consumo a medida que aumenta el consumo.
- Que la sociedad emprenda inversiones para incrementar el consumo en periodos donde la utilidad marginal del consumo es mayor.

Se debe de tener claro que la economía de una sociedad deriva de su capacidad de trabajo y de su capacidad de consumo. Es por eso que detrás de la función de bienestar (W) se ha introducido una productividad del trabajador que es la que va a permitir financiar este consumo. No se puede aumentar arbitrariamente esos dos valores (trabajo y consumo) porque están ligados entre sí, son contrapuestos. De tal forma que un sujeto que trabaja muchas horas, va a ganar mucho dinero pero va a tener poco ocio, va a tener mucha renta pero poco consumo. En cambio, no se puede esperar que una sociedad consuma aquello que no produce, en términos agregados. Para producirlo tiene que trabajar muchas horas, pero eso le reduce el consumo. Es esa relación trabajo-ocio la que determina la utilidad, donde el consumo contribuye positivamente y el trabajo negativamente.

Hay un punto de equilibrio entre trabajo y consumo, y son las sociedades las que deciden cual es. Este punto de equilibrio es cuánto dura su jornada laboral. A mayor número de horas de trabajo, mayor capital pero menor consumo, por lo que menor utilidad. En caso contrario, a mayor consumo, mayor utilidad, pero menor número de horas de trabajo, pero teniendo claro que no se puede consumir lo que no se ha producido.

4.1.1. Variables de la función de bienestar

La función de bienestar se alimenta de una variable resultado del módulo económico y de tres variables que provienen del exterior (exógenas), como se puede apreciar en la Figura 4:

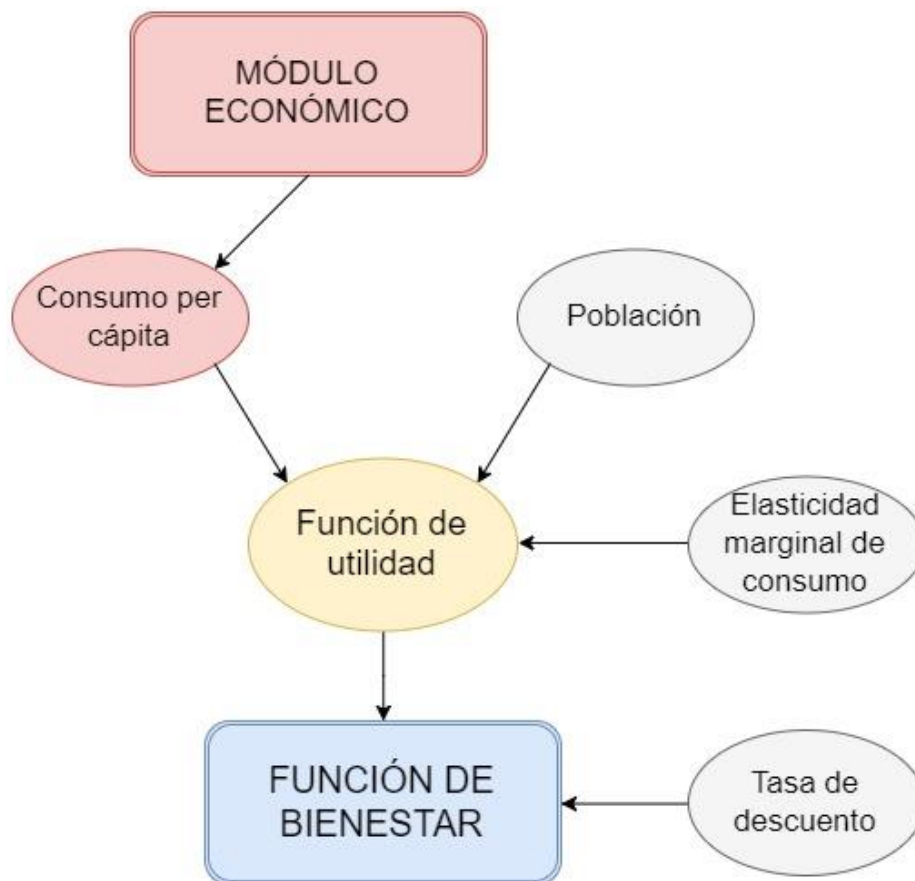


Figura 4. Diagrama de flujo de la función de bienestar

La función de bienestar es la suma descontada del producto de la función de utilidad por la tasa de descuento. En consecuencia, el modelo lo que hace es asumir un comportamiento demográfico exógeno y asumir unos juicios característicos y unos comportamientos económicos de la sociedad modelada.

4.1.1.1. Función de utilidad

La función de utilidad es una función que mide la “satisfacción” o “felicidad” que obtiene un consumidor cuando por medio del consumo disfruta de una cantidad de bienes, es decir, es una medida del bienestar de los consumidores. La emplea para establecer un orden de prioridades de las alternativas que se someten a discusión. La función de utilidad es el resultado de la combinación de:

- **Consumo per cápita:** el consumo per cápita es el consumo total en un período dividido por el número de personas en ese período.
- **Población.**
- **Elasticidad de la utilidad marginal del consumo:** la elasticidad de la utilidad marginal del consumo representa hasta qué punto la sociedad está dispuesta a reducir el bienestar de las generaciones de altos ingresos para mejorar el bienestar de las

generaciones de bajos ingresos. Es decir, mide la aversión a la desigualdad de las diferentes generaciones.

4.1.1.2. Tasa de descuento social

La tasa de descuento social se representa como la tasa de preferencia temporal pura, ρ . Es la tasa a la que los individuos descuentan el consumo futuro sobre el consumo actual. ρ es un parámetro que mide la importancia del bienestar de las futuras generaciones en relación con el presente. Se calcula en porcentaje por unidad de tiempo, como un tipo de interés, pero se refiere al descuento en "utilidad" o bienestar futuro, no bienes futuros o dólares.

La tasa de descuento de bienes determina cómo valoramos a las personas que viven en momentos diferentes al estimar los efectos del cambio climático y las políticas para reducirlo. Supongamos que ahora podemos gastar 1.000 € para reducir los efectos del cambio climático y que al hacerlo se obtiene un beneficio de 2.000 € en el futuro. Para determinar si este gasto es sabio, tenemos que ser capaces de comparar el costo de 1.000 € a las personas actuales con el beneficio de 2.000 € a las personas futuras. El punto de partida en el modelo es calcular el cambio en la utilidad de las pérdidas y ganancias. Si las generaciones futuras son más ricas, por ejemplo, no puede extraer de 2.000 € adicionales tanta utilidad como la gente actual perdería gastando 1.000 € para reducir las emisiones. Después de traducir las ganancias y pérdidas monetarias en utilidad, debemos ser capaces de comparar la utilidad de las personas que viven en diferentes períodos de tiempo, lo cual requiere un valor para la tasa pura de preferencia temporal.

4.1.2. Variables datos y resultado

El conjunto de los parámetros que se manejan en el modelo se agrupan en dos paquetes, por un lado los datos que alimentan al modelo, que constituyen la base de su coherencia con el escenario real que deseamos reproducir en el análisis, y por otro los resultados extraídos del modelo, que forman la base de las propuestas que el análisis promueve a través de su posición en el ranking de las propuestas.

Es importante comprender que no podemos considerar los resultados como meramente predictivos, se trata de ensayar un modelo con un test y extraer conclusiones del comportamiento de la sociedad modelada ante un test virtual que simula la coyuntura climática.

DATOS	RESULTADOS
Población	Consumo per cápita
Elasticidad marginal del consumo	Función de utilidad
Tasa de descuento	Función de bienestar

Tabla 2. Datos y resultados del módulo de la función de bienestar

4.2. Módulo económico

La maximización de la función objetivo está sujeta a una serie de restricciones económicas. El modelo DICE considera la economía del cambio climático desde la perspectiva de la teoría neoclásica del crecimiento económico mediante el modelo de Ramsey, como se ha comentado ya anteriormente. La diferencia principal con respecto a los modelos estándar económicos es el largo tiempo que se requiere para el modelado del cambio climático. Mientras que la mayoría de los modelos macroeconómicos se ejecutan por unos pocos años, o en el contexto de desarrollo de algunas décadas, con lo que se pueden validar con facilidad a la vista de tendencias ya observadas, los proyectos de cambio climático necesariamente debe abarcar más de un siglo. El resultado es que muchas de las proyecciones y suposiciones se basan en pruebas muy escasas. El modelo DICE se simplifica en relación a otros modelos porque estudian una producción agregada, sin diferenciar impactos sectoriales. El modelo analizado extiende este enfoque climático como un tipo adicional de capital social. En otras palabras, se pueden ver concentraciones de GEI como capital natural negativo y reducciones de emisiones como inversiones que aumentan la cantidad de capital natural. Al dedicar la producción a la reducción de las emisiones, las economías reducen el consumo actual, pero previenen el cambio climático nocivo desde el punto de vista económico y, por lo tanto, aumentan las posibilidades de consumo en el futuro. Se identifican en consecuencia tanto los costes de actuar contra el CO₂ como los costes de inactividad.

4.2.1. Variables del módulo económico

El submodelo económico trata de representar de forma simplificada como la sociedad toma las decisiones económicas diarias en un contexto donde las restricciones habituales de la economía (no puedes gastar lo que no produces y si lo haces te endeudas) se ven acompañadas por los costes derivados de la asignación de recursos a políticas de mitigación (alteración del comportamiento) o adaptación reducción de los daños.

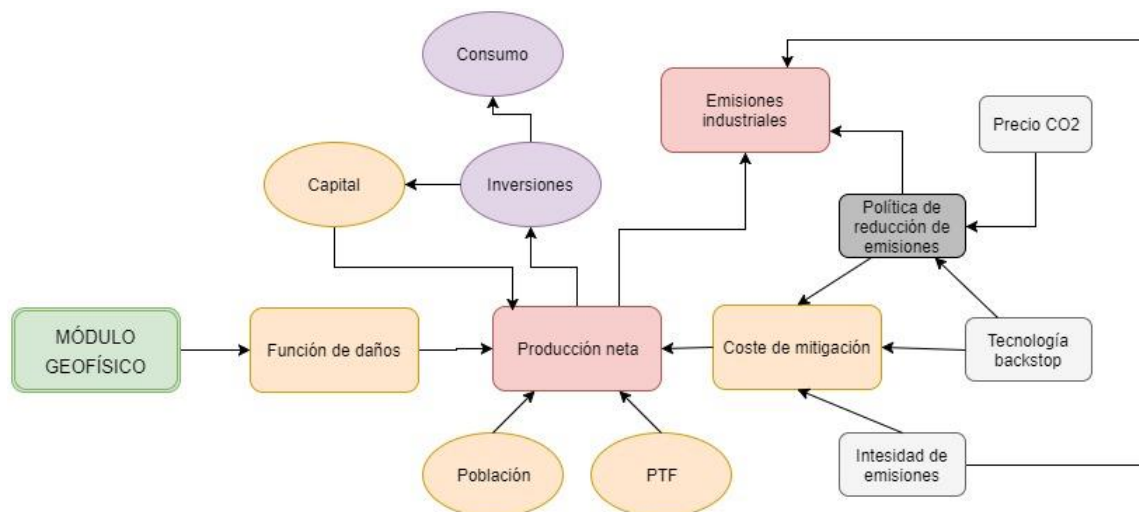


Figura 5. Diagrama de flujo del módulo económico

El módulo económico estima el crecimiento de la producción, de las emisiones industriales, de las inversiones, del capital y del consumo.

4.2.1.1. Producción

La producción es el resultado del producto de una serie de variables:

- **La función de daños climáticos:** la ecuación de los daños climáticos define los daños o impactos económicos provocados por el cambio climático, el cual es el tema más complicado en la economía del mismo. Es la relación entre el módulo geofísico y el módulo económico. Está en el centro del modelo y resulta crítica para la verosimilitud del resultado.
- **La función de mitigación:** la mitigación se puede definir como la estimación del coste de la reducción de emisiones. La adaptación se centra en reducir los daños derivados del cambio climático. De esta forma, la función de mitigación introduce la alteración de las tendencias de consumo energético y descarbonización de la economía y la función de daños informa de las consecuencias de una reducción de emisiones tardía o parcial.
- **Mano de obra:** el modelo incorpora a partir de las predicciones demográficas la mano de obra a la producción para determinar su ocupación, su contribución y su salario.
- **Productividad total de los factores:** la productividad total de los factores (PTF) es la diferencia entre la tasa de crecimiento de la producción y la tasa ponderada de incremento de los factores de producción (trabajo, capital,...). Es decir, describe la eficiencia con que la que el capital y la mano de obra intervienen en la producción económica. Se tiene claro que si aumenta la mano de obra o el capital crece la producción. Pero si en una sociedad en la que aumenta la mano de obra y el capital, se tiene un crecimiento real de la producción que supera a los crecimientos que supone el modelo debido al capital y a la mano de obra, ¿a qué se debe? A la productividad conjunta del uso de los factores.
- **Capital:** el capital y la producción describen un flujo circular en el modelo, es decir, el capital depende de la producción y la producción del capital.

4.2.1.2. Inversiones

A partir de la producción y de una tasa de ahorro el modelo obtiene una propuesta de comportamiento de las decisiones de inversión agregada de la economía.

4.2.1.3. Consumo

El consumo se obtiene a partir de la producción y de las inversiones. Es la variable que une el módulo económico con la función objetivo.

4.2.1.4. Emisiones industriales

Las emisiones industriales de CO₂ vinculan las emisiones de CO₂ a la actividad económica. Esta función es una característica exógena de la economía y resulta ocupar un papel central en el

modelo, ya que su evolución es la fuerza motriz de los potenciales cambios a generar en el futuro.

4.2.2. Variables dato y resultado

De nuevo, el modelo se alimenta de un conjunto de fuentes, indicadas en la Tabla 3, que básicamente definen una sociedad por:

- Su dimensión.
- Su capacidad productiva.
- Su dependencia tecnológica y ambiental.

A partir de estas hipótesis, se extrae un pronóstico de la producción generada, las estrategias inversoras de la sociedad y sus consecuencias ambientales.

DATOS	RESULTADOS
Población	Función de daños
PTF	Coste de mitigación
Intensidad de emisiones	Producción
Tecnología backstop	Inversiones
Precio del CO ₂	Capital
	Consumo
	Tasa de control de emisiones
	Emisiones industriales

Tabla 3. Datos y resultados del módulo económico

4.3. Módulo geofísico

El modelo DICE incluye varias relaciones geofísicas que relacionan la economía con las diferentes fuerzas que afectan al cambio climático. Estas relaciones incluyen las emisiones totales, el ciclo del carbono, una ecuación de forzamiento radiativo y ecuaciones de cambio climático. Lo que se busca en el modelo es simplificar las complejas dinámicas en un pequeño número de ecuaciones que puedan ser utilizadas en un modelo económico-físico integrado. Como en el caso de la economía, la filosofía de modelado para las relaciones geofísicas ha sido utilizar especificaciones lo más simples posibles de modo que el modelo teórico sea transparente y que el modelo de optimización sea empírico y computacionalmente manejable.

4.3.1. Variables del módulo geofísico

El módulo geofísico representa los efectos de la actividad económica en el aumento medio de la temperatura, tanto atmosférica como en los océanos. Se alimenta por tanto de las emisiones generadas en el submodelo económico, junto con las predicciones de evolución.

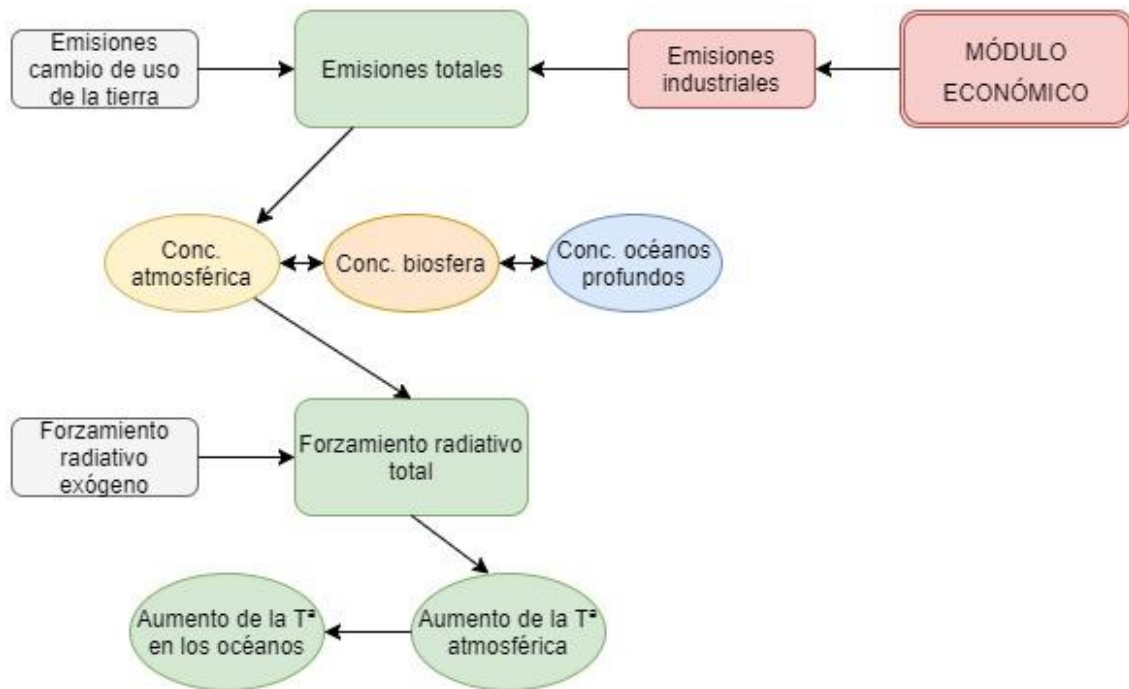


Figura 6. Diagrama de flujo del módulo geofísico

4.3.1.1. Emisiones totales

La ecuación de las emisiones totales proporciona la relación entre la actividad económica y las emisiones de gases de efecto invernadero. Las emisiones totales son la suma de:

- **Emisiones industriales:** calculadas en el módulo económico.
- **Emisiones debidas al cambio del uso de la tierra:** el cambio en el uso de la tierra es un factor importante en el cambio climático, pues constituye una fuente y un sumidero importante de CO_2 , además de influir en el ciclo del carbono. Según la información más reciente del IPCC, se estima que las emisiones de GEI procedentes de este sector corresponden aproximadamente al 20% del total de emisiones mundiales producidas por las actividades humanas.

A escala mundial, los cambios más importantes respecto del cambio de uso de la tierra que redundan en emisión y absorción de CO_2 son:

- Los cambios de la biomasa en bosques y en otros tipos de vegetación leñosa.
- La conversión de bosques y praderas.
- El abandono de tierras cultivadas.

En la Figura 7 se presenta un esquema de cómo influyen los cambios del uso de las tierras:

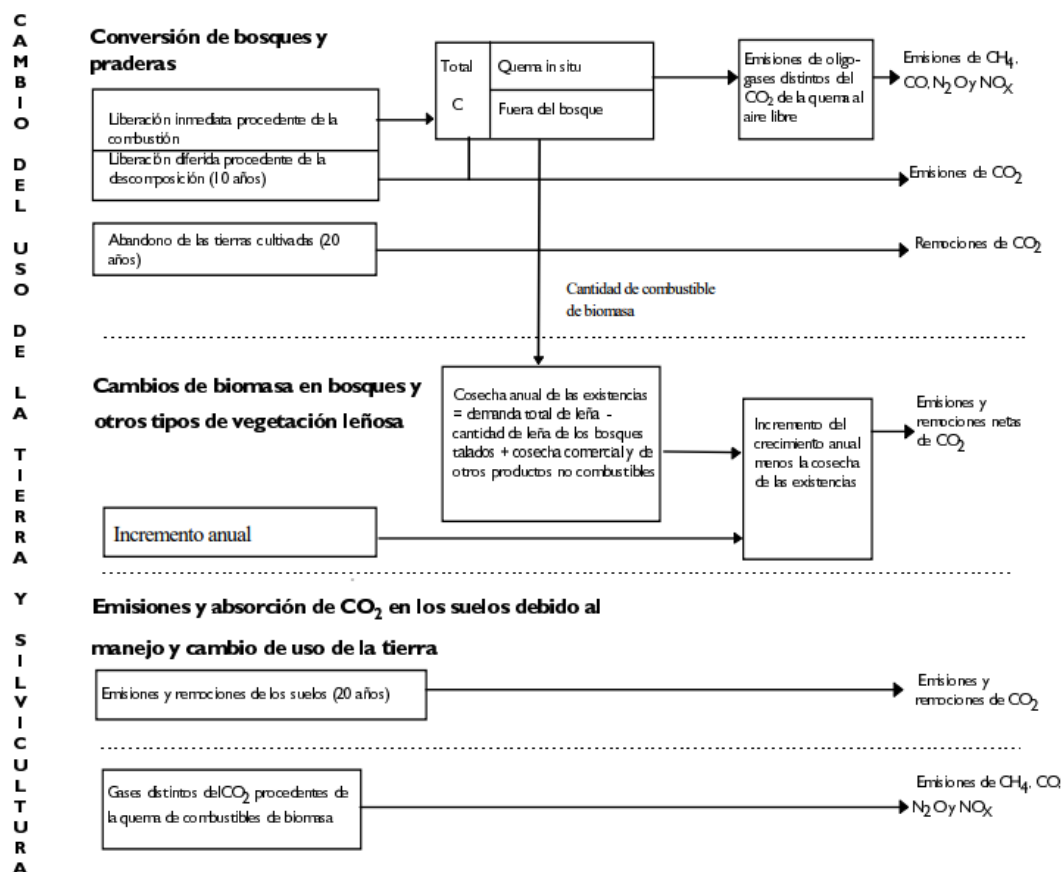


Figura 7. Esquema del proceso de los cambios de uso de la tierra

4.3.1.2. Concentraciones de CO₂

En el modelo DICE, se calculan las concentraciones futuras de CO₂ mediante modelos del ciclo del carbono en los que se representan los intercambios de CO₂ entre la atmósfera, la biosfera terrestre y los océanos. Como se ha explicado anteriormente con más detalle, el ciclo del carbono es el flujo del mismo (en varias formas, por ejemplo el dióxido de carbono) a través de la atmósfera, océanos, biosfera terrestre, y litosfera. El ciclo del carbono modelado cuenta con tres variables:

- **Concentración atmosférica.**
- **Concentración en la biosfera/capas superficiales de los océanos.**
- **Concentración de CO₂ en los océanos profundos.**

4.3.1.3. Forzamientos radiativos

El forzamiento radiativo mide la modificación del balance de energía del sistema Tierra-Atmósfera cuando los factores que afectan al clima se ven alterados, como por ejemplo, una variación de la concentración de dióxido de carbono o de la radiación solar. Se mide en términos de densidad de flujo de energía, W/m². Cuando un factor o grupo de factores producen un forzamiento positivo la energía del sistema Tierra-Atmósfera aumenta y se

produce un calentamiento del sistema. Por el contrario, si un factor o grupo de factores producen un forzamiento negativo la energía del sistema Tierra-Atmósfera disminuye y se produce un enfriamiento del sistema.

En el modelo, se obtiene a partir de dos variables:

- **Del forzamiento debido a la concentración de CO₂ en la atmósfera:** calculado por el modelo endógenamente.
- **Forzamiento exógeno:** son los forzamientos debidos a otros GEI que no son CO₂.

4.3.1.4. Aumento de la T^a

Las ecuaciones climáticas relacionan el forzamiento radiativo y el cambio climático. Los forzamientos radiativos mayores calientan la capa atmosférica, la cual calienta la superficie de los océanos, calentándose entonces gradualmente el fondo de los océanos. Los retrasos en el sistema climático son principalmente debidos a la inercia térmica de las diferentes capas. Es decir, de la capacidad que tienen las diferentes capas de conservar la energía térmica recibida e ir liberándola progresivamente.

A partir de los forzamientos radiativos se obtiene el incremento de la temperatura atmosférica y en consecuencia de este, el aumento de la temperatura en los océanos.

4.3.2. Variables dato y resultado

El módulo geofísico tan solo se alimenta de dos variables dato, una proveniente del módulo económico y otra exógena. A través de relaciones, va definiendo los daños ambientales causados por la actividad económica. A partir de estas hipótesis, se extraen unos daños debidos al cambio climático que van a afectar a la economía del siguiente periodo.

DATOS	RESULTADOS
Emisiones por cambio de uso de la tierra	Emisiones industriales
Forzamiento radiativo de GEIs que no sean CO ₂	Emisiones totales
	Conc. de CO ₂ atmosférica
	Conc. de CO ₂ en la biosfera/capa superficial de los océanos
	Conc. de CO ₂ en las profundidades de los océanos
	Forzamiento radiativo total
	Aumento de la T ^a atmosférica
	Aumento de la T ^a en los océanos

Tabla 4. Datos y resultados del módulo geofísico

4.4. Esquema final de los flujos

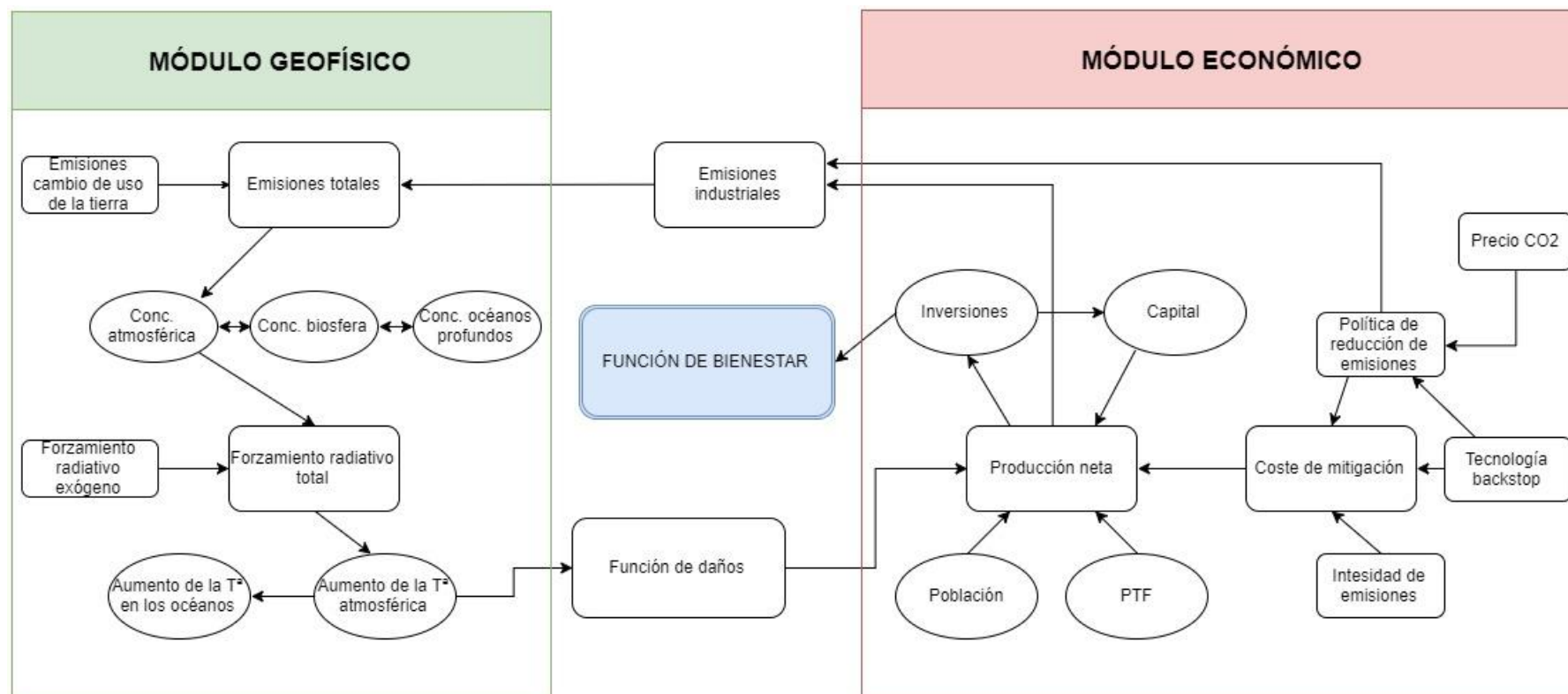


Figura 8. Diagrama de flujo completo del modelo DICE

5. DESARROLLO DEL MODELO DICE

En este capítulo se intentará explicar de forma clara el desarrollo seguido por el modelo, además de las hipótesis asumidas y el origen de los datos de los que se alimenta el mismo.

Como se ha comentado anteriormente, los IAMs incluyen suposiciones y simplificaciones sobre cómo funciona el sistema de clima físico, así como la interacción de variables demográficas, políticas y económicas. Es esencial comprender estas suposiciones subyacentes así como los insumos del modelo para poder trabajar con el mismo. Igual de importante es conocer las ecuaciones que conducen al modelo para poder comprender los mecanismos responsables de las proyecciones y predicciones del modelo.

Lo que se busca es encontrar la transparencia del modelo, para evaluar si las proyecciones del modelo son realistas o no.

5.1. Función objetivo

El problema dinámico se resuelve teniendo en cuenta el bienestar de las generaciones presentes y de las generaciones futuras, pero se asume una impaciencia temporal de la sociedad actual, que es la que resuelve el problema, lo que implica que el bienestar futuro recibe una ponderación menor que el bienestar presente. Dicho de otro modo, la sociedad descuenta el futuro a tasas positivas $[R(t)]$, y la función de bienestar total calcula el valor presente del flujo de bienestar en cada periodo t en todo el horizonte de planeación.

La función objetivo a maximizar es la expresión usada en las teorías modernas de crecimiento económico óptimo, que es la suma descontada de las utilidades de consumo, sumadas a lo largo de un tiempo “ T ”:

$$W = \sum_{t=1}^{Tmax} U[c(t), L(t)]R(t)$$

Ecuación 1. Función de bienestar

Dónde:

- $U[c(t), L(t)]$: es el flujo de utilidad o función de utilidad instantánea.
- $c(t)$: es el flujo de consumo per cápita en el tiempo t .
- $L(t)$: es el nivel de población en el tiempo t .
- $R(t)$: es la tasa de descuento.

La Ecuación 1 es la típicamente utilizada en los modelos de crecimiento óptimo de Ramsey.

5.1.1. Función de utilidad instantánea

La utilidad instantánea representa el valor del bienestar en cada momento y se supone igual al tamaño de la población, $L(t)$, por la utilidad del consumo per cápita, $U[c(t)]$. La notación aquí es que $V[c(t), L(t)]$ es la función de utilidad instantánea y $U[c(t)]$ es la función de utilidad:

$$V[c(t), L(t)] = L(t) * U[c(t)]$$

Ecuación 2. Función de utilidad instantánea

Siendo:

$$U[c(t)] = \left[\frac{(c(t)^{(1-\alpha)} - 1)}{1 - \alpha} - 1 \right]$$

Ecuación 3. Función de utilidad

Y por lo tanto:

$$V[c(t), L(t)] = L(t) * \left[\frac{(c(t)^{(1-\alpha)} - 1)}{1 - \alpha} - 1 \right]$$

Ambas formulaciones son las usadas durante años por los modelos de crecimiento óptimo.

Como se observa en la Ecuación 2, a mayor población, mayor será el volumen de bienestar para el conjunto de la sociedad. La función de utilidad instantánea es proporcional a la población en cada periodo t.

Si representamos la función de utilidad, Ecuación 3, dando una serie de valores al consumo per cápita y manteniendo constante el valor de α , nos queda una función tal que:

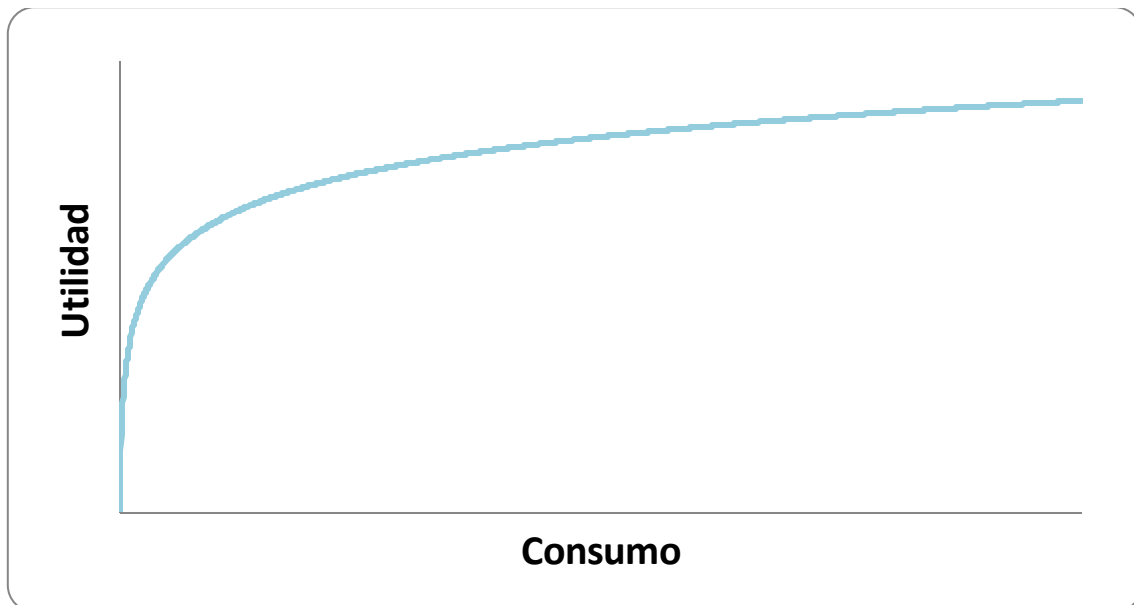


Figura 9. Representación de la función de utilidad.

Como se puede ver en la Figura 9, al principio con poco consumo la utilidad crece mucho, pero a medida que sigue aumentando el consumo, la utilidad ya empieza a crecer cada vez menos.

Es lo que se denomina la "utilidad marginal decreciente del ingreso". Significa que pasar de, digamos, pobre a clase media produce grandes beneficios, una gran satisfacción. De clase media a rica también te hace mejor, pero las ganancias o satisfacción ya son más pequeñas. Y pasar de ricos a increíblemente ricos produce aún menores ganancias, el aumento de satisfacción es todavía menor. En definitiva, en cuanto aumenta la cantidad de determinados bienes en poder de una persona disminuye el grado de satisfacción que le proporcionan.

En este modelo, esta ecuación sirve para ponderar los impactos según el nivel de desarrollo de la generación o región que lo sufre.

5.1.1.1. Población total

La población en el modelo es una variable exógena. La expresión matemática que refleja el crecimiento de la población en el modelo se ha desarrollado de tal forma que la población en el año 2050 sea igual a la proyección de las Naciones Unidas, que es de 9.700 millones de personas. Va creciendo hasta un máximo (población asintótica) de 11.500 millones, que es la cifra en la que según Naciones Unidas se estabilizaría la población mundial.

Por lo tanto, lo que se ha hecho es un ajuste exponencial a partir de un valor inicial conocido (población en el año 2015), y un valor teórico (población en el año 2050), limitando su crecimiento hasta otro dato teórico que es la cifra a la que se estabilizaría la población mundial. Su expresión matemática es:

$$L(t) = L(t-1) * \left(\frac{L_{asintótica}}{L(t-1)} \right)^{g_L}$$

Ecuación 4. Población total

Dónde g_L es la tasa de crecimiento para alcanzar la población objetivo en el año 2050.

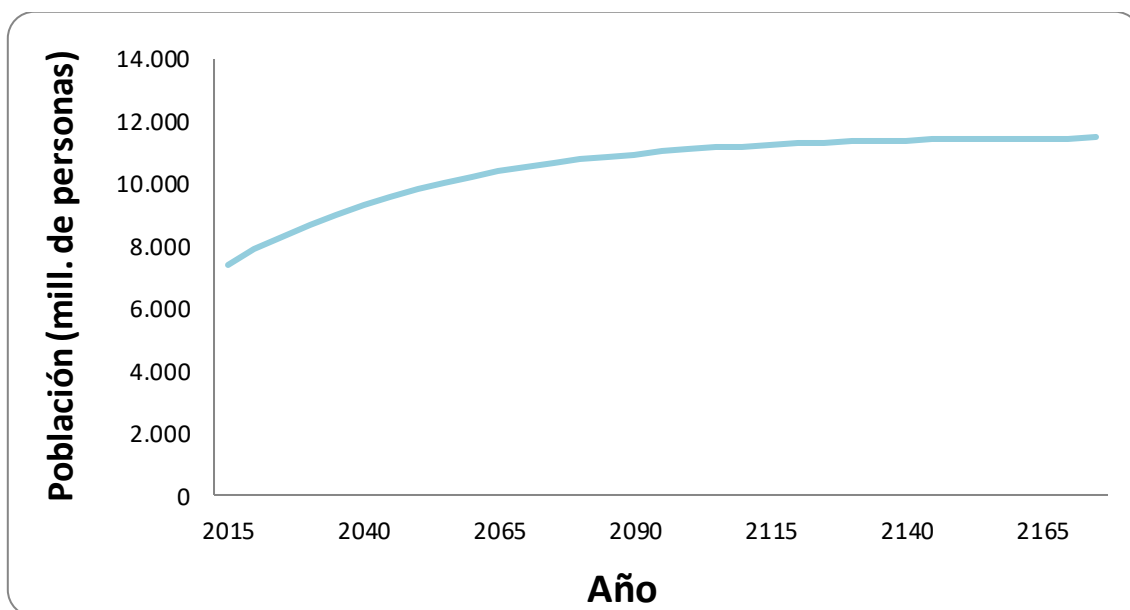


Figura 10. Representación de la función de población.

Como se aprecia en la Figura 10, el crecimiento de la población se va reduciendo a lo largo de los años hasta llegar al valor de la población de equilibrio, a partir de la cual la población ya no crecerá más, manteniéndose constante. Asume por tanto, que la población continuará creciendo, pero cada vez a un ritmo menor, como indica la Figura 11:

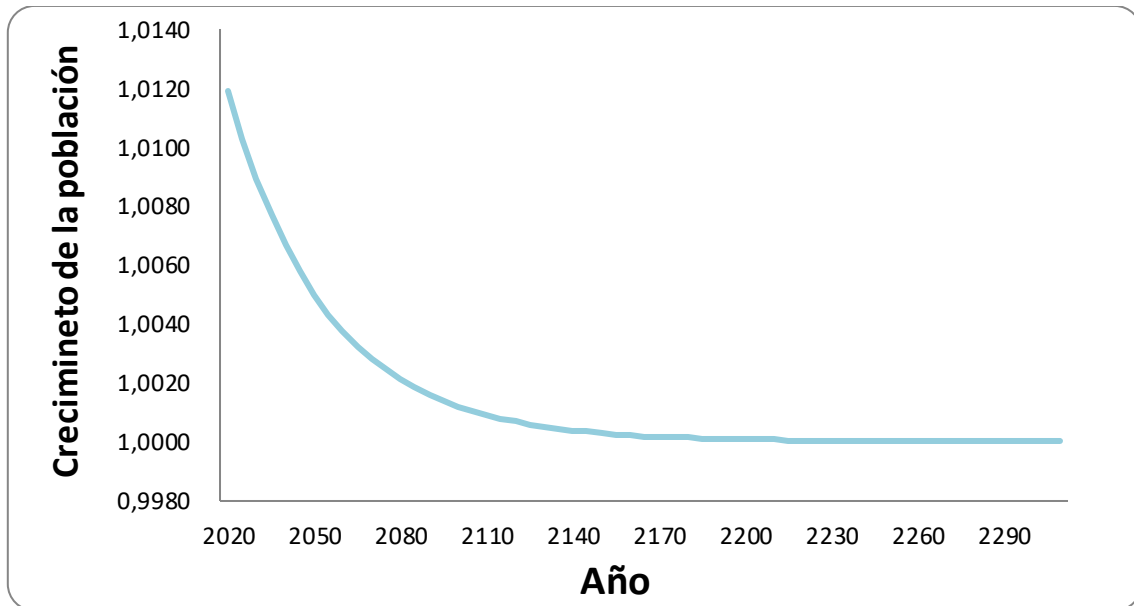


Figura 11. Representación del crecimiento de la población

El crecimiento de la población irá decayendo hasta hacerse prácticamente igual a la unidad en el año 2170, una vez alcanzada la población de equilibrio. Así pues, el modelo parte de una tendencia a la estacionariedad en la población.

5.1.1.2. Consumo per cápita

La cuantía del consumo per cápita de una generación depende del tamaño de la población y de su nivel de renta. El consumo se explicará detalladamente más adelante.

$$c(t) = \frac{C(t)}{L(t)}$$

Ecuación 5. Consumo per cápita

Esta variable se genera endógenamente y pronostica la senda de enriquecimiento de la sociedad. En consecuencia, determina el valor de la utilidad sacrificada o ganada por la sociedad con la función de utilidad que vimos anteriormente.

5.1.1.3. Elasticidad de la utilidad marginal del consumo

En el modelo DICE, la elasticidad de la utilidad marginal del consumo, α , es una variable exógena y constante. Este parámetro es parte de la calibración para la tasa de descuento, es

decir, α se calibra en conjunción con la tasa de preferencia de tiempo pura, como se explicará más tarde.

De acuerdo con “The Green Book” (Tausury, 2003), “Cowell y Gardiner concluyeron que la mayoría de los estudios implican valores de la elasticidad de la utilidad marginal justo por debajo o justo por encima de un. Por otro lado, Pearce y Ulph estiman un rango de $\alpha = 0,7 - 1,5$ ”. El modelo DICE asume un $\alpha = 1,45$, moviéndose dentro del rango anterior. Toma este valor, como se ha dicho anteriormente, como parte de la calibración para la tasa de interés real junto con la tasa de preferencia temporal.

Si se tiene unos ciertos niveles de consumo, con un α constante, se tendrá una determinada evolución de la función de utilidad. Si se representa la función utilidad para diferentes valores de consumo con diferentes α (sociedades distintas), se puede ver la influencia que tiene α en la utilidad.

Primero se analizan dos casos extremos:

- Si $\alpha \rightarrow 0$, la función de utilidad es una recta creciente:

$$U[c(t)] = \left[\frac{(c(t)^{(1-0)} - 1)}{1 - 0} \right]$$

$$U[c(t)] = c(t) - 1$$

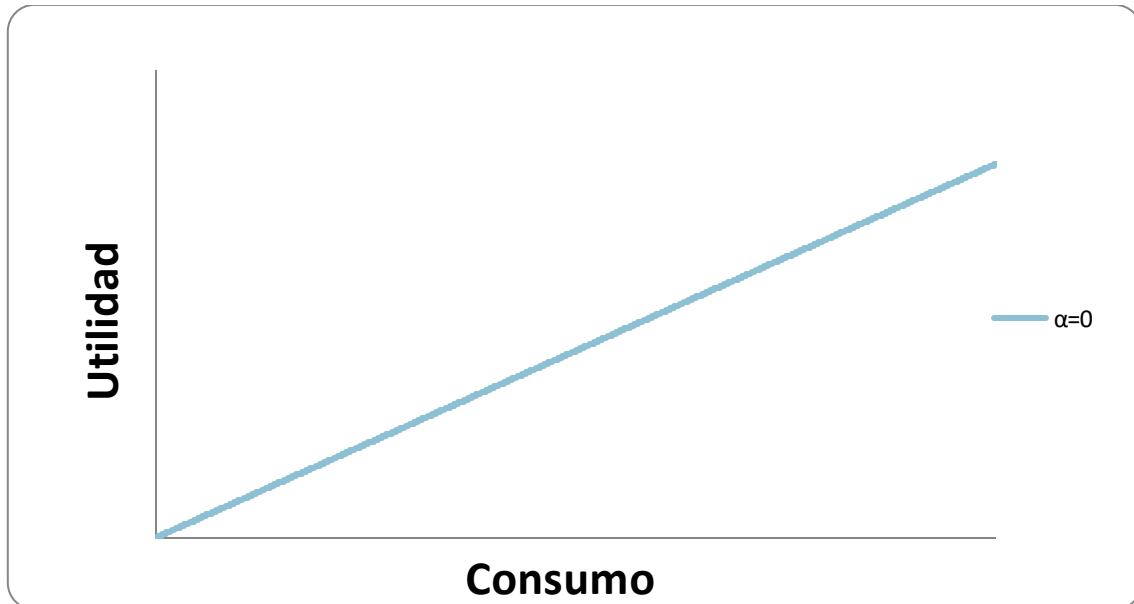


Figura 12. Función de utilidad para $\alpha=0$.

La función de utilidad es linealmente creciente, entonces los individuos no desean alisar su consumo. Buscarán siempre consumir, ya que les producirá una gran utilidad. Representa una

sociedad que no dejaría de consumir nunca, una sociedad extremadamente consumidora. Como consecuencia, no invertirían con el fin de mejorar las generaciones futuras.

- Si en cambio $\alpha \rightarrow \infty$:

$$U[c(t)] = \left[\frac{(c(t))^{(-\infty)} - 1}{-\infty} \right]$$

$$U[c(t)] = 0$$



Figura 13. Función de utilidad para $\alpha = \infty$.

En este caso, la utilidad es siempre igual a 0, la función es una recta horizontal. Los individuos de esta sociedad no desean consumir. La sociedad no obtiene utilidad por el consumo, por lo que no consumen nada y lo ahorran todo. Será una sociedad extremadamente inversora.

Estos dos casos representados, son dos casos extremos e irreales, pero nos permite entender el significado de la elasticidad de la utilidad marginal del consumo.

En cambio, si se representa para valores intermedios de α , en el rango que nos propone “The Green Book”:

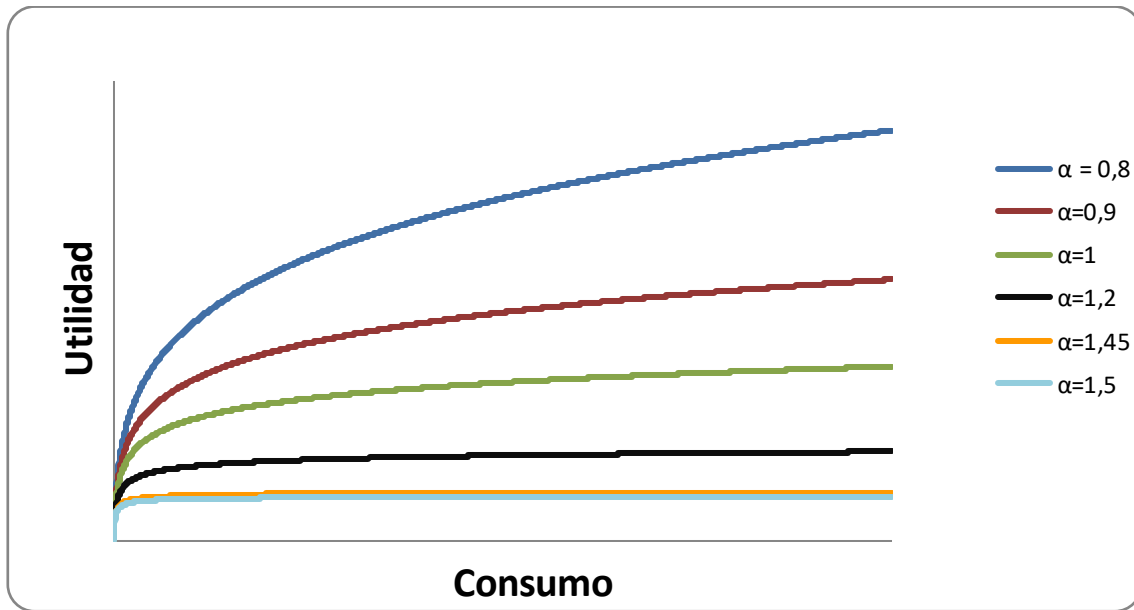


Figura 14. Representación de la utilidad con diferentes α

En la Figura 14 se pueden observar dos cosas:

- La pendiente de cada radio-vector es el ratio entre utilidad-consumo, es decir, la utilidad media del consumo para el nivel de renta en el que se está.
- Se representan diferentes elasticidades para ver si en un momento dado hay más actividad económica, mayor crecimiento económico, como aumenta la utilidad. Si aumenta un 25% el consumo, la utilidad aumenta un cierto porcentaje, dependiendo del α .

Si en la Figura 14 dibujamos una recta vertical desde un determinado valor de la producción:

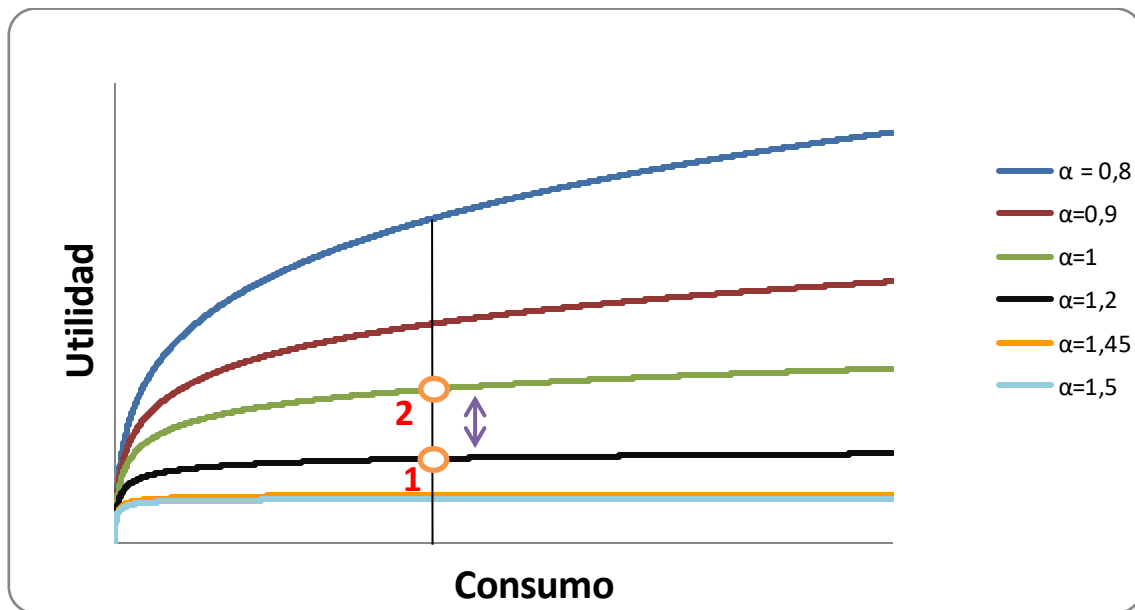


Figura 15. Representación de diferentes sociedades con la elasticidad marginal

En la Figura 15 se puede ver como para el mismo consumo, distintas sociedades obtienen distintos grados de utilidad. Cada valor de la elasticidad marginal representa una sociedad que tienen una situación de desarrollo concreta y que con un determinado consumo tienen un determinado nivel de utilidad. La diferencia entre la situación en el punto 1 y la situación en el punto 2 representados en la Figura 15, se debe a dos cuestiones:

- La primera es el nivel de desarrollo de la sociedad, que tenga una mayor capacidad productiva, una mayor capitalización.
- La segunda es que es que haya un problema cultural, que su elasticidad sea distinta.

Por consiguiente, el factor α nos dice el nivel de consumo o de ahorro que tiene una sociedad. Si una sociedad es muy proclive al consumo ahora, el resultado final es que consume ahora, lo que implica que las generaciones futuras consumirán menos. La sociedad se gasta una cuota mayor de renta ahora y le transfiere menos a las futuras generaciones. En cambio, si se pone un límite al consumo de la sociedad, es decir, se valora menos el consumo presente porque se tienen restricciones morales y por ello se baja la utilidad del consumo, se consumirá menos porque es menos útil, y lo que no se consume, se invierte. A medida que se valora menos el consumo se invierte más.

Esto explica el por qué hay sociedades que invierten distinto, por qué tienen distinta valoración del bienestar presente y del bienestar de las generaciones futuras. En resumen, sociedades con distinta elasticidad de la utilidad marginal de consumo y que experimente el mismo nivel de crecimiento de consumo, obtendrán una utilidad distinta del mismo y, como resultado, tendrán diferentes niveles de inversión y de consumo.

Por ello, α nos permite representar distintas sociedades. Por ejemplo, la sociedad soviética en los años 20, inmediatamente después de la revolución rusa, inicia un proceso de capitalización. Lo que hacen es producir “x”, dando una cuota muy pequeña en forma de salarios, dedicando el resto de la renta a inversión. La proporción de renta que dedican a consumir es muy baja. Eso lo que representa es que están proporcionándole posibilidades de consumo a las futuras generaciones. Es decir, mantienen de forma artificial una elasticidad marginal de consumo muy alta. Al año siguiente, habrá más capital por lo que habrá más producción a igualdad de horas de trabajo. Este parámetro α es la manifestación de un deseo de transferir o no renta al futuro. Así, una sociedad pobre apuesta por el crecimiento y sacrifica posibilidades de bienestar ahora para aumentar la inversión y proporcionarle a la generación siguiente un mayor nivel de renta, un mayor bienestar, derivado de que lo que se capitaliza. Mantenían artificialmente una α alta, como podría ser el $\alpha=2-3$ de la Figura 14. En cambio, el $\alpha=0,8$ de ese mismo gráfico podría ser una sociedad muy pobre que con un incremento de consumo muy pequeño, consigue mucha utilidad, ya que está muy necesitada de consumo.

El día que se ha empezado a hablar de sostenibilidad, se ha empezado a decir que se tiene una obligación de mantener un cierto valor de ese α , se tiene la obligación de transferir a las generaciones siguientes un stock de capital que les resarza de las pérdidas de capital natural, de los daños debidos al cambio climático.

5.1.2. Tasa de descuento

El modelo distingue entre la tasa de descuento del bienestar (ρ) y la tasa de descuento de bienes (r). La tasa de descuento del bienestar se aplica al bienestar de las diferentes generaciones, mientras que la tasa de descuento de las mercancías se aplica a la rentabilidad de las inversiones de capital. La primera no se observa, mientras que la segunda se observa en los mercados.

5.1.2.1. Tasa de descuento de bienestar

Como se ha dicho anteriormente, el bienestar futuro recibe una ponderación menor que el bienestar presente, descontándolo a tasas positivas, siendo $[R(t)]$:

$$R_t = e^{-\rho \cdot t}$$

Ecuación 6. Tasa de descuento de bienestar

Dónde:

- ρ = tasa de preferencia temporal pura.

El modelo toma el valor de la tasa de preferencia temporal pura del libro “*The Green Book*”, según el cual, ρ está formado por dos componentes:

- El riesgo de catástrofe (L), que es la probabilidad de que haya algún evento tan devastador que todos los retornos de las políticas, programas o proyectos sean eliminados, o al menos radicalmente e impredeciblemente alterados. Ejemplos de ello son los avances tecnológicos que conducen a la obsolescencia prematura, o desastres

naturales, las grandes guerras, etc. La escala de este riesgo es, por su naturaleza, difícil de cuantificar.

- La preferencia temporal pura (δ), refleja la preferencia de la sociedad por el consumo ahora, y no más tarde, con un nivel de consumo per cápita inalterado en el tiempo.

“*The Green Book*”, con la combinación de los dos anteriores componentes sugiere un valor de $\rho = 1,5\%$ al año, valor que toma el modelo DICE. La suposición detrás del modelo de DICE es que la tasa de preferencia temporal pura debe ser elegida junto con la elasticidad del consumo de modo que el modelo genere una trayectoria que se asemeje a la actual tasa de interés real.

No obstante, el principal problema asociado con este enfoque del descuento es que conlleva a una asimetría fundamental entre las generaciones presentes y las generaciones futuras. El modelo suma los cambios en la utilidad para determinar el cambio general en el bienestar de una política elegida, pero reduce el cambio en la utilidad de las personas que viven en el futuro por un factor de descuento.

Por ello, el uso de una tasa pura positiva de preferencia de tiempo es controvertido. Una tasa de descuento de tiempo positivo significa que el bienestar de las generaciones futuras es reducido o "descontado" en comparación con generaciones más cercanas. Algunos economistas y filósofos políticos argumentan que no es ético contar a las personas que viven en el futuro menos de lo que cuentan las personas actuales. Otros argumentan que una tasa pura positiva de preferencia temporal refleja cómo las personas se comportan realmente y que un modelo de cambio climático no puede producir escenarios y políticas realistas a menos que reflejen el comportamiento real. Sería irrealista tomar decisiones basadas en la premisa de que no hay preferencia por el tiempo, dado que muchas decisiones sociales, de hecho, están inclinadas en favor de las generaciones presentes.

Se debe aclarar que ρ se aplica a las comparaciones del bienestar de las diferentes generaciones y no a las preferencias individuales.

5.1.2.2. Tasa de descuento de bienes

Un concepto económico que juega un papel importante en el análisis es la tasa de descuento de bienes. Al elegir entre trayectorias alternativas para la reducción de emisiones, necesitamos traducir los costos futuros en valores actuales. Se ponen los bienes presentes y futuros en una moneda común mediante la aplicación de una tasa de descuento en los bienes futuros. En general, se puede pensar en la tasa de descuento como la tasa de rendimiento de las inversiones de capital.

La hipótesis económica detrás del modelo DICE es que la tasa de descuento de bienes debe reflejar los resultados económicos reales. Esto implica que los supuestos sobre los parámetros del modelo deben generar tasas de ahorro y tasas de retorno sobre el capital que sean consistentes con las observaciones. Con la calibración actual, la tasa de descuento (o, de manera equivalente, el rendimiento real de la inversión) es de $4\frac{1}{4}\%$ anual en el período hasta 2100. Esto significa que 1.000\$ de daño climático en un siglo se valora en 20\$ hoy. Aunque 20\$ puede parecer una cantidad muy pequeña, refleja la observación de que el capital es

productivo. Con una tasa de descuento más alta, los daños futuros parecen más pequeños, y hoy hacemos menos reducción de emisiones; con una tasa de descuento más baja, los daños futuros parecen más grandes, y hoy hacemos más reducción de emisiones.

Uno de los primeros economistas en plantear la necesidad de calcular tasas de descuento especiales para proyectos ambientales fue Arrow (1995). Su análisis se basaba en el hecho de que para enfrentarse al cambio climático solo hay tres alternativas políticas:

- Reducir las emisiones de CO₂ y otros GEI.
- Mitigarlas.
- Adaptarse a ellas.

Si se elige una de las dos últimas alternativas, los tiempos de maduración son similares a los de un proyecto de inversión típico y la tasa social de descuento debe ser, por lo tanto, la misma.

En cambio, si se elige la primera alternativa, debe tenerse en cuenta que los efectos de los GEI dependen de su concentración, es decir, de su stock en la atmósfera y que, por lo tanto, el resultado inmediato de cualquier esfuerzo para reducir las emisiones será muy pequeño. Para reducir la concentración se requerirá de esfuerzos sostenidos en el tiempo, cuyos efectos serán visibles en plazos muy largos, no menores de 50 años.

Esta longitud de tiempo entre los costos y los beneficios hace que la elección de la tasa social de descuento sea especialmente importante. Arrow propuso calcular la tasa social de descuento a partir de la maximización de una función de utilidad social, de tal manera que se obtiene la fórmula de Ramsey.

La tasa de descuento en el modelo de Ramsey de marco de crecimiento económico óptimo se basa en dos componentes.

- La tasa pura de preferencia temporal, ρ .
- El crecimiento anual per cápita del consumo, g , y la elasticidad de la utilidad marginal del consumo, α . Este término se refiere a que si se espera que el consumo per cápita crezca a lo largo del tiempo, implica que el consumo futuro será abundante en relación con la posición actual y, por tanto, tendrá una utilidad marginal menor. Es lo que se denomina el descuento del crecimiento.

Por lo tanto, la tasa de descuento de bienes se expresa como:

$$r = \rho + \alpha g$$

Ecuación 7. Tasa de descuento de bienes

El primer término representa el descuento en el tiempo. Se basa en que la sociedad muestra diferentes niveles de preocupación por los ingresos reales de las diferentes generaciones.

El segundo término representa el descuento de crecimiento. Es una segunda razón más justificable para favorecer el consumo actual, o en el contexto de este modelo que aplaza los

costos de control de los GEI, proviene del hecho de que las diferentes generaciones disfrutan de diferentes niveles de consumo. La sociedad podría sentir que es apropiado que las generaciones posteriores más ricas paguen una fracción mayor de los costos de control de los GEI, al igual que las personas de altos ingresos pagan una fracción mayor de sus ingresos en impuestos sobre la renta. Se cambian los costos futuros de descuento si el nivel de vida promedio mejora.

Bajo la teoría de crecimiento óptimo estándar, si el descuento del tiempo es bajo y la sociedad se preocupa poco por la desigualdad, entonces ahorrará mucho para el futuro y el retorno real será bajo. Alternativamente, si la tasa de descuento de tiempo es alta o la sociedad es aversa a la desigualdad, la tasa de ahorro actual será baja y la rentabilidad real será alta.

Si por ejemplo:

- $\rho = 0,03$
- $\alpha = 0,03$
- $g = 1$

La tasa de interés real en bienes sería del 6%. Sin embargo, si todo el crecimiento económico cesa y el descuento del crecimiento se evapora, la tasa de interés real caería al 3 por ciento. Por lo que una alta tasa de interés real puede ser generada por una alta tasa de preferencia temporal o por una alta elasticidad de utilidad marginal en una sociedad donde los niveles de vida son importantes.

Como se ha dicho anteriormente, se puede pensar que es inapropiado descontar el bienestar de las generaciones futuras, lo que implica que ρ puede ser baja. Sin embargo, esto no implica necesariamente que la tasa de descuento utilizada sea baja. Si la sociedad es extremadamente oponente a la desigualdad, lo que implica que α es alta, entonces una economía en crecimiento podría tener una baja tasa de descuento de tiempo y una alta tasa de descuento de crecimiento, resultando en una alta tasa de descuento en los bienes.

En resumen, el modelo DICE busca obtener un valor de r real, coherente con los rendimientos observados del mercado, dando unos valores a los parámetros ρ y α . Por ello, en el modelado, se establecen dichos parámetros para que sean consistentes con los resultados económicos observados, reflejados por las tasas de interés y las tasas de rendimiento del capital.

En el modelo DICE se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Tasa de descuento del consumo} = \text{producto} - 1$$

Ecuación 8. Tasa de descuento del consumo

$$\text{Producto} = \text{RatioUM} * \text{Ratio } \rho$$

Ecuación 9. Producto

$$Ratio\rho = \left[\frac{\rho(t)}{\rho(t+1)} \right]^{0,2}$$

Ecuación 10. Ratio de la preferencia temporal pura

$$RatioUM = \left\{ \left[\frac{c(t)}{c(t-1)} \right]^\alpha \right\}^{0,2}$$

Ecuación 11. Ratio de la utilidad marginal

A continuación, se va a comprobar de donde sale la tasa de crecimiento de las utilidades marginales de diferentes periodos. El cociente de las utilidades marginales lo que mide es cuan rápidamente decrece el deseo de consumir a medida que sube el consumo. Permite identificar en qué nivel está la sociedad, si es una sociedad que no quiere ya consumo, o en cambio es una sociedad que si lo quiere. La utilidad marginal es la derivada de la utilidad respecto al consumo:

$$UM = \frac{\partial U[c(t)]}{\partial c(t)}$$

$$UM = \frac{\partial}{\partial c(t)} \left[\frac{c(t)^{1-\alpha}}{1-\alpha} - 1 \right]$$

$$UM = \frac{1}{1-\alpha} * \left[\frac{\partial}{\partial c(t)} (c(t)^{1-\alpha}) \right]$$

$$UM = \frac{1}{1-\alpha} * (1-\alpha) * c(t)^{-\alpha}$$

$$UM = c(t)^{-\alpha}$$

$$UM = \frac{1}{c(t)^\alpha}$$

$$RatioUM = \frac{UM(t)}{UM(t+1)}$$

$$RatioUM = \frac{\frac{1}{c(t)^\alpha}}{\frac{1}{c(t+1)^\alpha}}$$

$$RatioUM = \left\{ \left[\frac{c(t+1)}{c(t)} \right]^\alpha \right\}^{0,2}$$

Por lo que la tasa de descuento del consumo queda definida por:

$$Tasa\ de\ descuento\ del\ consumo = \left\{ \left[\frac{c(t+1)}{c(t)} \right]^\alpha \right\}^{0,2} * \left[\frac{\rho(t)}{\rho(t+1)} \right]^{0,2} - 1$$

Por lo tanto, multiplicado el ratio de la utilidad marginal por el factor de descuento que cuantifica esas preferencias nos va a dar la expresión de la tasa de descuento.

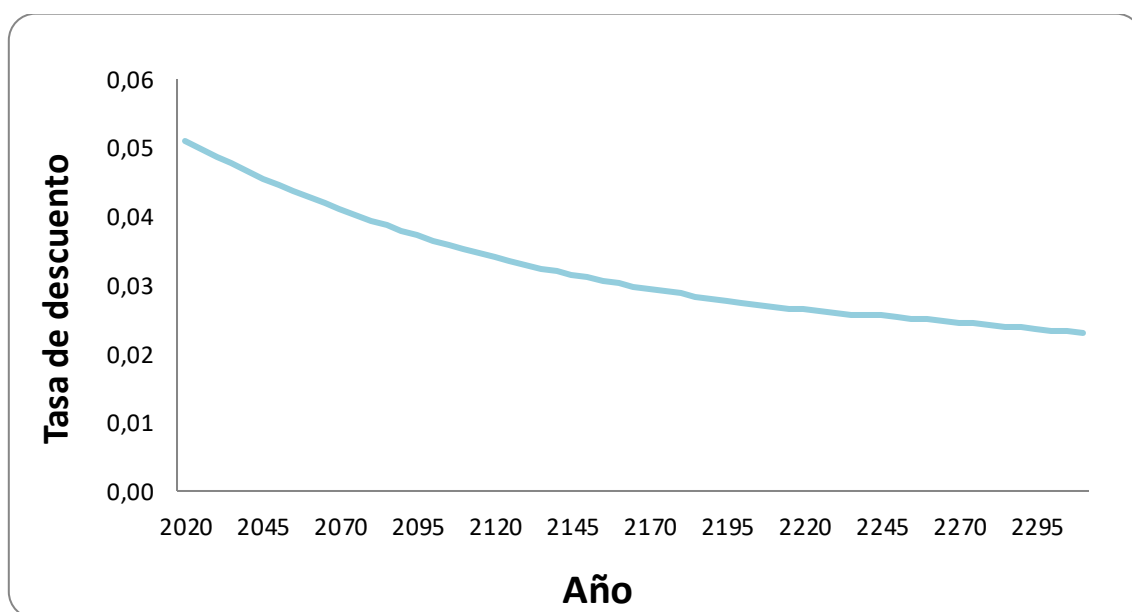


Figura 16. Tasa de descuento del consumo en el escenario Base.

Se puede comprobar como el modelo pronostica una limitación de la rentabilidad futura.

5.2. Ecuaciones económicas

Como ya se ha repetido en varias ocasiones, el modelo se basa en la teoría del crecimiento óptimo de Ramsey. El patrón de ahorro y, por consiguiente, el de consumo, no están dados a priori, sino que son endógenos y responden a las preferencias y restricciones presupuestarias en el tiempo de las familias consumidoras.

La ecuación económica principal del módulo es la ecuación de producción, a partir de la que se obtienen los demás resultados. Su principal característica es incluir las concentraciones de GEI

como capital natural negativo y reducciones de emisiones como inversiones que aumentan la cantidad de capital natural.

5.2.1. Producción

El Producto Interior Bruto (PIB) de un país en el año t (la cantidad de producción durante ese año) se representa como:

$$Y(t) = C(t) + I(t) + G(t) + Nx(t)$$

Ecuación 12. PIB en los modelos neoclásicos

El PIB, como se puede ver, es utilizado de cuatro formas distintas:

- Una parte la compran las familias para su propio consumo privado, $C(t)$.
- Otra parte la compran las empresas, $I(t)$.
- La tercera parte la compra el gobierno (el gasto público), $G(t)$.
- Y finalmente las exportaciones netas, $N_x(t)$.

El término de la izquierda de la ecuación anterior, $Y(t)$, se puede interpretar como la oferta de la economía, mientras que los términos de la derecha son los cuatro componentes de la demanda agregada. El comportamiento de los diferentes componentes de la demanda agregada es muy complejo y no se pueden estudiar todos a la vez. Es por ello que se lleva a cabo una simplificación de la misma.

Primero, se simplifica el análisis imaginando que la economía es cerrada en el sentido de que no hay exportaciones netas, $N_x(t)=0$, que no hay movimientos de capitales, y, en consecuencia, todo lo ahorrado se debe invertir dentro del propio país. Segundo, se supone que el gobierno no gasta nada, $G(t)=0$.

Estos dos supuestos son poco realistas ya que, por ejemplo, en los países más ricos el gobierno es el responsable de más del 50% del gasto nacional. Además, es conocido que las economías modernas exportan gran parte de su producción e importan gran parte de su consumo.

Tras estos dos supuestos iniciales, se observa que la producción nacional se reduce a:

$$Y(t) = C(t) + I(t)$$

Ecuación 13. PIB simplificado

Por consiguiente, cuando la economía es cerrada y no hay gasto público, el producto nacional se distribuye entre consumidores e inversores y el ahorro de las familias es igual a la inversión o la demanda de las empresas.

5.2.1.1. La función de producción neoclásica

Como se ha dicho anteriormente, el modelo DICE se basa en un modelo neoclásico y, por tanto, su función de producción es una función de producción neoclásica. Dada la importancia de la función de producción dentro del modelo se analizará en detalle su contribución.

La oferta o producción de una economía, $Y(t)$, se obtiene con la combinación de tres factores fundamentales, que son:

- El factor trabajo, $L(t)$.
- Stock de Capital, $K(t)$.
- Productividad total de los factores o tecnología, $A(t)$.

El capital, $K(t)$, el trabajo, $L(t)$, y la tecnología, $A(t)$, se pueden combinar para producir bienes finales, $Y(t)$. La combinación de los tres factores anteriores se representa a través de una función de producción como la siguiente:

$$Q_t = F(k_t, L_t, A_t)$$

Por funciones de producción neoclásicas se entienden aquellas funciones matemáticas que representan combinaciones de los factores de capital, trabajo y tecnología, y que satisfacen las siguientes tres propiedades:

- La función de producción presenta rendimientos constantes a escala. Algebraicamente, esto quiere decir que si se dobla la cantidad del factor trabajo y del factor capital, la cantidad de producto se dobla. Si multiplicamos $K(t)$ y $L(t)$ por una constante arbitraria, λ , entonces la producción también se multiplica por la misma constante:

$$F(\lambda K, \lambda L, A) = \lambda F(K, L, A)$$

- El segundo supuesto que caracteriza la función de producción neoclásica es que la productividad marginal de todos los factores de producción es positiva, pero decreciente. Esto quiere decir que la tecnología presenta rendimientos decrecientes del capital y del trabajo cuando éstos se consideran por separado. Es decir, que a medida que se añaden trabajadores adicionales, sin cambiar el stock de capital, la producción aumenta, pero lo hace tanto menos cuantos más trabajadores se tengan ya trabajando. Y lo mismo pasa con el capital, a medida que se aumenta el número de máquinas, la producción aumenta, pero lo hace tanto menos cuantas más máquinas tengamos ya en la fábrica.

Algebraicamente, esto significa que el producto marginal del capital y del trabajo son positivos (el producto marginal de un factor es la derivada parcial de la producción con respecto al factor en cuestión) tal que:

$$\frac{\partial Q}{\partial K} > 0 \text{ y } \frac{\partial Q}{\partial L} > 0$$

Y decrecientes (las segundas derivadas son negativas):

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial^2 K} < 0 \text{ y } \frac{\partial^2 Q}{\partial^2 L} < 0$$

- El tercer supuesto que debe satisfacer una función de producción neoclásica, se refiere a un conjunto de requerimientos llamados condiciones de Inada. Éstas exigen que la productividad marginal del capital se aproxime a cero cuando el capital tiende a infinito y que tienda a infinito cuando el capital se aproxima a cero:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{\partial Y}{\partial K} = 0$$

$$\lim_{K \rightarrow 0} \frac{\partial Y}{\partial K} = \infty$$

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\partial Y}{\partial L} = 0$$

$$\lim_{L \rightarrow 0} \frac{\partial Y}{\partial L} = \infty$$

5.2.1.2. Función de producción Cobb-Douglas

El modelo utiliza la función Cobb-Douglas como la función de producción. La función Cobb-Douglas utiliza las variaciones de los insumos de capital $K(t)$, trabajo $L(t)$ y tecnología $A(t)$ para representar las relaciones entre la producción. Es una función de producción frecuentemente utilizada en economía.

El origen de la función Cobb-Douglas se encuentra en la observación empírica de la distribución de la renta nacional total de Estados Unidos entre el capital y el trabajo. De acuerdo a lo que mostraban los datos, la distribución se mantenía relativamente constante a lo largo del tiempo. Concretamente, el trabajo se llevaba un 70% y el capital un 30%. De esta forma, la función Cobb-Douglas representa una relación en donde las proporciones de trabajo y capital con respecto al producto total son constantes:

$$Y(t) = A(t) * K(t)^\alpha * L(t)^\beta$$

Ecuación 14. Función Cobb-Douglas

Dónde:

- $Y(t)$ = Producción.
- $A(t)$ = Productividad total de los factores (PTF).
- $K(t)$ = Stock de capital.
- $L(t)$ = Número de trabajadores.
- α y β = parámetros que representan el peso de los factores (K y L) en la producción. Los parámetros son positivos y menores a 1.

La función Cobb-Douglas presenta ciertas características especiales que facilitan la explicación de teorías como la utilidad y producción. A continuación se describen cuatro de sus características más relevantes:

1. **Tiene rendimientos constantes a escala que dependen de la suma de α y β :** los rendimientos a escala miden la variación de la producción ante un cambio proporcional en todos los factores.
 - Si $\alpha + \beta = 1$, se tendrán retornos constantes a escala.
 - Si $\alpha + \beta > 1$, se tendrán retornos crecientes a escala.
 - Si $\alpha + \beta < 1$, se tendrán retornos decrecientes a escala.
2. **Productividad marginal positiva y decreciente:** esta propiedad refleja la ley de rendimientos decrecientes de los factores que indica que a medida que uno de los factores de producción aumenta y el resto se mantiene constante, su productividad va decayendo.

Esto es fácilmente demostrable ya que la productividad marginal de sus factores es la primera derivada de la producción respecto de cada factor.

- Productividad marginal del trabajo:

$$PM_L = \frac{\partial Y}{\partial L} = \frac{\partial}{\partial L} A * K^\alpha * L^\beta$$

$$PM_L = \frac{\partial Y}{\partial L} = \beta * A * K^\alpha * L^{\beta-1}$$

Por tanto nos queda:

$$PM_L = \frac{\partial Y}{\partial L} = \frac{\beta * Y}{L} > 0$$

Y en cuanto a su segunda derivada:

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial L^2} = \beta(\beta - 1) * A * K^\alpha * L^{\beta-2}$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial L^2} = \frac{\beta(\beta - 1) * Y}{L^2} < 0$$

De manera que se ha demostrado que es una función marginal positiva y decreciente.

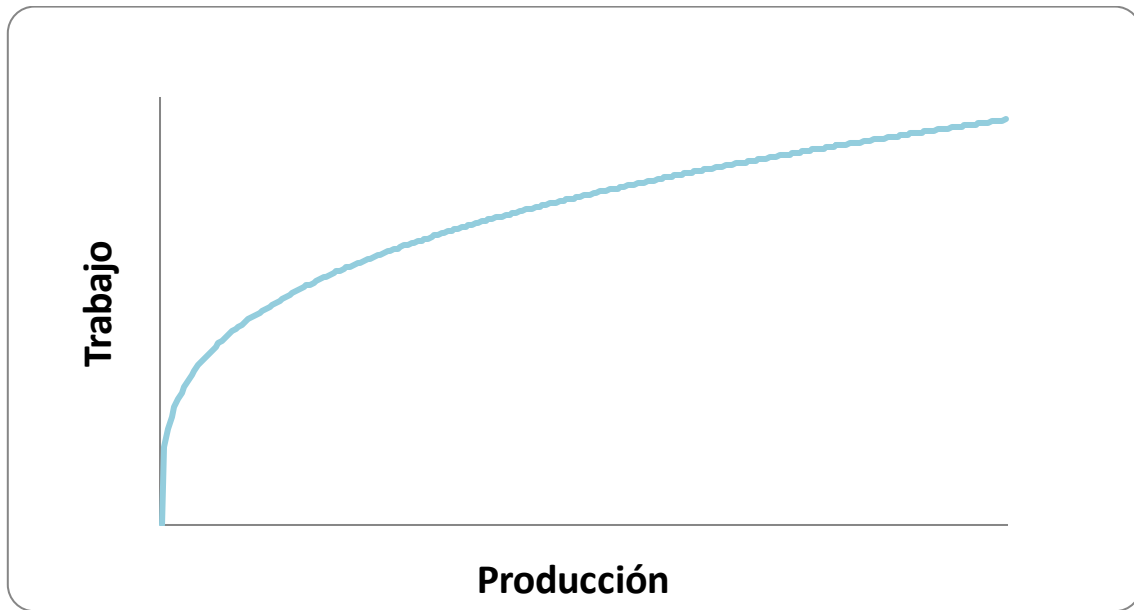


Figura 17. Productividad del trabajo

En la Figura 17 se puede observar que a medida que el factor de trabajo aumenta y el resto de insumos se mantienen constantes, la producción también aumentará, pero la productividad de la mano de obra irá disminuyendo.

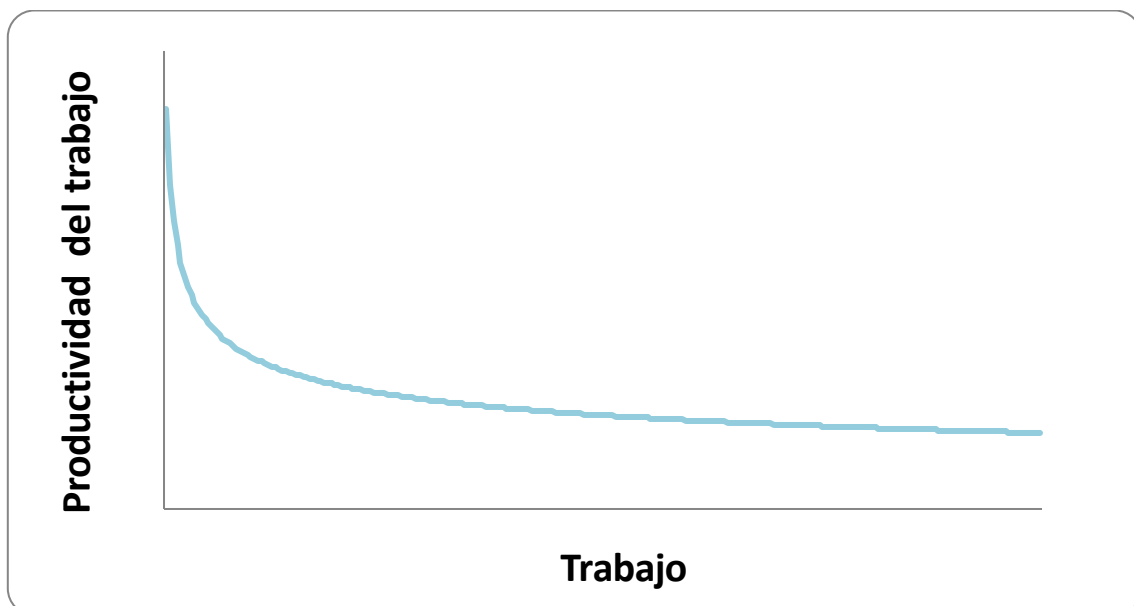


Figura 18. Evolución de la productividad del trabajo

- La productividad marginal del capital será:

$$PM_K = \frac{\partial Y}{\partial K} = \frac{\partial}{\partial K} A * K^\alpha * L^\beta$$

$$PM_K = \frac{\partial Y}{\partial K} = \alpha * A * K^{\alpha-1} * L^\beta$$

Por lo que:

$$PM_K = \frac{\partial Y}{\partial K} = \frac{\alpha * Y}{K} > 0$$

Y la segunda derivada:

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial K^2} = \alpha(\alpha - 1) * A * K^{\alpha-2} * L^\beta$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial K^2} = \frac{\alpha(\alpha - 1) * Y}{K^2} < 0$$

De esta manera se ha demostrado que es una función marginal positiva y decreciente.

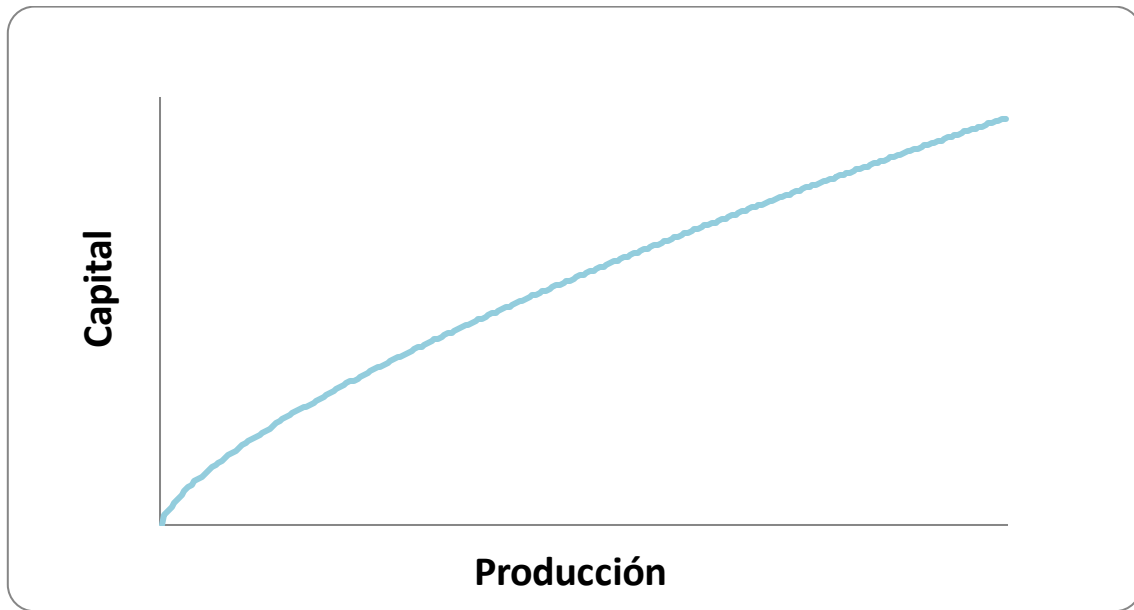


Figura 19. Productividad del capital

En la Figura 19 se muestra que a medida que el factor de capital aumenta y el resto se mantiene constante, la producción también lo hará pero su productividad va disminuyendo.

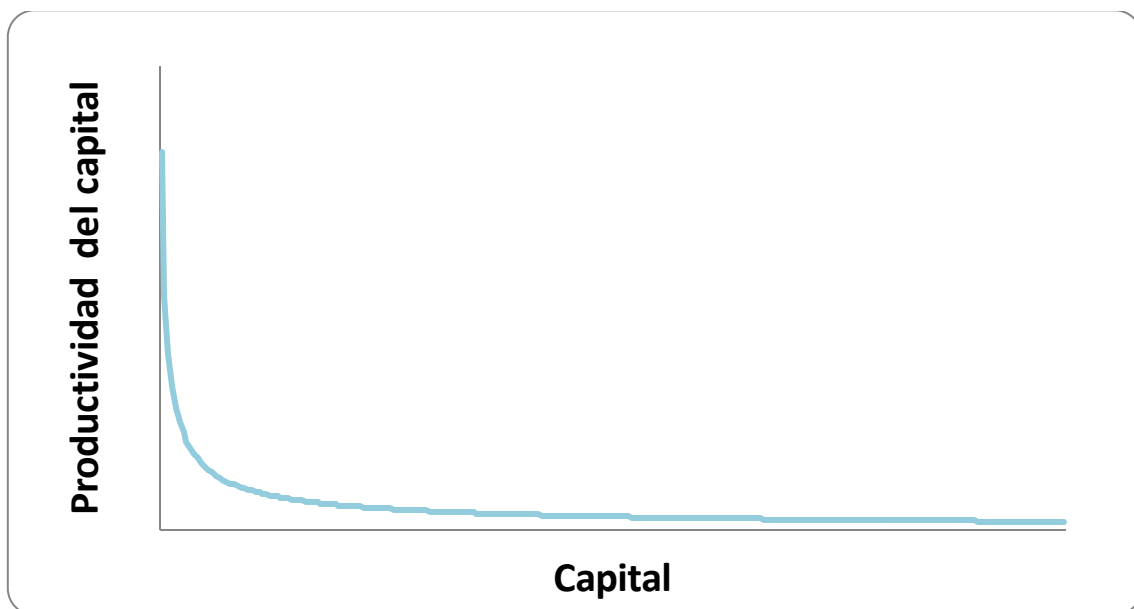


Figura 20. Evolución de la productividad del capital

3. **Elasticidad de producción constante:** la elasticidad de producción mide la variación porcentual de la producción ante un cambio en los insumos utilizados. En el caso de la función Cobb Douglas, es constante e igual a α para el capital y β para el trabajo. La elasticidad en términos matemáticos se expresa:

- Elasticidad del capital:

$$\frac{\frac{\partial Y}{Y}}{\frac{\partial K}{K}} = \frac{\partial Y}{\partial K} * \frac{K}{Y}$$

$$\frac{\frac{\partial Y}{Y}}{\frac{\partial K}{K}} = \frac{\alpha * A * K^{\alpha-1} * L^{\beta} * K}{A * K^{\alpha} * L^{\beta}}$$

$$\frac{\frac{\partial Y}{Y}}{\frac{\partial K}{K}} = \alpha = \text{elasticidad del capital}$$

Por lo tanto, α sería la elasticidad del producto respecto del capital. Esto quiere decir que si se sube un 10% el stock de capital, con un α constante igual a 0,3, la producción aumentará $10\% * 0,3 = 3\%$. Esto sería para una sociedad con ese nivel de α , ya que en la función de Cobb-Douglas se mantiene siempre constante. En definitiva, si se tienen 10.000.000 € de stock de capital e se invierte un 10% más, es decir 1.000.000 €, se va a tener 300.000 € más de producción.

- Elasticidad del trabajo

$$\frac{\frac{\partial Y}{Y}}{\frac{\partial L}{L}} = \frac{\partial Y}{\partial L} * \frac{L}{Y}$$

$$\frac{\frac{\partial Y}{Y}}{\frac{\partial L}{L}} = \frac{\beta * A * K^{\alpha} * L^{\beta-1} * L}{A * K^{\alpha} * L^{\beta}}$$

$$\frac{\frac{\partial Y}{Y}}{\frac{\partial L}{L}} = \beta = \text{elasticidad del trabajo}$$

Con β pasaría exactamente lo mismo, pero en este caso sería la elasticidad del producto respecto de la mano de obra. Con un $\beta = 0,7$, si se contrata un 10% más de trabajadores, y se está produciendo 10.000.000 €, la producción va a aumentar un 7%, es decir, 700.000 €.

En un escenario de crecimiento, estos indicadores nos van a decir quién es más productivo. El problema es que Cobb-Douglas toma estos valores como constantes, pero en un escenario real, α y β van a cambiar a medida que va creciendo la economía de la sociedad. Cuando se tienen muchos trabajadores contratados, los trabajadores no producen tanto, lo que te falta es capital. Y en cambio, cuando se tiene mucho capital, invertir más capital ya no produce nada, se tiene que contratar mano de obra. Como la función de Cobb-Douglas trabaja con un α y β paramétricos, que no cambian, que no se ajustan endógenamente, serán representativos siempre y cuando no se alejen mucho de sociedad que se quiere representar.

4. **Cumple las condiciones de Inada**, como se demuestra a continuación:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{\partial Y}{\partial K} = \alpha * A * K^{\alpha-1} * L^{\beta} = 0$$

$$\lim_{K \rightarrow 0} \frac{\partial Y}{\partial K} = \alpha * A * K^{\alpha-1} * L^{\beta} = \infty$$

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\partial Y}{\partial L} = \beta * A * K^{\alpha} * L^{\beta-1} = 0$$

$$\lim_{L \rightarrow 0} \frac{\partial Y}{\partial L} = \beta * A * K^{\alpha} * L^{\beta-1} = \infty$$

La función Cobb-Douglas también se puede representar como la productividad media (per cápita):

$$\frac{Y}{L} = \frac{A * K^{\alpha} * L^{\beta}}{L} = y$$

Ecuación 15. Productividad media

Esta expresión es la relación entre la renta obtenida y el trabajo empleado, es decir, la producción per cápita. Suponiendo que se tendrán retornos constantes a escala, tal que:

$$\alpha + \beta = 1$$

Entonces:

$$\frac{Y}{L} = A * \frac{K^{\alpha}}{L^{\alpha}} * \frac{L^{\beta}}{L^{\beta}}$$

$$\frac{Y}{L} = A * \frac{K^{\alpha}}{L^{\alpha}}$$

$$y = \frac{Y}{L} = A * k^{\alpha}$$

Ecuación 16. Producción per cápita

Siendo k^{α} el capital per cápita. Esta es otra forma de representar la productividad, la función de producción, en términos per cápita. Es la relación capital-trabajo. La producción per cápita, como se puede ver en la Ecuación 16, es proporcional al stock de capital per cápita. Si representamos diferentes niveles de stock de capital con diferentes elasticidades α :

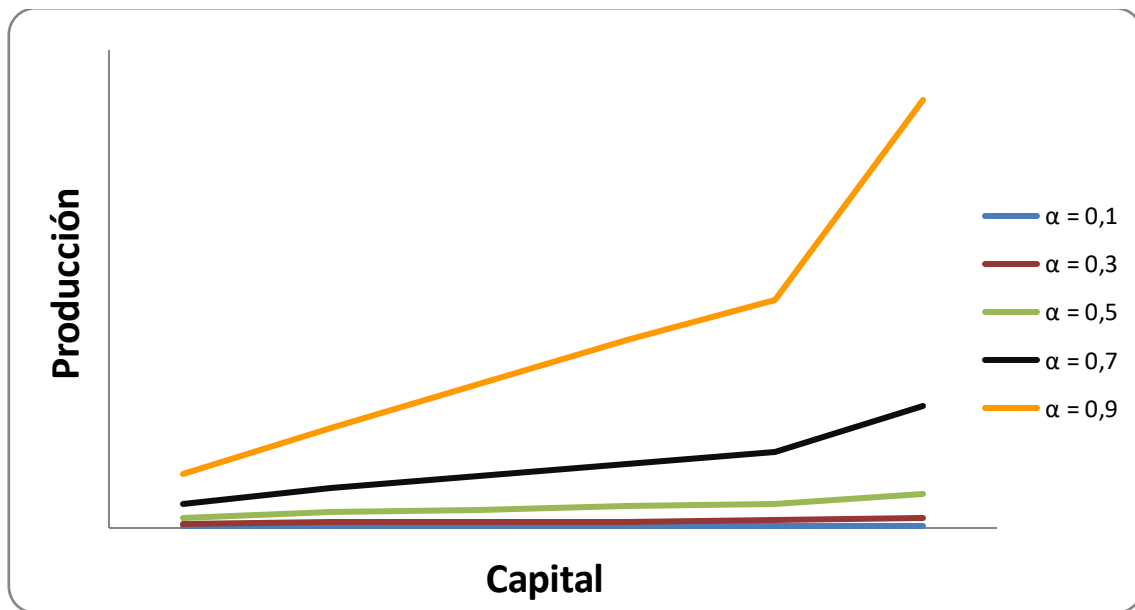


Figura 21. Stock de capital con diferentes α

Por lo tanto, un mayor valor de α produce un mayor incremento de la productividad. A mayor α , el capital per cápita será más productivo.

5.2.1.3. Función de producción Cobb-Douglas en el modelo DICE

En el modelo DICE, la función de producción está representada por una modificación de la función de producción Cobb-Douglas. Esta modificación consiste en la adición de dos variables en la función de producción con el fin de tener en cuenta la afección del cambio climático a la producción. Estas dos nuevas variables introducidas son:

- La función de daños debidos al cambio climático $\Omega(t)$, denominada función de daño climático.
- La función del coste de reducción del cambio climático $\Lambda(t)$, denominada función de costes de reducción.

La producción bruta se expresa como:

$$Y(t) = A(t) * K(t)^{\gamma} * L(t)^{1-\gamma}$$

Ecuación 17. Producción bruta

Y la producción neta es la producción bruta menos los daños climáticos y los costes de mitigación:

$$Q(t) = \Omega(t) * [1 - \Lambda(t)] * Y(t)$$

Ecuación 18. Producción neta

Es decir:

$$Q(t) = \Omega(t) * [1 - \Lambda(t)] * A(t) * K(t)^{\gamma} * L(t)^{1-\gamma}$$

Al emplear la función Cobb-Douglas, la elasticidad del producto respecto del capital y del producto respecto del trabajo son constantes. Al considerar retornos constantes a escala, sustituye α y β por:

$$\alpha = \gamma$$

Y como:

$$\alpha + \beta = 1$$

$$\beta = 1 - \alpha$$

$$\beta = 1 - \gamma$$

γ es un valor de calibración. Presupone que el comportamiento de la sociedad es estable por lo que mantiene este valor constante en todo el modelo. El modelo hereda entonces las condiciones estáticas de la ecuación constitutiva de Cobb-Douglas.

El modelo DICE, por lo tanto, tiene su propia versión de la producción mundial, la cual corresponde estrechamente a la estimación del FMI del crecimiento de la producción real en dólares internacionales constantes (PPA). El crecimiento futuro de la producción se basa en gran medida en una encuesta de expertos realizada por Christensen et al. (2016). Estima que la producción per cápita va a ir decreciendo a lo largo de los años.

El crecimiento de la producción per cápita durante el período 1980-2015 fue del 2,2% anual. El crecimiento de la producción per cápita de 2015 a 2050 se proyecta en 2.15% por año, mientras que para 2100 se proyecta en 1.9% por año. La producción inicial se basó en reunir datos para los principales países o regiones y agregarlos utilizando pesos de paridad del poder adquisitivo.

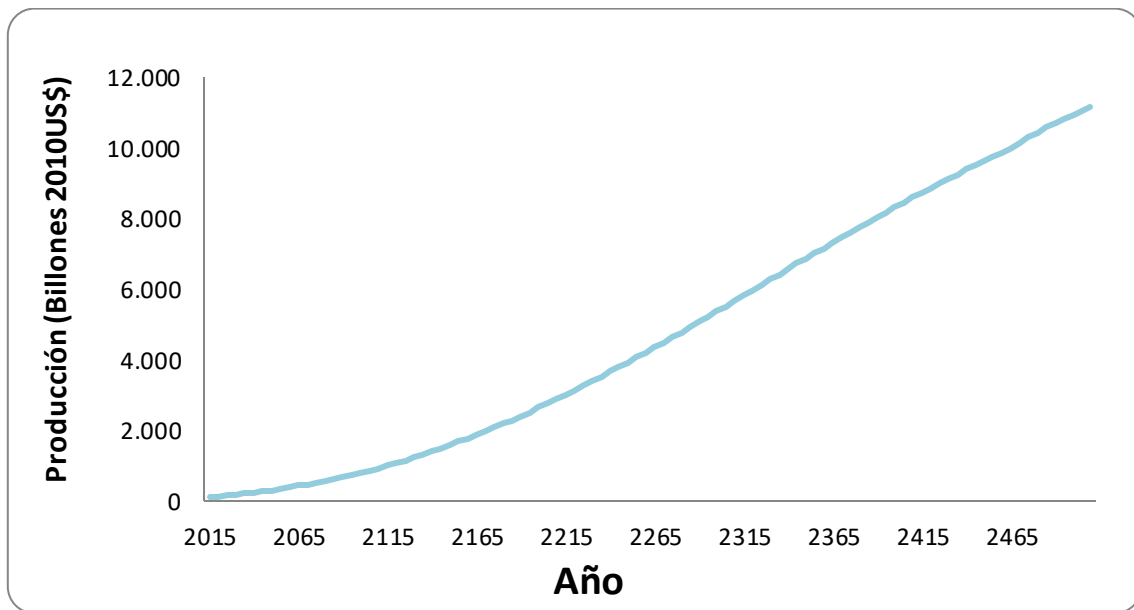


Figura 22. Función de producción

La producción representada en la Figura 22 es la modelada para el escenario Base. Nordhaus supone que la producción ira aumentando a lo largo del tiempo, pero irá disminuyendo paulatinamente el crecimiento de la misma, como se indica en la Figura 23. Prevé un decrecimiento más rápido en los próximos 100 años, para luego ir alisándose

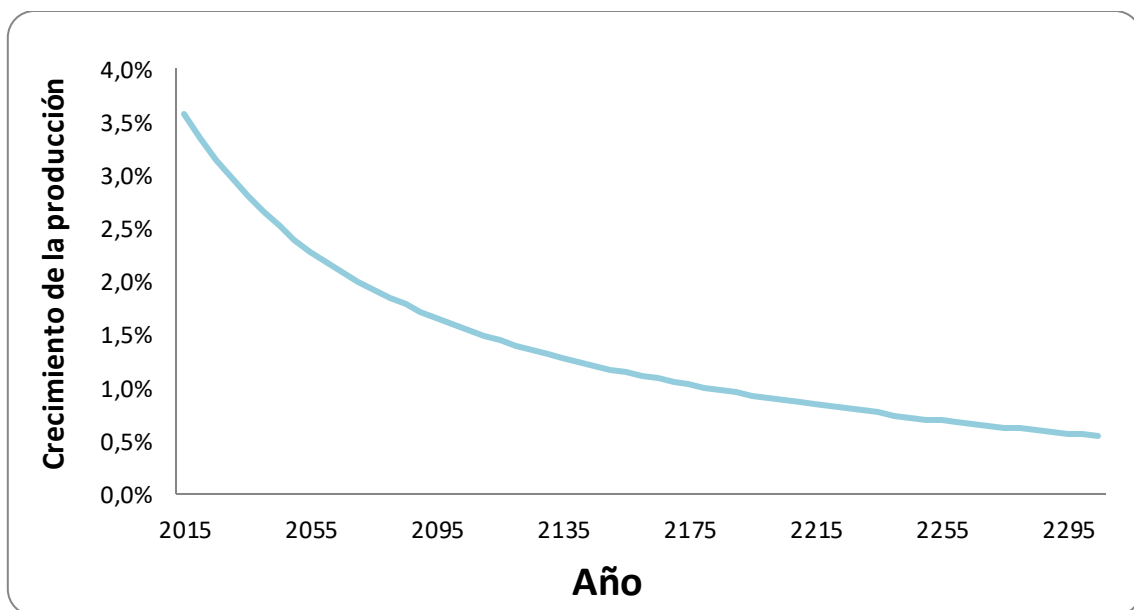


Figura 23. Crecimiento de la función de producción

5.2.1.3.1. Productividad total de los factores

La productividad total de los factores se debe a:

- La evolución de la tecnología, la mejora en el uso de la tecnología que es el resultado de la evolución de las sociedades.
- Los trabajadores usando unas máquinas aprenden a usarlas y aprenden a optimizarlas, y con el tiempo lo hacen mejor, logran una mayor productividad.

Al aprendizaje de los trabajadores es a lo que hace referencia lo que se conoce como “la curva del aprendizaje”. La curva del aprendizaje mide la relación entre el aumento de la productividad por trabajador asociado con una mejora en las habilidades laborales a partir de la experiencia laboral. Se basa en la simple idea de que el tiempo requerido para realizar una tarea disminuye a medida que el trabajador gana experiencia, por lo que será más productivo.

El modelo original fue desarrollado por T. P. Wright en 1936 y se conoce como el “Modelo Promedio Acumulativo” o el “Modelo de Wright”. En el modelo de Wright, la función de curva de aprendizaje se define de la siguiente manera:

$$Y = a * X^b$$

Ecuación 19. Función curva de aprendizaje de Wright

Dónde:

- Y = tiempo medio acumulado (o costo) por unidad.
- X = el número acumulado de unidades producidas.
- a = tiempo (o costo) requerido para producir la primera unidad.
- $b = \frac{\log(\text{tasa de aprendizaje})}{\log(2)}$

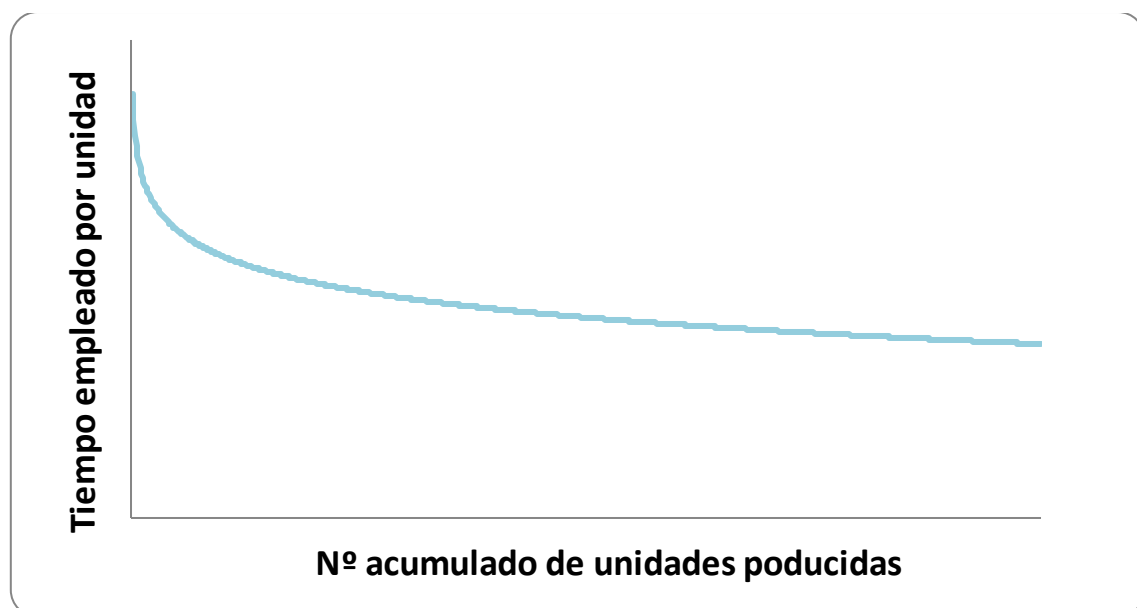


Figura 24. Curva de aprendizaje

En la Figura 24 se muestra la forma de la curva de aprendizaje de Wright, en la cual se percibe como aumenta la productividad al aumentar la experiencia.

El nivel de la productividad total de los factores (PTF, representado mediante $A(t)$), se expresa en el modelo como:

$$A(t) = \frac{A(t-1)}{1 - g_A(t)}$$

Ecuación 20. Productividad total de los factores

Siendo $g_A(t)$ la tasa de crecimiento de la tecnología:

$$g_A(t) = \exp^{-(\delta_A * t)} * g_A(t-1)$$

Ecuación 21. Tasa de crecimiento de la tecnología

La tasa de crecimiento de la tecnología se conoce como progreso técnico o progreso tecnológico. El cambio tecnológico o progreso tecnológico puede ser de dos formas:

- El cambio tecnológico en toda la economía (que es el referido al PTF).
- El cambio tecnológico que ahorra carbono.

Ambas formas de cambio tecnológico son exógenas en la versión actual del modelo DICE. Esta es una limitación seria, particularmente para el cambio tecnológico de ahorro de carbono, porque los precios cambiantes del carbón probablemente inducirán en la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de energía.

La productividad total de los factores es una variable exógena del modelo. Es la única variable no observable de la función de producción. Para su calcular su valor inicial, se resuelve la ecuación para $A(t)$ como una función de todas las otras variables observables, con lo que se obtiene un valor real, a partir del cual se proyectará un crecimiento:

$$A(t) = \frac{Y(t)}{K(t)^\gamma * L(t)^{1-\gamma}}$$

Supone una gran incertidumbre en el modelo proyectar su crecimiento en el futuro. La hipótesis que se ha seguido en este caso es darle un crecimiento tal que sea parecido al proyectado por el FMI, de tal forma que el crecimiento de la productividad se ralentizará en las próximas décadas, a una tasa 0,5% al año. Supone que la desaceleración del crecimiento de la productividad es continua y no un cambio de paso. Todas estas suposiciones se hacen con el fin de que coincida la producción proyectada con la estimada por el FMI.

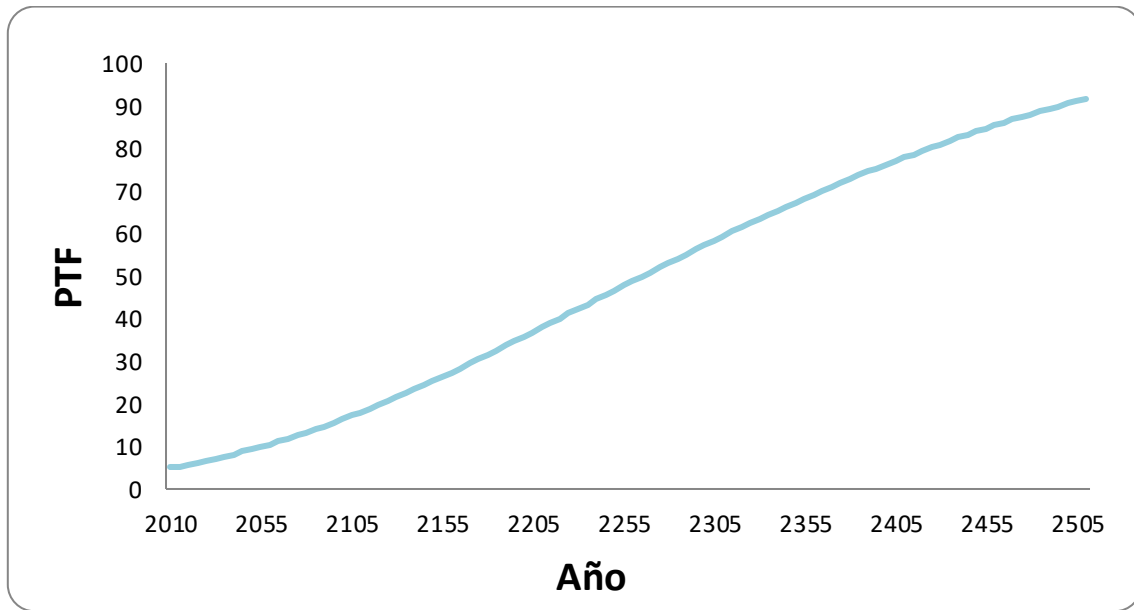


Figura 25. Función PTF

La TFP continuará aumentando en el futuro, pero la velocidad a la que aumenta se ralentizará. Su crecimiento se modela tal que decrece de una forma exponencial, con un valor constante, δ_A .

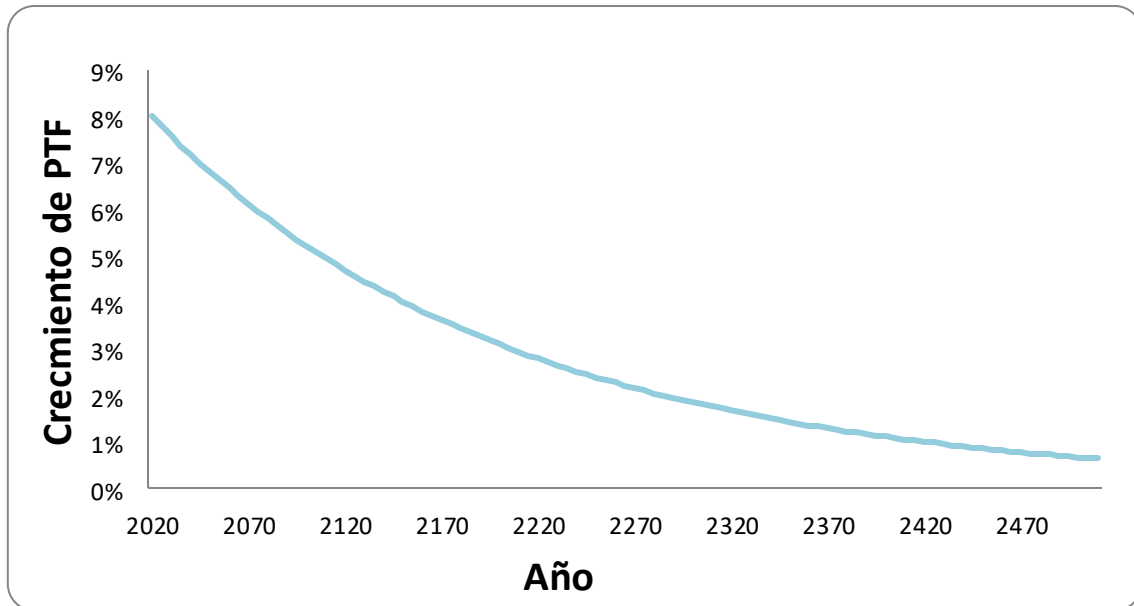


Figura 26. Crecimiento de la PTF

Un factor a tener en cuenta es el valor que se da a δ_A , que indica la velocidad a la que decrece su el crecimiento de la PTF. Pequeñas variaciones en este factor pueden llevarnos a resultados muy distintos. La Figura 27 ilustra cómo el cambio de la tasa a la que disminuye el crecimiento de la PTF afecta la evolución de la productividad:

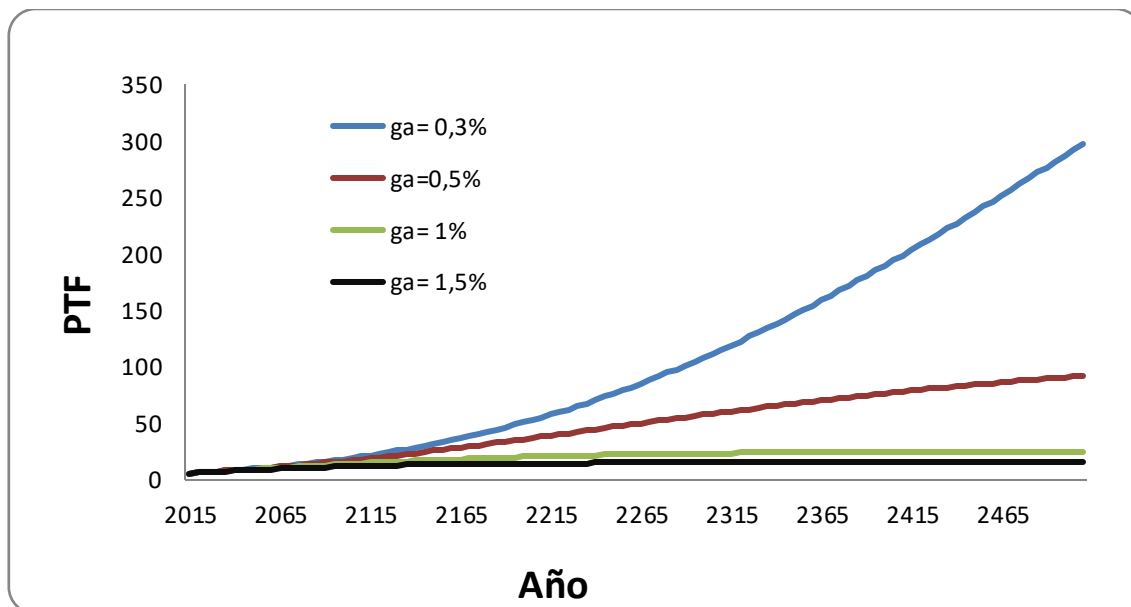


Figura 27. Afección de δ al crecimiento de la PTF

Como se puede observar, cuanto más alto sea el valor de δ_A , más disminuirá su crecimiento. Con pequeñas variaciones en el crecimiento de la PTF se obtienen resultados muy distintos.

5.2.1.3.2. Factor de trabajo

Para simplificar la notación, el modelo DICE supone que la población de la economía es equivalente a la cantidad de trabajadores, $L(t)$. Por lo tanto, utiliza la misma expresión y parámetros de la población, definida anteriormente.

El factor trabajo evolucionará, en consecuencia, al mismo ritmo que la población:

$$L(t) = L(t-1) * \left(\frac{L_{\text{asintótica}}}{L(t-1)} \right)^{0,1340}$$

Ecuación 22. Factor trabajo

Este supuesto es poco realista dado que, como es lógico, hay muchos habitantes en todas las economías que no trabajan en la producción de lo que llamamos PIB: niños, ancianos, parados y, en muchas sociedades, mujeres. Además, algunos de estos sectores producen bienes que no están incluidos en la contabilidad nacional (como es el caso de las mujeres, que cuidan de la salud de sus hijos o hacen labores en su hogar; ninguna de estas actividades aparece en el PIB).

5.2.1.3.3. Capital

El stock de capital es una variable fundamental en el análisis económico, en especial para el estudio de crecimiento económico. El nivel de stock de capital, junto con el de la mano de obra (trabajo), constituyen los factores que permiten analizar la función de producción de una economía.

El stock de capital acumulado por una economía es un momento del tiempo resulta de los flujos de inversión pasados y del ritmo de depreciación de los activos. Finalmente, tenemos la siguiente ecuación del stock (balance) de capital social:

$$K(t) = (1 - \delta_k) * K_{t-1} + I_{t-1}$$

Ecuación 23. Capital

La ecuación del stock de capital tiene una simple interpretación económica: el stock de capital por persona aumenta con la diferencia entre las inversiones y la depreciación. Cuando aumenta la tasa de ahorro (que en una economía cerrada es igual a la tasa de inversión), la inversión agregada aumenta. Como la inversión sirve para aumentar la cantidad de máquinas, el stock de capital aumenta. Por otro lado, cuanto mayor es la fracción de máquinas que se deprecia en un momento dado, δ_k , menor es el aumento en el stock de capital por persona

El capital inicial ha sido calculado según datos reales de los diferentes países. Su evolución depende de una tasa de depreciación y de la tasa de ahorro. La tasa de depreciación, δ_k , ha sido asumido por el modelo con el fin de calibrar correctamente la ecuación de producción. Se toma como 0,10 % anual, lo que refleja una vida media de capital de 10 años.

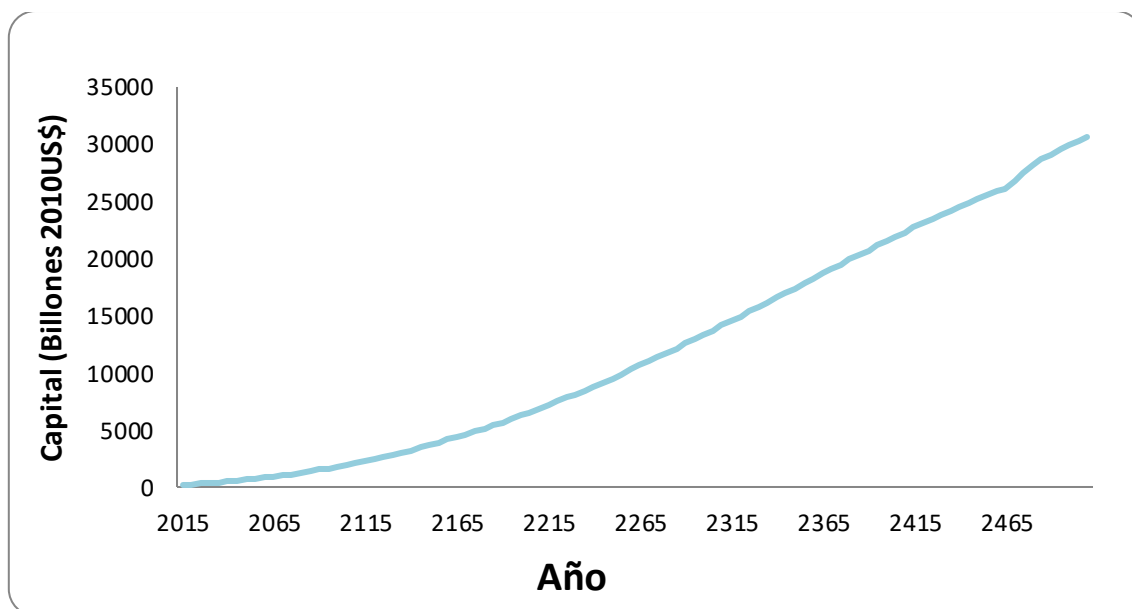


Figura 28. Stock de capital

El capital por tanto se supone creciente a lo largo del tiempo. Se supone una sociedad que irá invirtiendo más en el tiempo.

5.2.1.3.4. Inversión bruta

Como ya se ha comentado, la inversión es igual al ahorro de la sociedad. Esto se debe a que cuando la economía es cerrada y no hay gasto público, el producto nacional se distribuye entre consumidores e inversores. Esto es fácilmente demostrable. Sabemos que el ahorro es igual a la producción menos el consumo:

$$S(t) * Y(t) = Y(t) - C(t)$$

Siendo $S(t)$ la tasa de ahorro.

Si se resta el consumo en ambos términos de la ecuación de producción simplificada:

$$Y(t) - C(t) = C(t) + I(t) - C(t)$$

Se obtiene que el ahorro (la producción o renta que no se consume) es igual a la inversión, tal que:

$$Y(t) - C(t) = I(t) = S(t) * Y(t)$$

En resumen, todo lo que no se consume, se invierte. La inversión será igual a la tasa de ahorro por la producción:

$$I(t) = S(t) * Q_{neta}(t)$$

Ecuación 24. Inversión

Y desarrollando la ecuación

$$I(t) = S(t) * \Omega(t) * [1 - \Lambda(t)] * A(t) * K(t)^\gamma * L(t)^{1-\gamma}$$

La sociedad tiene un nivel de renta, o lo gasta en consumo o lo ahorra. Todo lo que se ahorra es inversión y la inversión genera incremento de stock de capital, y por lo tanto, más producción en el futuro.

5.2.1.3.4.1. Tasa de ahorro

La tasa de ahorro de un país es la parte del PIB destinada al ahorro. La tasa de ahorro asegura a un país que existan recursos suficientes para invertir en recursos productivos, stock de capital.

La tasa de ahorro en el modelo de Ramsey es endógena. Es el resultado de la optimización dinámica de las decisiones de consumo de los hogares de acuerdo a sus preferencias por el consumo y sus restricciones económicas. Se obtiene mediante la optimización del programa.

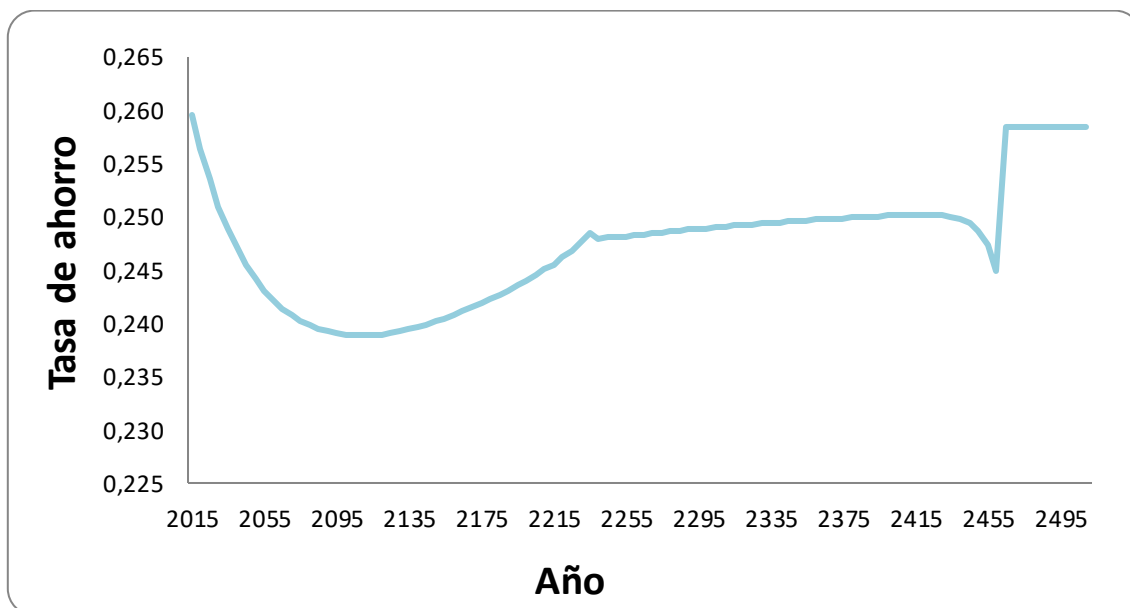


Figura 29. Trayectoria de la tasa de ahorro

En la Figura 29 se ve la senda de la tasa de ahorro obtenida por optimización del programa. Se alternan periodos donde el nivel de inversión disminuye con periodos en los que aumenta considerablemente.

5.2.1.3.5. Función de daños climáticos

Los daños debidos al cambio climático son asumidos por el modelo proporcionales a la producción mundial y aproximados por una función cuadrática de aumento de temperatura. El modelo DICE asume que a medida que sube la temperatura, se pierde una fracción creciente de la producción debido a daños climáticos. La ecuación de los daños climáticos es una ecuación empírica que se representa como:

$$\Omega(t) = \frac{D(t)}{[1 + D(t)]}$$

Ecuación 25. Función de daños climáticos

Dónde:

$$D(t) = \psi_1 * [T_{AT}(t)]^2$$

Ecuación 26. Parámetro de la función de daños climáticos

Estas estimaciones son indispensables para tomar decisiones sensatas sobre un equilibrio adecuado entre los daños climáticos y los costes de la reducción de emisiones. Pero sin embargo, la previsión de los daños causados por el cambio climático a largo plazo es realmente difícil.

El modelo DICE toma el cambio de temperatura promedio global como un estadístico suficiente para medir los daños provocados por el cambio climático. A mayor aumento de temperatura, mayores serán los daños. La ecuación de daños supone que los daños pueden

ser razonablemente bien aproximados por una función cuadrática de cambio de temperatura como una fracción de la producción. Esta ecuación depende de una encuesta de daños existentes, recogidos por Andrew Moffat y William Nordhaus. Examinaron diferentes estimaciones de daños y las usaron como puntos de datos subyacentes, ajustando una regresión a los puntos de datos. También se agregó un ajuste del 25 por ciento de la estimación de daños para los sectores omitidos y los daños no mercantiles y catastróficos. La estimación en el modelo fue una ecuación con un parámetro de $\psi_1 = 0,236\%$ de pérdida en el ingreso global por $^{\circ}\text{C}$ al cuadrado sin término lineal. Esto conduce a un daño del 2,1 % del ingreso a 3°C , y un 8,5 % del ingreso global a un aumento de la temperatura global de 6°C .

Cabe señalar una advertencia importante sobre la forma funcional en la ecuación de los daños climáticos cuando se utiliza para grandes aumentos de temperatura. La función de daño ha sido calibrada para estimaciones de daños en el rango de 0 a 3°C . También se ha de tener en cuenta que la forma funcional de la ecuación, que pone la relación de daños en el denominador, está diseñada para asegurar que los daños no excedan el 100% de la producción, lo que limita la utilidad de este enfoque para el cambio climático catastrófico.

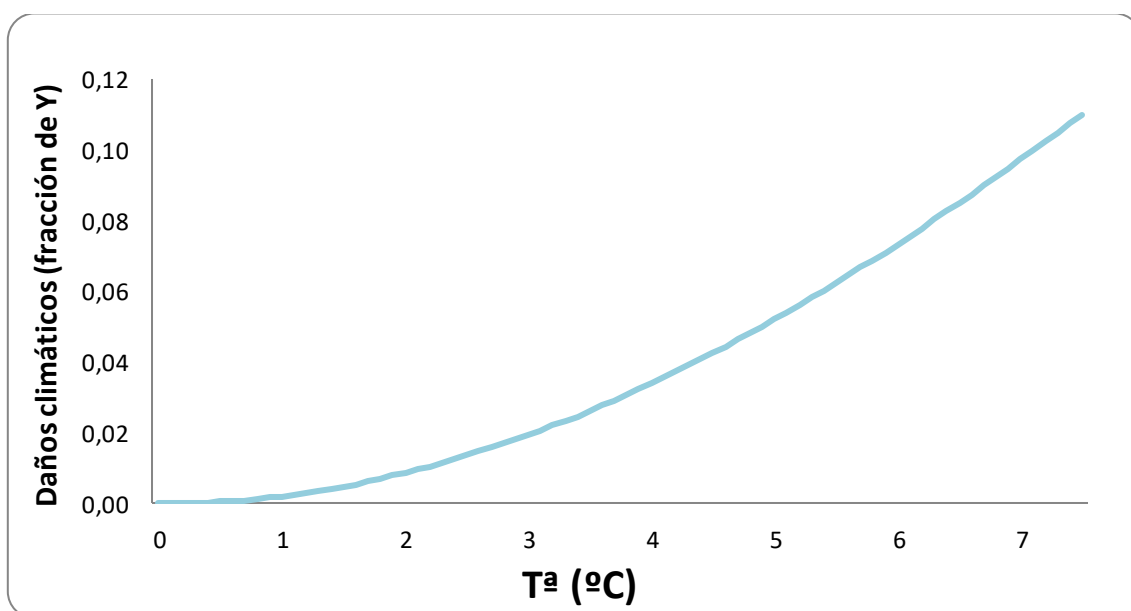


Figura 30. Función de daños climáticos

Esta es la función de daños que asume Nordhaus, una función cuadrática que irá aumentando a lo largo de los años a medida que aumente la temperatura media global. Mayor aumento de temperatura, mayor daño y menos ingresos.

5.2.1.3.6. Función de coste de mitigación

Considera que los costos de reducción son proporcionales a la producción y a una función potencial de la tasa de reducción $\mu(t)$ (tasa de control de emisiones) multiplicado por un parámetro $\theta_1(t)$:

$$\Lambda(t) = \theta_1(t) * \mu(t)^{\theta_2}$$

Ecuación 27. Función de coste de mitigación

La función del coste de reducción está recalibrada con las funciones del coste de mitigación de otros IAMs, como se representa en el proyecto de incertidumbre de modelado o estudio MUP (Gillingham et al., 2015).

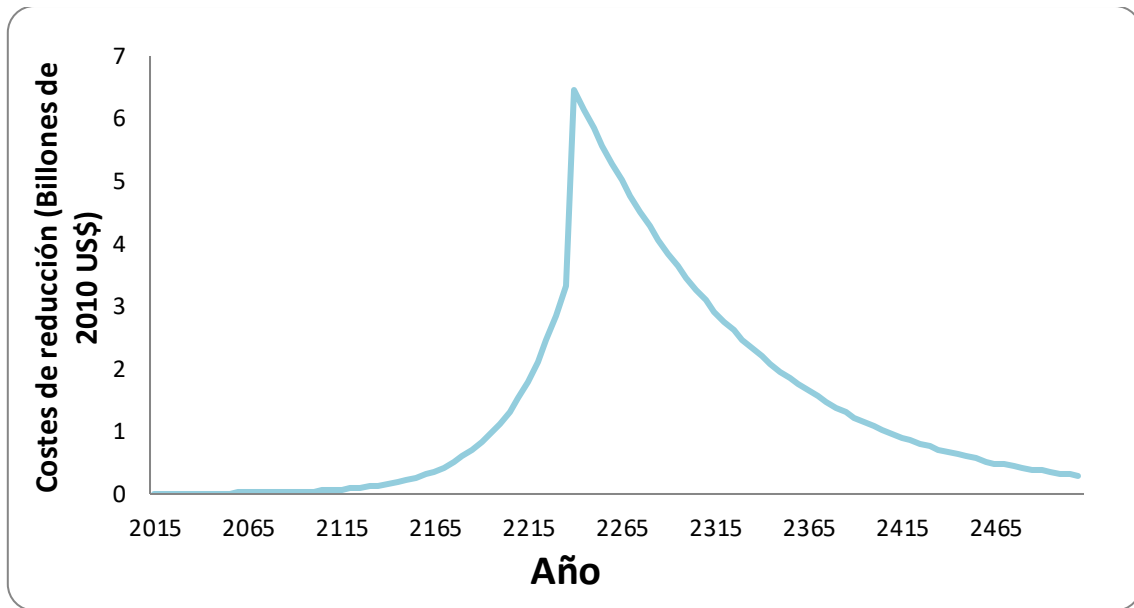


Figura 31. Función de coste de la reducción

En un escenario como en el actual, en el que no se haga nada contra el cambio climático, la ecuación asume que las primeras medidas que se irán tomando son medidas precautorias de bajo nivel que no cuestan demasiado. Pero al ir pasando el tiempo, la sociedad, a la que asume que es racional, llega un punto donde se da cuenta de la magnitud de los daños del cambio climático y empieza a invertir más, hasta llegar a un máximo, un punto de inflexión a partir del cual volverán a reducirse dichos costes.

El punto de inflexión de la función tiene lugar en el año 2240 por lo siguiente:

$$\mu = \left(\frac{\text{Precio } CO^2(t)}{Pb(t)} \right)^{\frac{1}{1.6}} = 1$$

$$\frac{\text{Precio } CO^2(t)}{Pb(t)} = 1$$

Si igualamos ambas funciones, podemos determinar el año en el que se igualan:

$$Pb = 550 * (1 - 0,025)^t$$

$$\text{Precio } CO^2 = 2 * (1 + 0,104)^t$$

$$\mu(t) = \left(\frac{\text{Precio } CO^2(t)}{Pb(t)} \right)^{\frac{1}{1,6}} = 1$$

$$550 * (1 - 0,025)^t = 2 * (1 + 0,104)^t$$

$$t = 45 \text{ periodos}$$

Por lo que sería en el año:

$$t = 2015 + 45 * 5 = 2240$$

Es decir, es en ese año cuando el control de emisiones es igual a 1, mientras que el precio del backstop y la intensidad de emisiones van disminuyendo. Al mantenerse el control de emisiones igual a la unidad, comenzará a descender el coste de mitigación.

5.2.1.3.6.1. Coeficiente de la función del coste de reducción

Este coeficiente se define:

$$\theta_1(t) = \frac{P_{back}(t) * \sigma(t)}{2,6}$$

Ecuación 28. Coeficiente de la función del coste de reducción θ_1

Dónde:

- $P_{back}(t)$ = precio de la tecnología backstop.
- $\sigma(t)$ = intensidad de emisiones industriales de CO_2 .
-

5.2.1.3.6.1.1. Precio de la tecnología backstop

La sustitución de combustibles “limpios” por combustibles de carbono tiene lugar a lo largo del tiempo a medida que los combustibles basados en carbono se vuelven más caros, ya sea por agotamiento de los recursos de los mismos (son recursos limitados) o porque se toman medidas para limitar las emisiones de carbono. Podría ser la energía solar o el hidrógeno nuclear, o alguna fuente aún no descubierta.

La tecnología de backstop es una tecnología que puede reemplazar todos los combustibles fósiles, desarrollarse y hacerse accesible como resultado de la creciente escasez que surgirá de los mismos. Se supone que esto es un mecanismo automático y continuo: los precios de los combustibles fósiles aumentarán debido a la escasez de los mismos, por lo que las empresas y los individuos tienen incentivos para buscar e invertir en soluciones alternativas y, debido al ingenio humano, encontrarlos a tiempo. Podría ser una tecnología que elimine el carbono de la atmósfera o una energía de emisión cero de carbono. Esta tecnología permite la sustitución completa de todos los combustibles de carbono.

Se supone que el precio de la tecnología de backstop es inicialmente alto y que disminuirá con el tiempo con el cambio tecnológico de ahorro de carbono. El precio de la tecnología backstop en 2015 se estima de 550 dólares por tonelada equivalente de CO₂. No se ha encontrado datos de por qué ha supuesto ese valor. El coste de dicha tecnología va disminuyendo tal que:

$$P_{back}(t) = Tb(t - 1) * (1 - \varepsilon)$$

Ecuación 29. Precio de la tecnología backstop

siendo ε la tasa de disminución del precio de la tecnología backstop, es decir, el cambio tecnológico.

ε es el otro cambio tecnológico nombrado anteriormente, el cambio tecnológico que ahorra carbono. Es un parámetro exógeno en la versión actual del modelo DICE, lo cual es una limitación seria porque los precios cambiantes del carbono probablemente inducirán en la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de energía.

Además, se asume que no hay tecnologías de "emisiones negativas" inicialmente, es decir, energía que elimine el carbono de la atmósfera, pero que estarán disponibles después del año 2150.

La tecnología backstop se introduce en el modelo estableciendo la trayectoria temporal de los parámetros en la ecuación de costo de reducción de manera que el costo marginal de reducción a una tasa de control del 100 % sea igual al precio de retroceso para cada año. Es decir para:

$$\mu(t) = 1$$

$$\Lambda(t) = \frac{T_b(t) * \sigma(t)}{2,6} * 1$$

El precio del coste de reducción será igual al precio del coste de la tecnología backstop.

El costo de la tecnología backstop parece alto con relación a otras estimaciones, pero cabe señalar que este es el costo marginal de reducir la última unidad de emisiones de carbono y no el costo de fuentes relativamente baratas, como la generación de electricidad a carbón. Refleja el costo de reemplazar el carbono del último uso de alto valor, como los plásticos o el combustible para aviones.

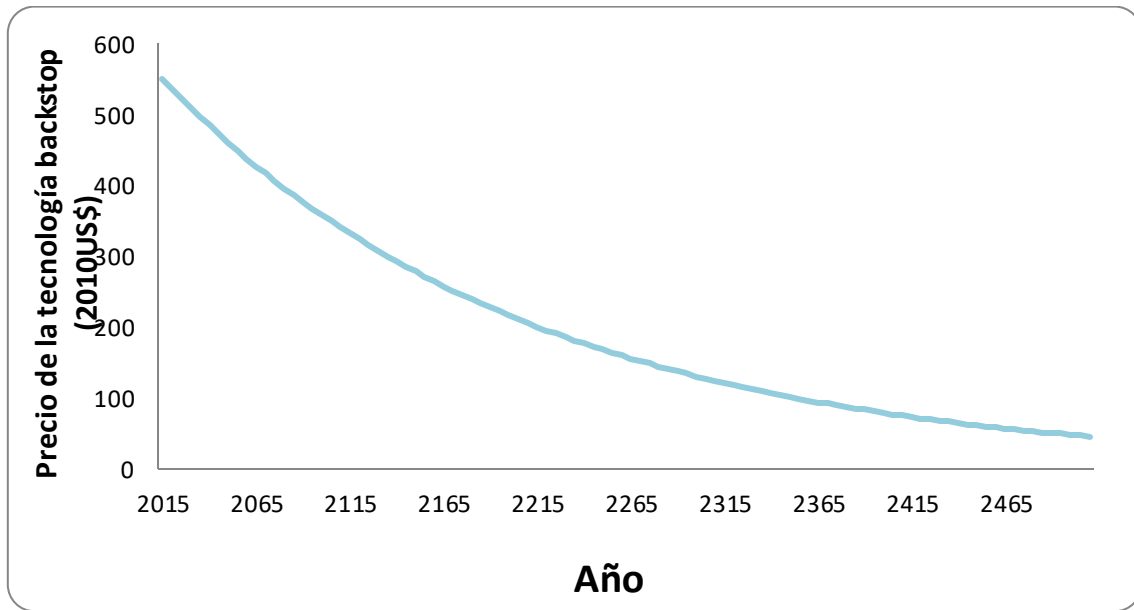


Figura 32. Precio de la tecnología backstop

Se observa en la Figura 32 como se proyecta un precio decreciente de la tecnología backstop.

5.2.1.3.6.1.2. Intensidad de carbono

$\sigma(t)$ refleja la intensidad de las emisiones equivalentes de CO_2 por unidad de producto bruto en ausencia de controles, es decir, la eficiencia energética. La intensidad de carbono se considera exógena y se construye a partir de estimaciones de emisiones de doce regiones. Las estimaciones de la intensidad de carbono de referencia son una ecuación de tipo logístico similar a la de la productividad total de los factores:

$$\sigma(t) = e^{g_{\sigma}(t)} * \sigma(t-1)$$

Ecuación 30. Intensidad de emisiones de CO_2

La tasa de crecimiento de la intensidad de emisiones se denota $g_{\sigma}(t)$, a la que el científico Jesse H. Ausubel denominó en el informe "Energy and Environment : The light path" (1991) la "tasa de descarbonización":

$$g_{\sigma}(t) = g_{\sigma}(t-1) * [1 - \delta_{\sigma}]$$

Ecuación 31. Tasa de descarbonización

Con esto, lo que se ha hecho es modelar la trayectoria de σ a partir de un valor inicial calculado y una disminución basada en datos históricos. El valor inicial de $\sigma(t)$ se calcula como

las emisiones industriales de CO^2 en el año 2015 (se obtienen de CDIAC) entre la producción bruta en el año 2015:

$$\sigma(2015) = \frac{E_{Ind}(2015)}{Y(2015)}$$

La década de 2010 mostró una descarbonización relativamente lenta, con una relación global $\frac{CO^2}{PIB}$ cambiando a -0.8% por año. Sin embargo, los datos más recientes indican un fuerte cambio a la baja, con la relación $\frac{CO^2}{PIB}$ global cambiando al -2,1% por año durante el período 2000 – 2015. Como se puede ver en la Figura 33, la intensidad del carbono ha ido disminuyendo a lo largo de los últimos años a una tasa media de 1,4 % al año debido a mejoras en la eficiencia energética y una transición energética lejos del carbón. Asume que como poco a poco, según los datos observado, ha ido disminuyendo la descarbonización, en el futuro seguirá ralentizándose.

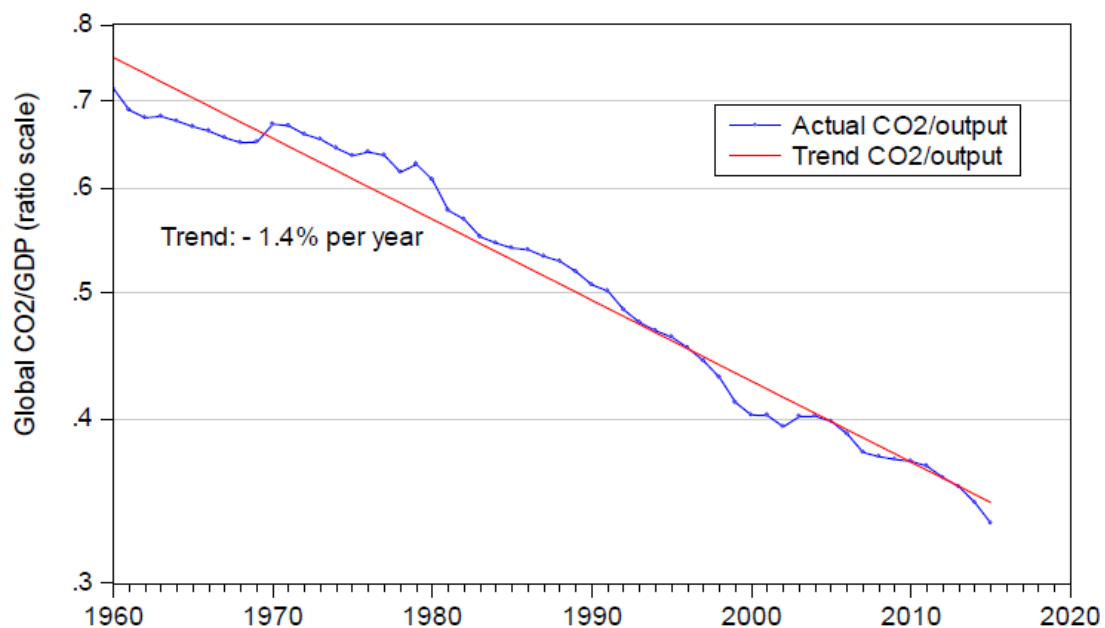


Figura 33. Intensidad del CO^2 en el tiempo (Fuente: “Question of balance”, Nordhaus.)

Debido a los datos históricos, en el modelo se asume una tasa de descarbonización inicial de -1.5%. Para el futuro, se supone que la tendencia histórica continúa, pero que la tasa de descarbonización se ralentiza poco a poco con la tasa decreciente de crecimiento de la productividad general. En otras palabras, se supone que la tasa de cambio tecnológico de ahorro de carbono es proporcional al crecimiento de la productividad total de los factores en la ecuación. Por lo tanto, sigma inicialmente disminuye en 1,5 por ciento anual, pero se

ralentiza en 0,10 por ciento cada 5 años. Esto, por supuesto, implica que σ eventualmente nivele en alguna proporción constante.

5.2.1.3.6.2. Tasa de control

Las emisiones de GEI pueden reducirse mediante una amplia gama de políticas. La tasa de reducción de emisiones se representa mediante una "tasa de control de emisiones", $\mu(t)$. La tasa de control $\mu(t)$, representa la reducción fraccionada de las emisiones en relación con las emisiones no controladas. Esta variable es central en el modelo, ya que una de las preguntas clave es la trayectoria óptima del control de emisiones. Las emisiones reales se reducen entonces en uno menos la tasa de reducción de emisiones, $[1 - \mu(t)]$.

La tasa de control de emisiones está determinada por la política de cambio climático que se examina. Las emisiones de CO_2 se proyectan en función de la producción total, una relación de emisiones-producción que varía en función del tiempo y de la tasa de control de emisiones.

La tasa de control de emisiones se modela como:

$$\mu(t) = MIN \left[\left(\frac{Precio\ CO_2(t)}{P_{back}(t)} \right)^{\frac{1}{1,6}} ; 1 \right]$$

Ecuación 32. Tasa de control de emisiones.

De tal forma que cuando:

$$Precio\ CO_2(t) = P_{back}(t)$$

La tasa de control de emisiones será 1, por lo que las $E_{Ind}(t)$ serán:

$$E_{Ind}(t) = [1 - 1] * \sigma(t) * Y(t) = 0$$

Como se ha dicho anteriormente, a partir del año 2150, considera que habrá tecnología para eliminar CO_2 de la atmósfera, por lo que a partir de ese año, cuando:

$$Precio\ CO_2(t) = P_{back}(t)$$

La tasa de control de emisiones será:

$$\mu(t) = 1,2$$

De tal forma que se eliminará CO_2 atmosférico a una velocidad de:

$$E_{Ind}(t) = [1 - 1,2] * \sigma(t) * Y(t) = -0,2 * \sigma(t) * Y(t)$$

Lo que supone con estas ecuaciones es que a medida que disminuya el precio del backstop y aumente el precio del CO_2 , va a empezar a ser más rentable la reducción de las emisiones. Por tanto, al principio las medidas a tomar al principio serán pequeñas, e irán aumentando con el tiempo a medida que disminuye el precio del backstop y aumenta el del CO_2 .

Lo que está pronosticando aquí es que conoce cuál va a ser la tasa de control en función de lo que le cuesta el coste de la tecnología y el precio del CO_2 . Si cuesta más la tecnología que la emisión de CO_2 , aumentarán las emisiones. En cambio, si cuesta menos la tecnología que la emisión de CO_2 , se dejará de emitir y se aplicará esa tecnología. Esto marca una senda óptima, y lo que presupone es que los agentes serán seres racionales y seguirán esa senda óptima. Y al final no se tiene que crear un modelo de equilibrio del mercado sino una relación entre el precio y el tipo de interés.

Este parámetro me marcará que políticas van a llevar a cabo los países. Hay que preguntarse cuál va a ser el grado de reducción de emisiones que los países van a desarrollar, la estrategia que van a llevar a cabo a lo largo de los próximos años.

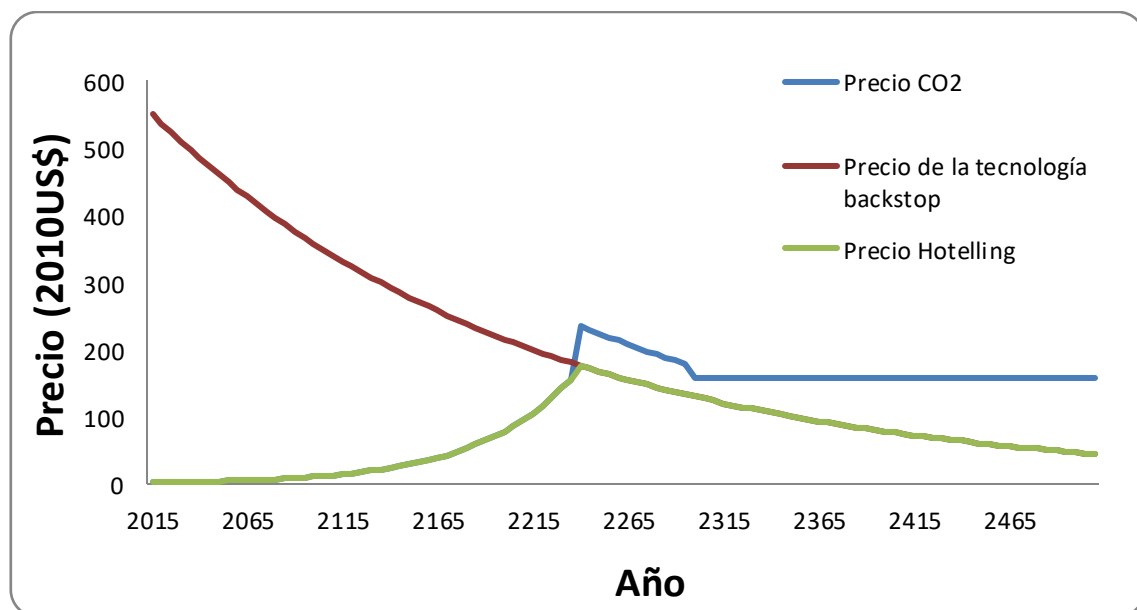


Figura 34. Senda óptima del precio

En la Figura 34 se puede ver que la senda del precio del CO_2 siempre seguirá la senda del precio más baja. Primeramente, el precio será marcado por el precio del CO_2 , pero al ir disminuyendo el precio de la tecnología backstop, llega un momento en el que será más barata que las emisiones de CO_2 , por lo que se supone que la sociedad será racional y utilizará la energía más barata.

Por ejemplo, en el escenario Base, se representa lo que sucedería si se siguiese actuando como hasta ahora, sin tomar apenas medidas. La curva de la tasa de reducción y costes de reducción son:

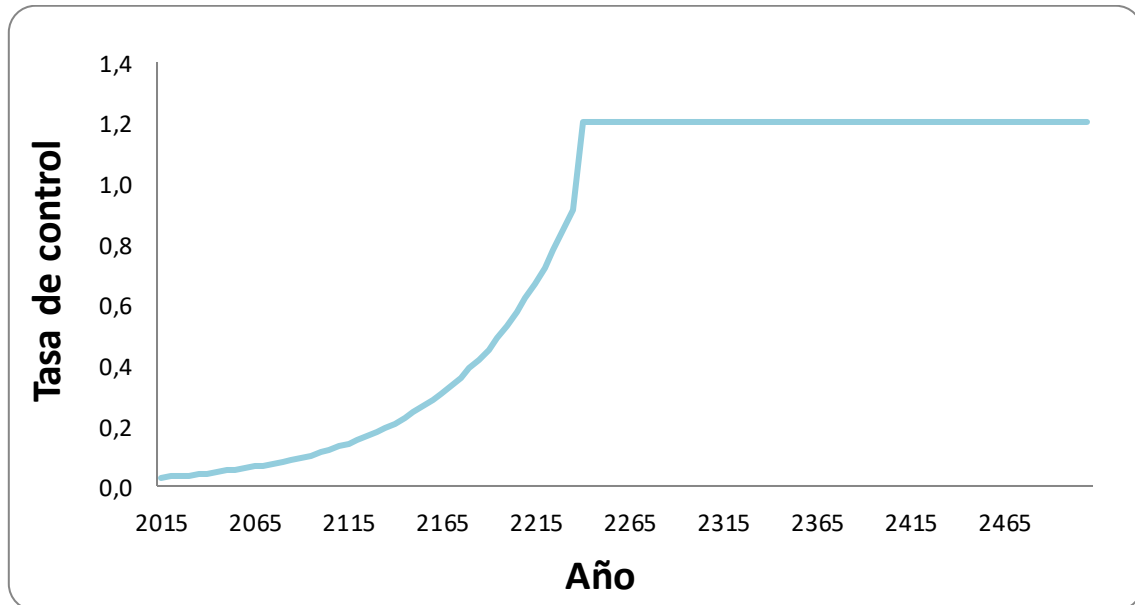


Figura 35. Tasa de control de emisiones (escenario base)

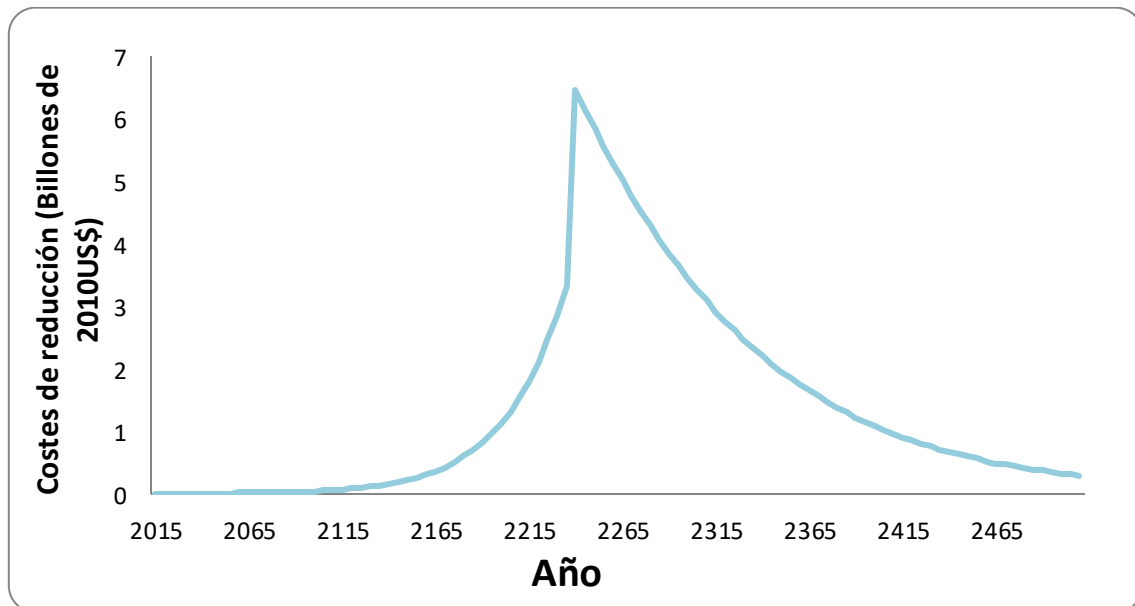


Figura 36. Costes de reducción (escenario base)

En cambio si se llega a un acuerdo y se dice, para el año 2050, se quiere llegar a una tasa de reducción de las emisiones industriales del 50 %. Lógicamente, aumentará más el precio de

reducción, ya que cuanto más pase el tiempo más barato será la tecnología de sustitución de los combustibles fósiles. Si se fija llegar a una tasa del 50 % de reducción al año 2050, aumentará el coste pero el aumento de temperatura será mucho menos que en el escenario base.

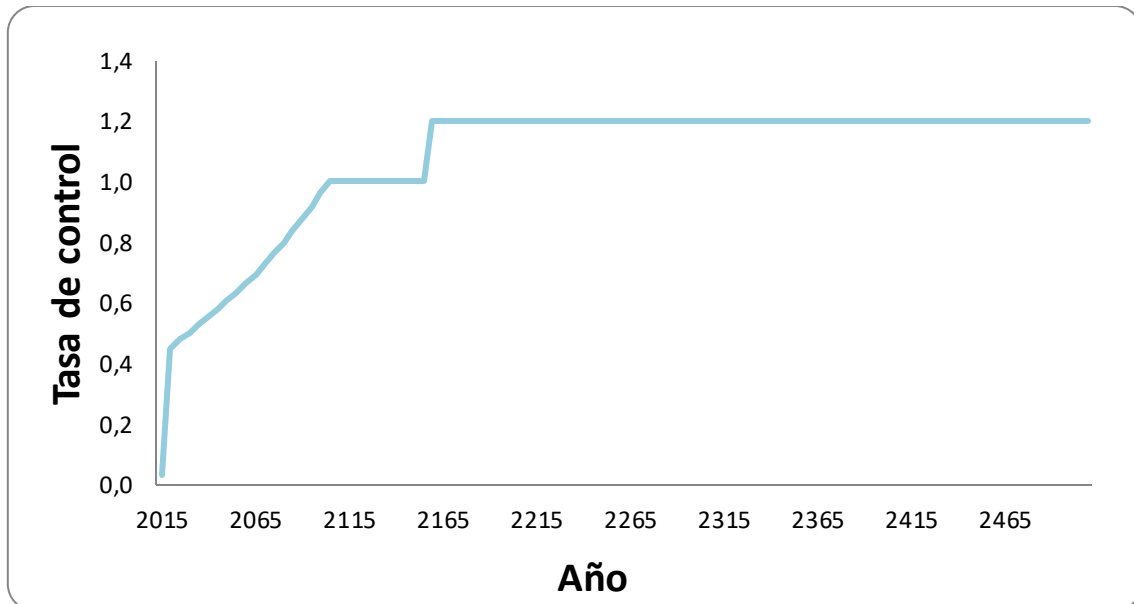


Figura 37. Tasa de control en escenario 50 % de reducción en 2050

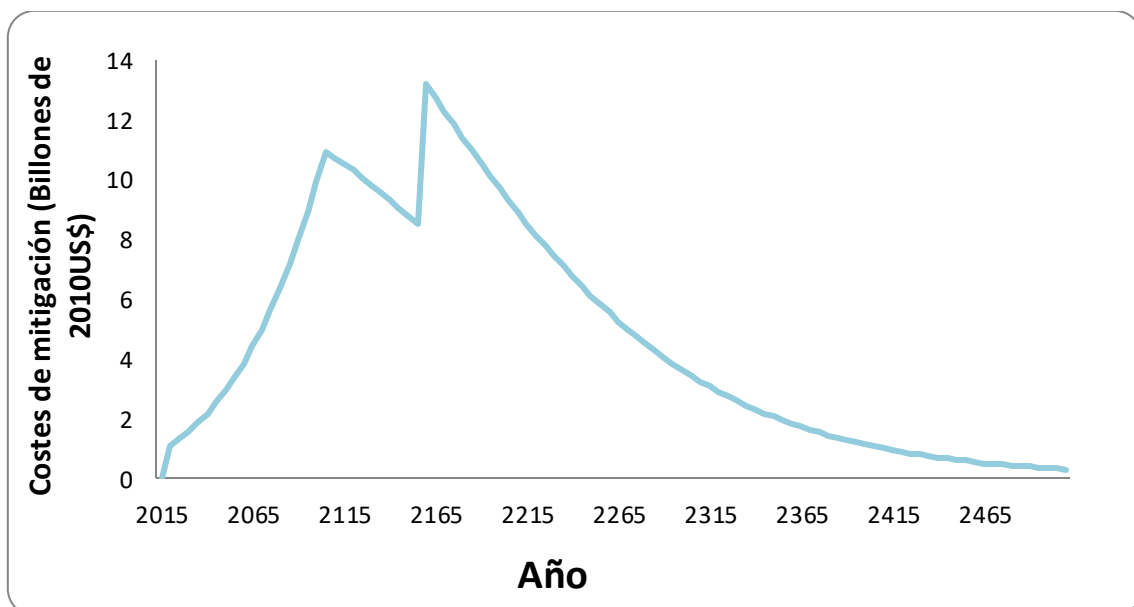


Figura 38. Costes de reducción en escenario 50 % de reducción en 2050

Como se puede observar, comparando la Figura 36 y la Figura 38, el coste de reducción es mucho mayor en la última, pero el incremento de temperatura del planeta es mucho menor.

5.2.1.3.6.2.1. Precio del CO₂

Otro concepto clave en la economía del cambio climático es el "precio del carbono" o, más precisamente, el precio que se aplica a las emisiones de CO₂. En una situación en la que las emisiones son limitadas, es útil pensar en la señal del mercado como un "precio del carbono". Esto representa el precio de mercado o la penalización que pagarían los que utilizan los combustibles fósiles y, por lo tanto, generan las emisiones de CO₂. El precio del carbono puede imponerse a través de un "impuesto sobre el carbono".

El enfoque del modelo consiste en utilizar precios, tasas o impuestos armonizados como método de coordinación de las políticas entre los países. Es decir, busca abordar el cambio climático a través de los precios en lugar de las cantidades. Es un mecanismo llamado "impuestos armonizados sobre el carbono". Este mecanismo sustituye los límites internacionales o nacionales de emisión obligatorios. Conceptualmente, el impuesto sobre el carbono es un impuesto pigoviano dinámicamente eficiente que equilibra los costos sociales marginales y los beneficios sociales marginales de las emisiones adicionales.

Los impuestos pigovianos son un tipo de impuestos que buscan corregir una externalidad negativa. En su actividad, las empresas pueden producir externalidades negativas como la contaminación. El efecto del impuesto es lograr que el costo marginal privado (lo que le cuesta al productor producir) más el impuesto sea igual al costo marginal social (lo que le cuesta a la sociedad, incluyendo al productor, que produzca).

El precio del carbono podría ser determinado por las estimaciones del precio necesario para limitar las concentraciones de GEI o los cambios de temperatura por debajo de un nivel considerado como "interferencia peligrosa", o podría ser el precio que induciría el nivel eficiente de control.

Habría que negociar muchos detalles importantes sobre el reparto de la carga. Podría ser razonable permitir que la participación plena dependa del nivel de desarrollo económico de cada país.

Por ejemplo, se podría esperar que los países participen plenamente sólo cuando sus ingresos alcancen un umbral determinado, y los países pobres podrían recibir transferencias para fomentar una participación temprana y completa. Si los precios del carbono se igualan entre los países participantes, no habrá necesidad de aranceles o ajustes fiscales en la frontera entre los participantes.

Supone que el precio inicial del CO₂ es igual a 2 2010US\$ por tCO₂ y una tasa de crecimiento de 0,1048 cada 5 años.

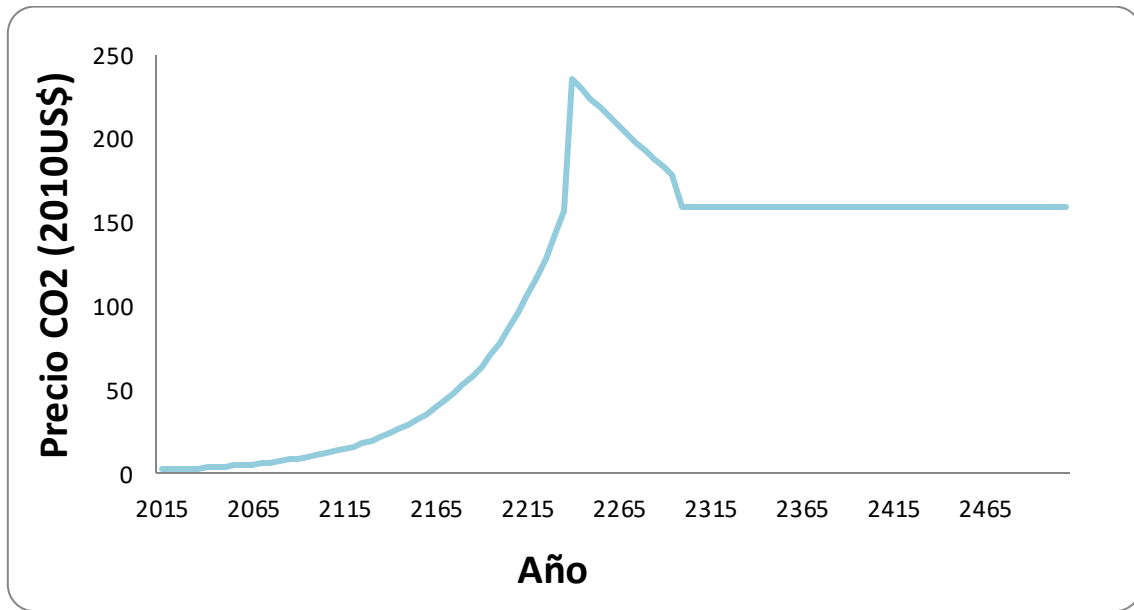


Figura 39. Precio del CO₂ influenciado

5.2.2. Consumo

El consumo es una variable endógena del programa. La siguiente ecuación muestra la disposición de la producción entre el consumo, $C(t)$ y la inversión bruta, $I(t)$:

$$Q_{neta}(t) = C(t) + I(t)$$

Por tanto, el consumo es igual a:

$$C(t) = Q_{neta}(t) - I(t)$$

Ecuación 33. Consumo

La producción o renta se divide en inversión y consumo, por lo que a mayor inversión menor consumo.

5.2.2.1. Emisiones industriales de CO₂

La ecuación de las emisiones industriales de CO₂ vincula las emisiones de CO₂ a la actividad económica. Al modelar las emisiones de CO₂, se asume que la proporción de emisiones de CO₂ y de producción bruta disminuye lentamente (es decir, el ratio emisiones producción va disminuyendo, ya que se van a ir reduciendo las emisiones). Las emisiones industriales incontroladas se representan como:

$$E_{Ind}(t) = [1 - \mu(t)] * \sigma(t) * Y(t)$$

Ecuación 34. Emisiones industriales de CO₂

Por lo tanto:

$$E_{Ind}(t) = \sigma(t) * [1 - \mu(t)] * A(t) * K(t)^\gamma * L(t)^{1-\gamma}$$

Como:

$$\sigma = \frac{E_{Ind}}{Y}$$

Las emisiones industriales de CO₂ serán igual a:

$$E_{Ind}(t) = [1 - \mu(t)] * e^{g_\sigma(t)} * \frac{E_{Ind}(t-1)}{Y(t-1)} * Y(t)$$

$$E_{Ind}(t) = [1 - \mu(t)] * e^{g_\sigma(t)} * E_{Ind}(t-1) * g_Y(t)$$

Es decir, las emisiones industriales están afectadas por tres factores:

- La tasa de control.
- La tasa de descarbonización.
- El crecimiento de la producción bruta.

Tanto la tasa de control como la tasa de descarbonización disminuirán las emisiones, mientras que el crecimiento, al ser modelado como positivo, las aumentará.

Solo se dejarán de producir emisiones de CO₂ cuando:

$$E_{Ind}(t) = 0 = [1 - \mu(t)] * e^{g_\sigma(t)} * E_{Ind}(t-1) * g_Y(t)$$

$$\mu(t) = 1$$

Y esto es cuando el precio del CO₂ es igual al precio del backstop. Por tanto, lo que asume es que las emisiones de CO₂ irán disminuyendo según se vaya encareciendo el CO₂, ya sea porque se estén acabando los recursos o por impuestos, y además se vaya abaratando la energía backstop debido al progreso tecnológico.

5.3. Ecuaciones geofísicas

Las ecuaciones geofísicas relacionan las emisiones del CO₂ a la atmósfera con el cambio climático que provocan. Lo hacen a través de unas ecuaciones que representan el ciclo del carbono, una ecuación de forzamiento radiativos y dos ecuaciones de incrementos de temperatura debidos a esos forzamientos.

5.3.1. Emisiones totales

En el modelo DICE, el único GEI que está sujeto a controles es el CO₂ industrial, por lo que sólo las emisiones industriales de CO₂ son endógenas. Esto refleja el hecho de que el CO₂ es el principal contribuyente al calentamiento global y que es probable que otros GEIs sean controlados de diferentes maneras (un ejemplo es el caso de los clorofluorocarbonos, que están controlados a través del Protocolo de Montreal). De esta forma, los otros GEIs (incluidos los CO₂ derivados de los cambios en el uso de la tierra) se incluyen como tendencias exógenas en el forzamiento radiativo y se proyectan sobre la base de estudios realizados por otros grupos de modelos.

La siguiente ecuación representa las emisiones totales de CO₂ como la suma de las emisiones industriales y las debidas a los cambios de uso de la tierra. Las emisiones totales en cada periodo será (GtCO₂ por año):

$$E(t) = E_{Ind}(t) + E_{Land}(t)$$

Ecuación 35. Emisiones totales de CO₂

Dónde;

- $E_{Ind}(t)$ = emisiones industriales.
- $E_{Land}(t)$ = emisiones debidas al cambio de uso de la tierra.

5.3.1.1. Cambio en el uso de la tierra

En el modelo, el CO₂ resultante de los cambios en el uso de la tierra es exógeno y se proyecta basándose en los estudios de la FAO, tanto su valor inicial como la tasa de disminución:

$$E_{Land}(t) = E_{Land}(t - 1) * (1 - \vartheta)^t$$

Ecuación 36. Emisiones por cambio de uso de la tierra

Dónde:

- ϑ = tasa de disminución de emisiones de los cambios del uso de la tierra.

Las emisiones de CO₂ debidos al cambio de uso de la tierra irán disminuyendo exponencialmente tal que:

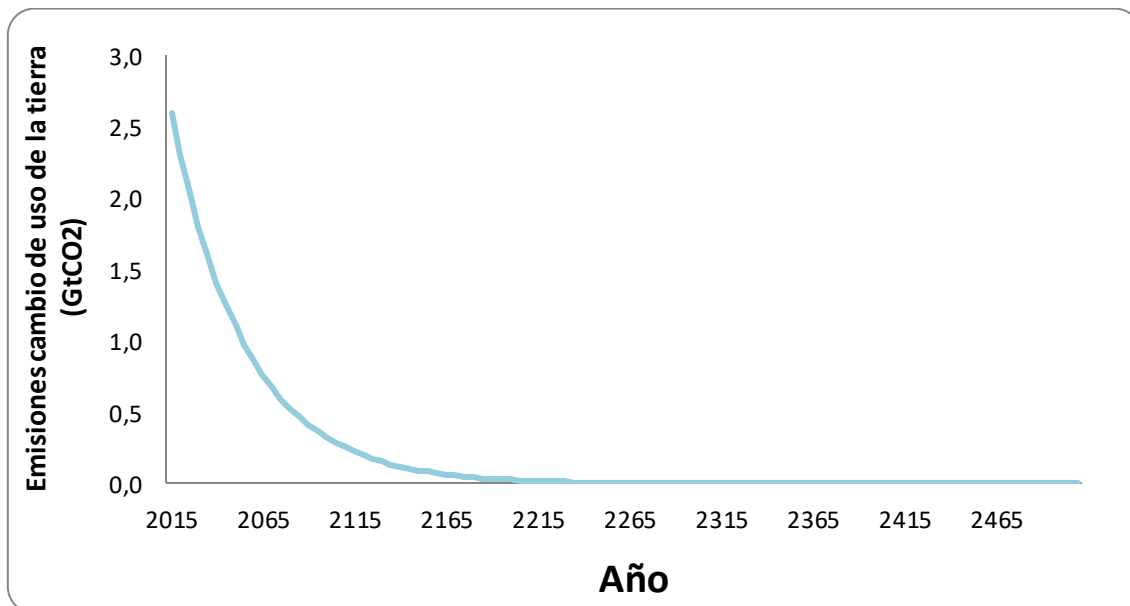


Figura 40. Emisiones por cambio de uso de la tierra

Se modeliza un ritmo de decrecimiento bastante rápido, alcanzando en 70 años una emisión 5 veces más pequeña que la actual. En el año 2250 llega a ser prácticamente 0.

5.3.2. Modelo climático

Para desarrollar modelos integrados de clima y economía, es necesario contar con un modelo relativamente pequeño que vincule las concentraciones de GEI y las principales variables climáticas. El modelo incluye sólo el impacto de los GEI en la temperatura media global, aunque esta variable no es la más importante para los impactos de los GEI. Variables como la precipitación o los flujos de agua, junto con extremos de sequías, inundaciones y heladas, son más importantes para la actividad económica que la temperatura promedio. La temperatura media se elige porque es un índice útil del cambio climático que tiende a asociarse con la mayoría de los cambios importantes. Debido a que la precipitación y otras variables están altamente correlacionadas con la magnitud del cambio de temperatura global, se puede emplear con seguridad el cambio de la temperatura como un índice para impactos en enfoques globales como el modelo DICE.

Los modeladores del clima han desarrollado una gran variedad de enfoques para estimar el impacto del aumento de los GEI en las variables climáticas. En general, los modelos de investigación existentes son demasiado complejos para ser incluidos en los modelos económicos, en particular los que se utilizan para la optimización. Es por ello que el modelo DICE emplea un pequeño modelo estructural que recoge la relación básica entre:

- La concentración de gases de efecto invernadero (GEI) conforme a las emisiones futuras.

- El forzamiento radiativo resultante de las concentraciones y emisiones de gases de efecto invernadero.
- La respuesta de la temperatura media mundial al forzamiento radiativo calculado.

5.3.2.1. Ciclo del carbono

Para representar el ciclo del carbono, el modelo supone que la acumulación de CO₂ y el transporte pueden representarse como un modelo lineal (o más precisamente, linealizado) de tres depósitos en el que cada uno de los depósitos está bien mezclado. Las tres capas o depósitos son:

- La atmósfera.
- Un depósito de mezcla rápida en los océanos superiores y la biosfera.
- Los océanos profundos.

La Figura 41 presenta un esquema del ciclo de carbono modelizado:

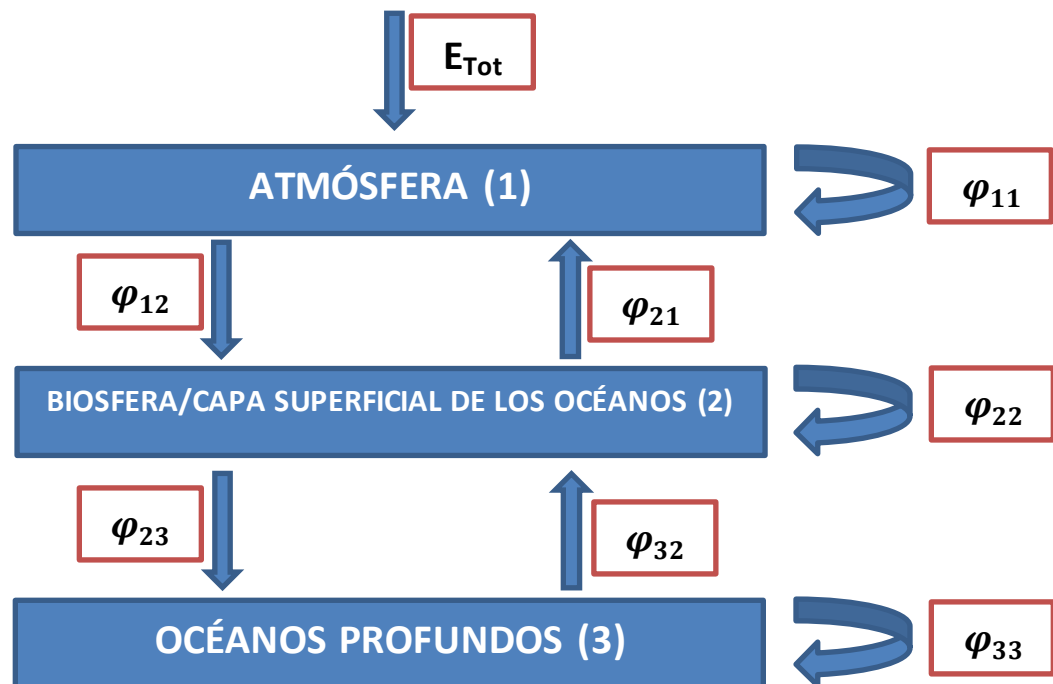


Figura 41. Esquema del ciclo del carbono

Los océanos profundos proporcionan un sumidero finito, aunque inmenso, para el carbono a largo plazo. Se supone que cada uno de los tres embalses está bien mezclado a corto plazo, mientras que la mezcla entre los depósitos superiores y los océanos profundos es extremadamente lenta. El carbono fluye en ambas direcciones entre los depósitos contiguos, representado mediante unos coeficientes de flujo.

El modelo está calibrado para estimaciones a largo plazo, como los impactos en el derretimiento de grandes capas de hielo, ajustándose la retención atmosférica de CO₂ durante períodos de hasta 4000 años. Esta versión del modelo DICE está basada en estudios de Archer et al. (2009), simulando el comportamiento a largo plazo de modelos más grandes con la química completa del océano.

Se asume que las emisiones de CO₂ van directamente a la atmósfera, calentándola. De la atmósfera pasan a la biosfera y a la superficie de los océanos y de ahí a los océanos profundos, aumentando así su temperatura.

El ciclo de carbono se representa mediante una ecuación general:

$$M_j(t) = \varphi_{0j} * E(t) + \sum_{i=1}^3 \varphi_{ij} * M_i(t-1)$$

Ecuación 37. Ecuación general del ciclo del carbono

En cada depósito o capa, la Ecuación 37 se particulariza de la siguiente manera:

- **Concentración atmosférica de carbono (GtC)**

$$M_{AT}(t) = E(t) + \varphi_{11} * M_{AT}(t-1) + \varphi_{21} * M_{UP}(t-1)$$

Ecuación 38. Concentración atmosférica de carbono

Donde el coeficiente φ_{ij} representa:

- φ_{11} = coeficiente del flujo de carbono en la atmósfera.
- φ_{21} = coeficiente del flujo de carbono de la biosfera a la atmósfera.
- $E(t)$ = emisiones totales de CO₂.
- M_{AT} = concentración de CO₂ atmosférica.
- M_{UP} = concentración de CO₂ en la biosfera/capas superficiales de los océanos.

Como se observa en la ecuación y como se ha dicho anteriormente, se considera que las emisiones totales de CO₂ van en su totalidad a la atmósfera.

Lo que indica es que la concentración de carbono en la atmósfera en cada periodo será la suma de:

- Las emisiones de carbono totales emitidas en ese periodo.
- El porcentaje de carbono atmosférico que siga retenido en la atmósfera.
- El flujo de carbono que le llegue desde la biosfera.

- **Concentración de carbono en la biosfera y en la capa superior de los océanos (GtC)**

$$M_{UP}(t) = \varphi_{12} * M_{AT}(t-1) + \varphi_{22} * M_{UP}(t-1) + \varphi_{32} * M_{LO}(t-1)$$

Ecuación 39. Concentración de carbono en la biosfera/capa superficial de los océanos

Donde el coeficiente φ_{ij} representa:

- φ_{21} = coeficiente del flujo de carbono de la atmósfera a la biosfera.
- φ_{22} = coeficiente del flujo de carbono en la biosfera.
- φ_{32} = coeficiente del flujo de carbono de los océanos profundos a la biosfera.
- M_{LO} = concentración de CO_2 en las profundidades del océano.

La concentración de carbono en cada periodo será la suma de:

- El flujo de carbono que le llegue desde la atmósfera.
- El porcentaje de carbono que ya estaba en la biosfera y siga en ella.
- El flujo de carbono que le llegue desde los océanos profundos.

- **Concentración de carbono en las capas inferiores de los océanos (GtC)**

$$M_{UP}(t) = \varphi_{23} * M_{UP}(t-1) + \varphi_{33} * M_{LO}(t-1)$$

Ecuación 40. Concentración de carbono en las profundidades de los océanos

Donde el coeficiente φ_{ij} representa:

- φ_{23} = coeficiente del flujo de carbono de la biosfera a los océanos profundos.
- φ_{33} = coeficiente del flujo de carbono en los océanos profundos.

La concentración en las capas inferiores de los océanos en cada periodo será:

- El flujo de carbono que llegue desde la biosfera.
- El porcentaje de carbono que quede retenido en los océanos profundos.

Los parámetros φ_{ij} representan los parámetros de flujo entre depósitos.

φ_{11} , φ_{22} y φ_{33} representa el porcentaje de carbono que queda contenido en cada uno de los depósitos en cada periodo. En cambio, φ_{21} , φ_{12} , φ_{23} y φ_{32} , representan el porcentaje de carbono que va de unos depósitos a los otros en cada periodo. Para calibrar los parámetros del modelo se aceptan valores de otros estudios, a partir de los cuales se calculan los restantes.

Los parámetros asumidos son:

- φ_{12}
- φ_{23}
- Concentración de equilibrio en la atmósfera (año 1750)
- Concentración de equilibrio en biosfera/ capas superficiales del océano (año 1750)
- Concentración de equilibrio en los océanos profundos (año 1750)

Los demás coeficientes de flujos se imponen suponiendo que el sistema en el año 1750 estaba en equilibrio, lo cual impone una linealidad en el modelo. Al estar en equilibrio, debe de ser igual lo que entra a lo que sale en cada capa. El cálculo es el siguiente:

Al ser lineal:

$$\varphi_{12} * M_{AT} = \varphi_{21} * M_{UP}$$

por lo que despejando:

$$\varphi_{21} = \frac{\varphi_{12} * M_{AT}}{M_{UP}}$$

Y sabiendo estos dos coeficientes ya se puede sacar:

$$\varphi_{11} = 1 - \varphi_{12}$$

$$\varphi_{22} = 1 - \varphi_{21} - \varphi_{23}$$

Para los otros dos coeficientes de flujo sería exactamente igual:

$$\varphi_{32} = \frac{\varphi_{23} * M_{UP}}{M_{LO}}$$

Y el restante:

$$\varphi_{33} = 100 - \varphi_{32}$$

5.3.2.2. Forzamiento radiativo

La ecuación de forzamiento radiativo calcula el impacto de la acumulación de los GEI en el balance de la radiación del globo terrestre. La acumulación de gases de efecto invernadero conduce al calentamiento de la superficie terrestre a través de los aumentos en los forzamientos radiativos. La relación entre las acumulaciones de GEI y el aumento del forzamiento radiativo deriva de mediciones empíricas y de modelos climáticos. La ecuación del forzamiento radiativo se expresa como:

$$F(t) = \eta * \left\{ \log_2 * \left[\frac{M_{AT}(t)}{M_{AT}(1750)} \right] \right\} + F_{EX}(t)$$

Ecuación 41. Forzamiento radiativo total

Donde:

- η es el forzamiento radiativo para el doble de concentración atmosférica de CO² que en el año 1750, etapa preindustrial.
- $M_{AT}(t)$ es la concentración atmosférica de CO₂ (o su equivalente) en billones de toneladas de carbono en el tiempo t.
- $M_{AT}(1750)$ es la concentración de equilibrio atmosférica de CO₂ (o su equivalente) en billones de toneladas de carbono en el año 1750.

- $F_{EX}(t)$ es el forzamiento exógeno. Representa otros GEI (principalmente CH_4 y N_2O). Estos otros gases representan una pequeña fracción del potencial de calentamiento total, sus fuentes son poco comprendidas y las técnicas para prevenir su acumulación son incompletas hoy en día. Por lo tanto se toman como exógenas.

La parametrización en la ecuación anterior no es controvertida. Se basa en las conversiones suministradas por T. Wigley y utilizadas en el informe del IPCC (1990).

Esta ecuación representa el cambio en el forzamiento radiativo total de los gases de efecto invernadero desde 1750 de fuentes antropogénicas.

5.3.2.2.1. Forzamiento exógeno

Como ya se ha comentado, los GEI que no son CO_2 son tratados exógenamente en el modelo DICE. Los forzamientos radiativos exógenos en el año 2010 y las proyecciones hasta 2100 son de proyecciones preparadas para la Quinta Evaluación del IPCC.

Para definir la ecuación, toma los valores de:

- $F_{ex}(2015)$
- $F_{ex}(2100)$

El forzamiento exógeno se define como:

$$F_{ex}(t) = F_{ex}(2015) + \frac{1}{17} * [F_{ex}(2100) - F_{ex}(2015)] * (t - 1)$$

Ecuación 42. Forzamiento exógeno

Por lo que hasta el año 2100 se aplicará la Ecuación 42, mientras que luego $F_{ex}(t)$ será constante igual a la unidad.

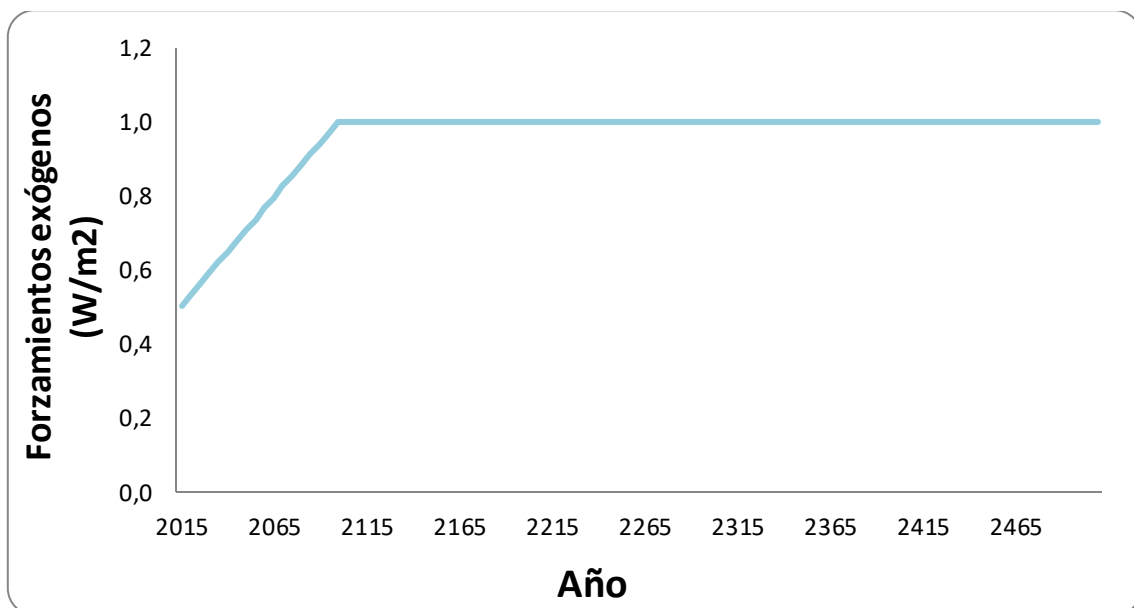


Figura 42. Forzamientos exógenos

Presupone un crecimiento lineal de los forzamientos exógenos hasta que llega a 1 y se mantiene constante.

5.3.2.3. Ecuaciones climáticas

Calculan el incremento de la temperatura media de la superficie terrestre y la temperatura media de las capas profundas de los océanos para cada periodo respecto al periodo año 1920-1940.

La respuesta del clima depende tanto de la sensibilidad climática como de la tasa de captación de calor por los océanos. La sensibilidad climática es una medida del cambio de la temperatura mundial de la superficie correspondiente a un forzamiento radiativo específico.

- **Incremento temperatura atmosférica**

$$T_{AT}(t) = T_{AT}(t-1) + \xi_1 * \{F(t) - \xi_2 * T_{AT}(t-1) - \xi_3 * [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)]\}$$

Ecuación 43. Incremento de la Tª atmosférica

Dónde:

- ξ_1 = velocidad del parámetro de ajuste para la temperatura atmosférica.
- ξ_3 = coeficiente de pérdida de calor de la atmósfera a los océanos.
- $\xi_2 = \frac{\eta}{T^a \text{ equilibrio para el doble de } CO_2}$
- T_{AT} es el aumento de la temperatura media global y estacional en la atmósfera y el nivel superior del océano.
- T_{LO} es el aumento de la temperatura en los océanos profundos.
- $F(t)$ es el aumento del forzamiento radiativo en la atmósfera.

- **Incremento temperatura en las capas inferiores de los océanos:**

$$T_{LO}(t) = T_{LO}(t-1) + \xi_4 * \{T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)\}$$

Ecuación 44. Incremento de Tª en las capas inferiores de los océanos

Dónde:

- ξ_4 = Coeficiente de ganancia de calor de las capas profundas de los océanos.

Los valores de los coeficientes se han obtenido de estimaciones de fuentes tales como el registro instrumental y estimaciones basadas en las reconstrucciones paleoclimáticas. El módulo climático ha sido calibrado para reflejar los modelos recientes del sistema de tierra.

Se ha establecido la sensibilidad al clima de equilibrio (ECS, sus siglas en inglés) utilizando el análisis de Olsen et al. (2012). La estimación final es un calentamiento medio de 3,1 ° C para una duplicación de CO2 de equilibrio.

Las ecuaciones se pueden entender en términos de un ejemplo simple del impacto de una fuente de calentamiento en un charco de agua. Supongamos que se enciende una lámpara que da calor (esto es el aumento de $F(t)$ o forzamientos radiativos). La parte superior del charco junto con el aire se calienta gradualmente. El calor, poco a poco, se difunde en la parte inferior. Los retrasos en el calentamiento de la superficie en este ejemplo simple están determinados por el tamaño del charco (es decir, por su inercia térmica) y por la velocidad de mezcla de los diferentes niveles de la piscina.

5.3.2.3.1. Sensibilidad climática

La sensibilidad climática es el aumento de temperatura debido al doble de concentración de CO_2 en la atmósfera respecto a la concentración de equilibrio ($^{\circ}\text{C}$ por el doble de CO_2 de equilibrio).

Se ha establecido la sensibilidad al clima de equilibrio utilizando el análisis de Olsen et al. (2012). El estudio de Olsen et al. utiliza un enfoque bayesiano, basado en estudios previos, principalmente en Knutti y Hegerl (2008) y una probabilidad basada en datos observacionales o modelados, tal como la temperatura en superficie promedio global. La estimación final es un calentamiento medio de $3,1^{\circ}\text{C}$ para una duplicación de CO_2 de equilibrio.

5.4. Coste social del carbono

Como ya se ha comentado anteriormente, el coste social del carbono es el concepto económico más importante en la economía del cambio climático. Este término designa el costo económico causado por una tonelada adicional de emisiones de dióxido de carbono o su equivalente. En una definición más precisa, es el cambio en el valor descontado del bienestar económico de una tonelada adicional de emisiones de CO_2 equivalente.

Resolviendo todas las ecuaciones anteriores mediante la optimización de la función de bienestar social (W), se obtiene una trayectoria de todas las variables. Se define el SCC en el tiempo t como:

$$SCC(t) \equiv \frac{\frac{\partial W}{\partial E(t)}}{\frac{\partial W}{\partial C(t)}}$$

El numerador es el impacto marginal del bienestar de las emisiones en el tiempo t , y el denominador es el impacto marginal del bienestar de una unidad de consumo agregado en el período t . Esto es igual a:

$$SCC(t) \equiv \frac{\partial C(t)}{\partial E(t)}$$

El SCC es igual al impacto económico de una unidad de emisiones en términos de consumo en un periodo t . El SCC está en función del tiempo porque el daño marginal de las emisiones cambia con el tiempo.

6. RESUMEN ECUACIONES DEL MODELO

1. $W = \sum_{t=1}^{T_{max}} U[c(t), L(t)]R(t)$
2. $V[c(t), L(t)] = L(t) * U[c(t)]$
3. $U[c(t)] = \left[\frac{(c(t)^{(1-\alpha)} - 1)}{1-\alpha} - 1 \right]$
4. $L(t) = L(t-1) * \left(\frac{Lasintótica}{L(t-1)} \right)^{0,1340}$
5. $c(t) = \frac{C(t)}{L(t)}$
6. $R_t = e^{-\rho * t} = (1 + \rho)^{-t}$
7. $Y(t) = A(t) * K(t)^\gamma * L(t)^{1-\gamma}$
8. $Q(t) = \Omega(t) * [1 - \Lambda(t)] * A(t) * K(t)^\gamma * L(t)^{1-\gamma}$
9. $A(t) = \frac{A(t-1)}{1 - g_A(t)}$
10. $g_A(t) = \frac{g_A(t-1)}{(1 + \delta_A)^t}$
11. $k(t) = (1 - \delta_k) * k_{t-1} + I_{t-1}$
12. $I(t) = S(t) * Q(t)$
13. $\Omega(t) = \frac{D(t)}{[1 + D(t)]}$
14. $D(t) = \psi_1 * [T_{AT}(t)]^2$
15. $\Lambda(t) = \theta_1(t) * \mu(t)^{\theta_2}$
16. $\theta_1(t) = \frac{T_b(t) * \sigma(t)}{2,6} * 1000$
17. $Tb(t) = Tb(t-1) * (1 - \varepsilon)$
18. $\sigma(t) = e^{g_\sigma(t)} * \sigma(t-1)$

$$19. g_{\sigma}(t) = g_{\sigma}(t-1) * [1 - \delta_{\sigma}]$$

$$20. \mu(t) = \left[\left(\frac{\text{Precio } CO_2(t)}{Pb(t)} \right)^{\frac{1}{1,6}}; 1 \right]$$

$$21. C(t) = Qneta(t) - I(t)$$

$$22. CCum \geq \sum_{t=1}^{Tmax} E_{Ind}(t)$$

$$23. E(t) = E_{Ind}(t) + E_{Land}(t)$$

$$24. E_{Ind}(t) = [1 - \mu(t)] * \sigma(t) * Y(t)$$

$$25. E_{Land}(t) = E_{Land}(t-1) * (1 - \vartheta)$$

$$26. M_{AT}(t) = E(t) + \varphi_{11} * M_{AT}(t-1) + \varphi_{21} * M_{UP}(t-1)$$

$$27. M_{UP}(t) = \varphi_{21} * M_{AT}(t-1) + \varphi_{22} * M_{UP}(t-1) + \varphi_{32} * M_{LO}(t-1)$$

$$28. M_{LO}(t) = \varphi_{23} * M_{UP}(t-1) + \varphi_{33} * M_{LO}(t-1)$$

$$29. F(t) = \eta * \left\{ \log_2 * \left[\frac{M_{AT}(t)}{M_{AT}(1750)} \right] \right\} + F_{EX}(t)$$

$$30. T_{AT}(t) = T_{AT}(t-1) + \xi_1 * \{F(t) - \xi_2 * T_{AT}(t-1) - \xi_3 * [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)]\}$$

$$31. T_{LO}(t) = T_{LO}(t-1) + \xi_4 * \{T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)\}$$

7. VARIABLES Y PARÁMETROS DEL MODELO DICE

VARIABLES EXÓGENAS	
$A(t)$	= Factor de productividad total (unidades de productividad)
$E_{Land}(t)$	= Emisiones de carbono por el uso de la tierra (GtC por año)
$L(t)$	= Población e insumos de trabajo (millones)
$F_{EX}(t)$	= Forzamiento radiativo exógeno (wattios/m ² desde 1900)
$R(t)$	= Tasa de descuento social
t	= Periodo de 5 años (2015-2020, 2020-2025,...)
Pback	Tecnología backstop (2010US\$ por tCO ₂)

VARIABLES ENDÓGENAS	
$C(t)$	= Consumo total de bienes y servicios (billones de 2010US\$)
$c(t)$	= Consumo per cápita de bienes y servicios (billones de 2010US\$ por persona)
$E_{Ind}(t)$	= Emisiones industriales de carbono (GtC por año)
$E(t)$	= Emisiones totales de carbono (GtC por año)
$F(t)$	= Forzamiento radiativo total (wattios/m ² desde 1900)
$K(t)$	= Stock de capital (billones de 2010US\$)
$M_{AT}(t)$	= Concentración de carbono en la atmósfera (GtC desde 1750)
$M_{UP}(t)$	= Concentración de carbono en la superficie de los océanos (GtC desde 1750)
$M_{LO}(t)$	= Concentración de carbono en los océanos profundos (GtC desde 1750)
$Q(t)$	= Producción neta (billones de 2010US\$)
$Y(t)$	= Producción bruta (billones de 2010US\$)
$T_{AT}(T)$	= Temperatura media global atmosférica (aumento de °C desde 1900)
$T_{LO}(T)$	= Temperatura media global en las capas profundas de los océanos (aumento de °C desde 1900)
$V[c(t), L(t)]$	= Función de utilidad instantánea
W	= Función objetivo en valor presente de la utilidad
$\Lambda(t)$	= Función del coste de reducción (billones de 2010US\$)
$\Omega(t)$	= Función de daño (billones de 2010US\$)
$\sigma(t)$	= Relación entre emisiones industriales no controladas y producción (MtCO ₂ / \$1000 2010\$)
$I(t)$	= Inversión (billones de 2010US\$)

VARIABLES POLÍTICAS	
$\mu(t)$	= Tasa de control de emisiones

PARÁMETROS	
α	= Elasticidad de la utilidad marginal del consumo
CCum	= Máximo consumo de combustibles fósiles (GtC)
γ	= Elasticidad de la producción per cápita
δ_K	= Tasa de depreciación del capital (por periodo)
$R(t)$	= Tasa de preferencia temporal
ρ	= Tasa de preferencia temporal pura

$\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{21},$ $\phi_{22}, \phi_{23}, \phi_{32},$ ϕ_{33}	=	Parámetros del ciclo del carbono
ψ_1, ψ_2	=	Parámetros de la función de daño
$\theta_1(t), \theta_2$	=	Parámetros de la función de coste de reducción de las emisiones
$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$	=	Parámetros de las ecuaciones climáticas

VALORES INICIALES DE LAS VARIABLES Y PARÁMETROS		
FUNCIÓN OBJETIVO		
t	=	5 Años
α	=	1,45
ρ	=	0,015
$L(2015)$	=	7.403 Millones de personas
g_L	=	0,1340
L_{Max}	=	11.500 Millones de personas

PRODUCCIÓN		
γ	=	0,3
$A(2015)$	=	5,115
g_A	=	0,0760
δ_A	=	0,005
$K(2015)$	=	223 billones de 2010US\$
δ_K	=	0,10
$Y(2015)$	=	105.100,000 billones de 2010US\$

EMISIONES		
$\sigma(t)$	=	0,350140 $tCO_2 / 1000$ 2010\$
$g_\sigma(t)$	=	0,0152
δ_σ	=	0,0010
$E_{Ind}(2015)$	=	35.71 GtC/año
$E_{Land}(2015)$	=	2,6 GtC/año
$\mu(t)$	=	0,3

CICLO DEL CARBONO		
$M_{AT}(2015)$	=	851 GtC
$M_{UP}(2015)$	=	460 GtC
$M_{LO}(2015)$	=	1.740 GtC
$M_{AT}(1750)$	=	588 GtC
$M_{UP}(1750)$	=	360 GtC
$M_{LO}(1750)$	=	1.720 GtC
ϕ_{12}	=	0,12

$$\emptyset_{23} = 0,07$$

MODELO CLIMÁTICO			
ECS	=	3,1	°C
F _{EX} (hasta 2050)	=	0,50	W/m ²
F _{EX} (hasta 2100)	=	1	W/m ²
T _{AT} (2015)	=	0,85	°C sobre la T ^a entre los años 1920-1940
T _{LO} (2015)	=	0,0068	°C sobre la T ^a entre los años 1920-1940
η	=	3,6813	W/m ²
ξ ₁	=	0,1005	
ξ ₃	=	0,088	
ξ ₄	=	0,025	

DAÑO CLIMÁTICO			
ψ ₁	=	0	
ψ ₂	=	0,00220	
COSTE DE LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO			
P _{back} (2015)	=	550	2010\$ por tCO ₂
g _{Pback}	=	0,025	
μ(2150)	=	1,2	
C _{price} (2015)	=	2	2010\$ per tCO ₂
g _{Cprice}	=	0,02	

8. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA CONSISTENCIA DE LAS HIPÓTESIS

A pesar de que el modelo DICE está extremadamente simplificado en muchas áreas, sigue siendo un complejo sistema no lineal con varias relaciones polémicas. El modelo tiene 19 ecuaciones dinámicas que contienen 44 parámetros no triviales (omitiendo las condiciones iniciales directas tales como la población mundial, la producción y la anomalía global de la temperatura superficial media). Algunos de estos parámetros son relativamente inconsecuentes (como la elasticidad capital en la función de producción). Otras son centrales (como la sensibilidad a la temperatura para duplicar el CO₂ o la tasa de crecimiento de la productividad total de los factores). Además, las ecuaciones estructurales son invariablemente agregados de complicadas relaciones espaciales y temporales no lineales, y es probable que estén mal especificadas.

Por ello, se va a discutir a continuación algunas de las hipótesis asumidas por el modelo:

- Elasticidad marginal del consumo.
- Función de daño.
- Tasa de descuento de bienes.
- Sensibilidad climática.
- Tasa de crecimiento de la PTF.
- La tasa de descarbonización.
- El coste de la tecnología backstop.
- La fracción de retención atmosférica.
- Inconsistencia entre el crecimiento de la población y el crecimiento de la función de daños.
- Inconsistencia entre el PIB y la intensidad de emisiones.
- Inconsistencia entre el PIB y la función de daños.

8.1. Elasticidad de la utilidad marginal del consumo

La elasticidad de la utilidad marginal del consumo es asumida por el modelo como constante, cuando en la realidad es un parámetro variable a lo largo del tiempo. La elasticidad marginal del consumo no es estable, es decir, una sociedad puede tener mucha necesidad de consumo pero llegará un momento en que ya no se necesite más, por lo que invertirá. O, en cambio, si la sociedad tiene inicialmente mucha necesidad de capital, invertirá mucho en capital, pero llegará un momento en que invertir más capital ya no merezca la pena, por lo que se empezará a consumir.

Por lo tanto, el modelo hace una suposición irreal de la elasticidad de la utilidad marginal del consumo. Las sociedades van variando temporalmente sus necesidades de consumo y de trabajo, es decir, van variando sus preferencias a lo largo del tiempo. Dependiendo del momento en el que se encuentre una sociedad, su elasticidad de la utilidad marginal del consumo varía.

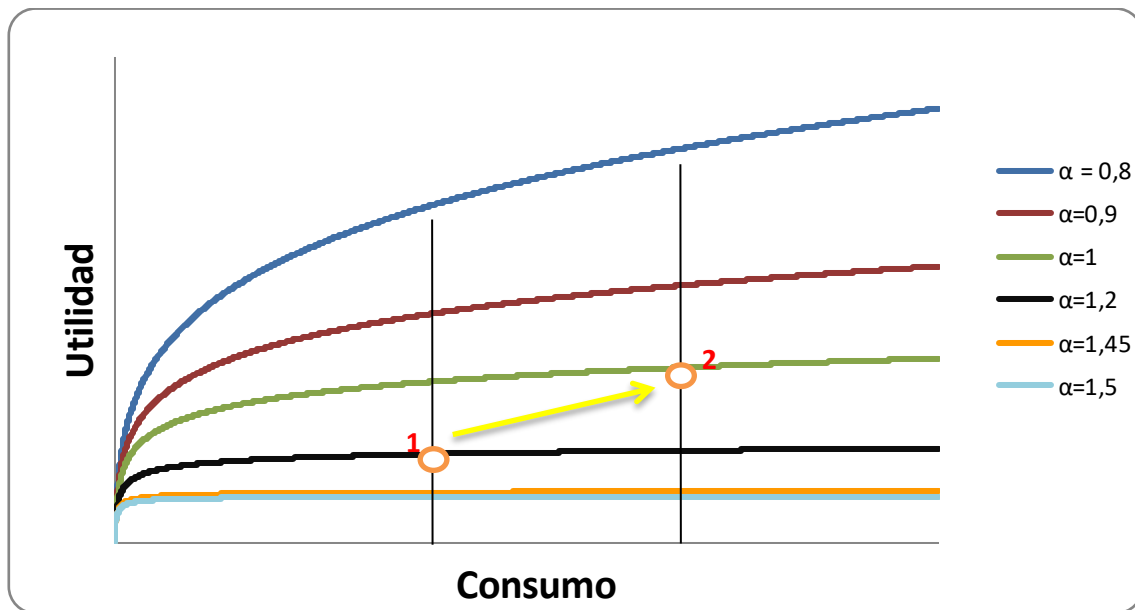


Figura 43. Elasticidad de la utilidad marginal del consumo

Como se indica en la Figura 43, una sociedad real va variando su elasticidad de la utilidad marginal del consumo, pasando por ejemplo del punto 1 al punto 2. Por consiguiente, Nordhaus de alguna forma lo que está construyendo es una sociedad robot, que mantiene constantes sus preferencias. Pero una sociedad, a medida que se desarrolla, recorre un camino evolutivo distinto, variando sus preferencias..

8.2. Función de daño

La función de daño es la relación entre un aumento de la temperatura y el PIB. Es una función arbitraria hecha para describir cómo disminuye el PIB cuando sube la temperatura. Es el núcleo de este modelo y ha causado mucha controversia a lo largo de los años dado que una mera correlación empírica requiere mucha argumentación para asegurarse de que está bien. Es el punto débil de este sistema ya que es una ecuación inventada, sin una base o teoría económica donde apoyarse. Como se ha visto anteriormente, Nordhaus describe la función de daño como:

$$D(t) = \psi_1 * [T_{AT}(t)]^2$$

Aquí $T_{AT}(t)$ es el aumento de la temperatura, y $D(t)$ da la reducción en el PIB para cualquier valor de $T_{AT}(t)$.

Nordhaus obtiene esta relación y el valor de ψ_1 a partir de observaciones de tendencias. Lo que hace es buscar unas evoluciones históricas y atribuirle una causalidad a una correlación. Observa que efectivamente, según la evolución del CO_2 van apareciendo una serie de

fenómenos. Pero asumir una causalidad absoluta en esos términos es mínimamente discutible.

El valor de ψ_1 también se lo ha inventado, no tiene una hipótesis real detrás. No existen datos ni una teoría que puedan explicar el valor del parámetro ψ_1 . Además, dentro de este parámetro asume un ajuste del 25% para tener en cuenta los sectores omitidos y los daños catastróficos. Pero este valor se lo vuelve a inventar. Los daños catastróficos son imposibles de cuantificar y de predecir, por lo que suponer un ajuste de 25 % es también bastante discutible. Y es que un ajuste del 25 % no representa lo que puede significar un verdadero daño catastrófico debido al cambio climático. Porque a menos que se acepte una tasa de descuento muy pequeña, los escenarios "más probables" para el cambio climático simplemente no generan suficientes daños en términos de valor actual.

Cuando los cambios de temperatura son pequeños, la forma funcional de la función de daños no importa mucho para el análisis económico del cambio climático. Pero con temperaturas extremas, la especificación puede importar mucho. Dada la naturaleza arbitraria de la ecuación, con un incremento de T^a de 5 o 7 °C, la ecuación no dirá nada útil sobre los daños que se deben esperar si la temperatura aumentase tanto. A temperaturas altas, que pueden ser terriblemente desastrosas, las especificaciones que hace las supone demasiado bajas.

Con el fin de comprobar la sensibilidad de la ecuación al parámetro ψ_1 , se ha representado la función de daños en el escenario Base para distintos valores del parámetro:

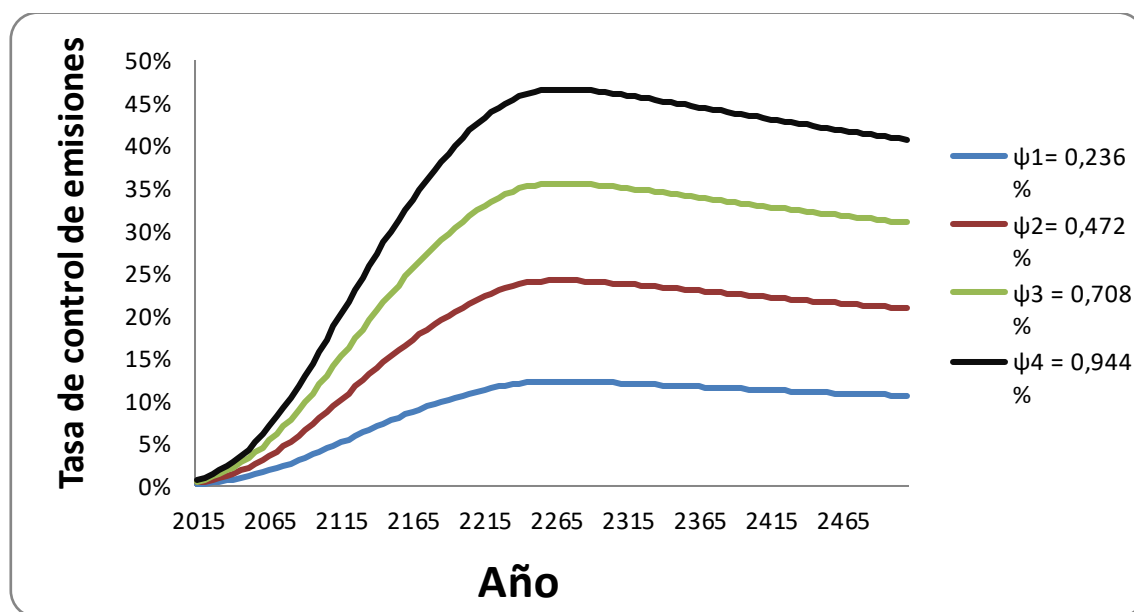


Figura 44. Sensibilidad de la ecuación de daños al parámetro ψ_1

En la Figura 44 se puede comprobar que al aumento del parámetro es proporcional a los daños totales obtenidos. Es por ello, que cambios en este parámetro crea muchas turbulencias en el modelo.

Nordhaus asume que a más producción más daños. Supone una forma creciente de la función. Al final, lo que dice Nordhaus es que por cada tonelada de CO_2 que se emita, para un nivel de concentración dado, se tiene un aumento determinado.

Por otro lado está la hipótesis de la "curva medio ambiental" de Kuznets, que explora la relación existente entre crecimiento económico y calidad ambiental, intentando demostrar que a corto plazo el crecimiento económico genera un mayor deterioro ambiental, pero en el largo plazo, en la medida que las economías son más ricas, se plantea que el crecimiento económico es beneficioso para el medio ambiente. Esto es, la calidad del medio ambiente mejora con el incremento en el ingreso. Sin embargo, tal evidencia solo ha encontrado en los países desarrollados. Plantea que de alguna forma esta curva de daño tiene una forma de "U" invertida:

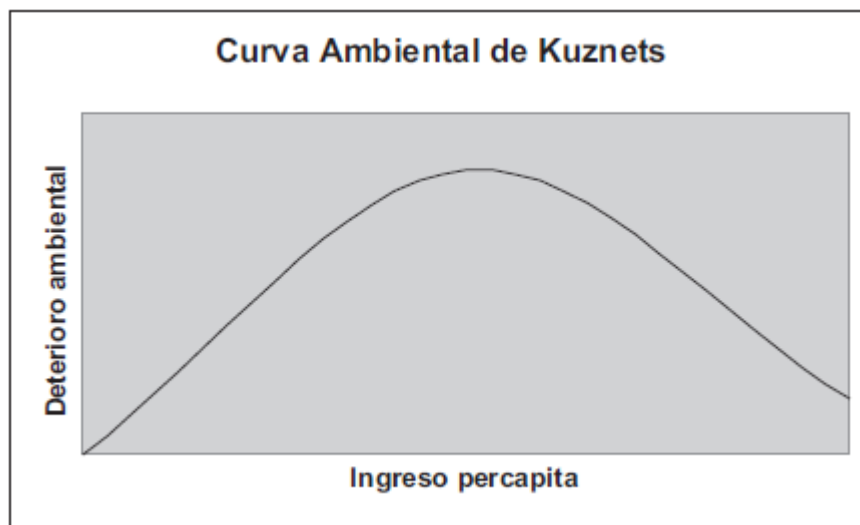


Ilustración 3. Curva Ambiental de Kuznets (Fuente: <https://dialnet.unirioja.es>)

Como se aprecia en la Ilustración 3, los daños ambientales aumentan con el crecimiento económico, alcanza un máximo, y luego comienza a caer a partir de un nivel crítico de ingreso. Ese punto máximo se relaciona con que una vez que la gente tiene un nivel de vida aceptable, lo que buscan es mejorar sus condiciones ambientales. Partiendo de la hipótesis anterior, a largo plazo, el crecimiento económico es beneficioso para el medio ambiente: a medida que la gente va acumulando riqueza, se encuentra mejor preparada para afrontar el daño ambiental provocado por el crecimiento económico. Entonces si la hipótesis de Kuznets es cierta, lo que hay que hacer con los países en desarrollo es dejarlos que se desarrollen, que ya se encargarán ellos de reducir el daño ambiental. Hacer predicciones sobre cuándo se va a alcanzar ese límite es muy difícil.

8.3. Tasa de descuento de bienes

El cambio climático implica daños que se extienden muchos cientos de años hacia el futuro. Si bien ha habido avances en la comprensión de las tasas de descuento a largo plazo del orden de

un siglo, no está claro que exista un marco adecuado para identificar empíricamente las tasas de descuento varios siglos.

Variando la tasa de descuento, el modelo producirá una estimación de SCC o de daños tan bajos como unos pocos dólares por tonelada, tan altos como varios cien dólares por tonelada, o cualquier cosa en el medio. Por lo tanto, un modelador que, por la razón que sea, cree que una política de reducción estricta es (o no) necesaria, puede elegir una tasa de descuento baja (o alta) que produzcan los resultados deseados. En pocas palabras, es demasiado fácil usar un modelo para generar, y así aparentemente validar los resultados que uno desea. Esto hace que el modelo sea muy flexible a este parámetro.

Nordhaus asume unos valores de los parámetros con el fin de reflejar una tasa de descuento real. Por tanto, la simulación será tan veraz como la tasa de descuento simulada se asemeje a la real. El problema aquí es que no hay consenso en cuanto a la tasa de descuento "correcta". Cogiendo un valor más alto o más pequeño nos varía mucho el modelo. Por ejemplo, "The Green Book", para situaciones en largo plazo, recomienda utilizar las siguientes tasas de descuento:

TASAS DE DESCUENTO PARA LARGO PLAZO						
Periodo de años	0-30	31-75	76-125	126-200	201-300	301+
Tasa de descuento	3,5%	3,0%	2,5%	2,0%	1,5%	1,0%

Tabla 5. Tasas de descuento a largo plazo según "The Green Book"

Si representamos ambas tasas de descuento, nos cambiaría bastante:

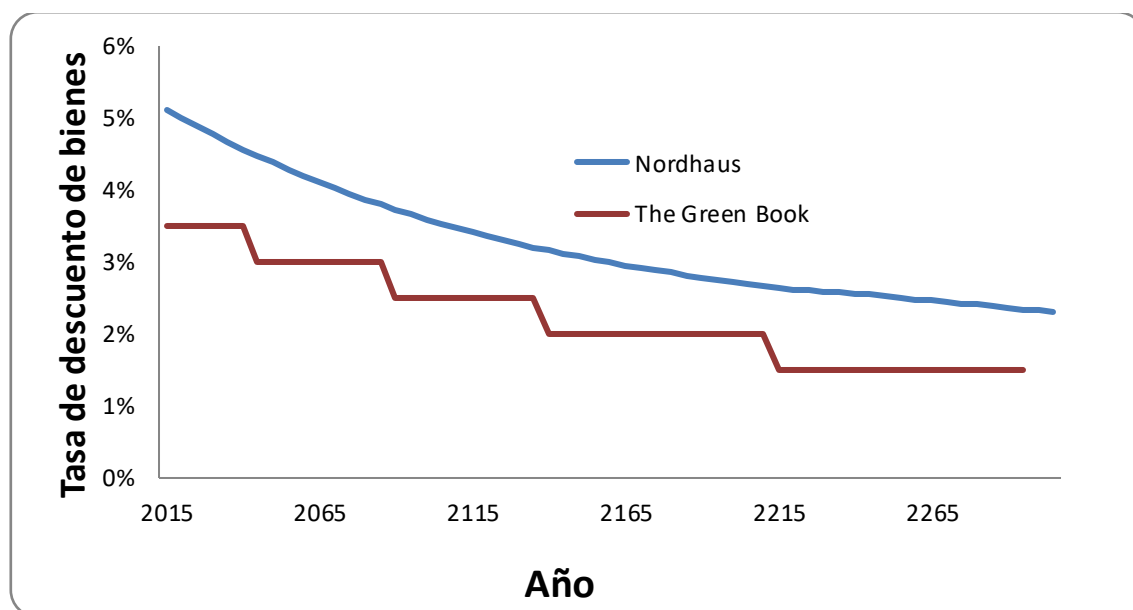


Figura 45. Comparación tasas de descuento

¿Y cómo afecta esto? Pues bien, si representamos los costes totales (daños más costes de mitigación) descontados, podemos ver la variación que nos mete cada tasa de descuento:

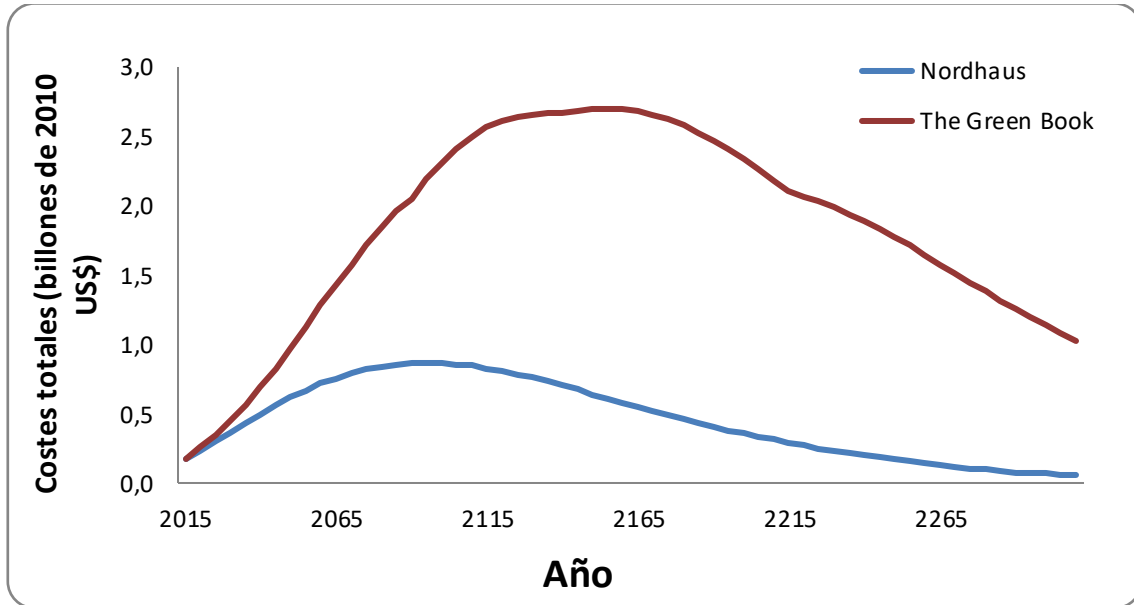


Figura 46. Costes totales a lo largo del tiempo con diferentes tasas de descuento

Como se observa en la Figura 46 existe una gran diferencia entre los costes por la variación de la tasa de descuento. Los costes finales serían:

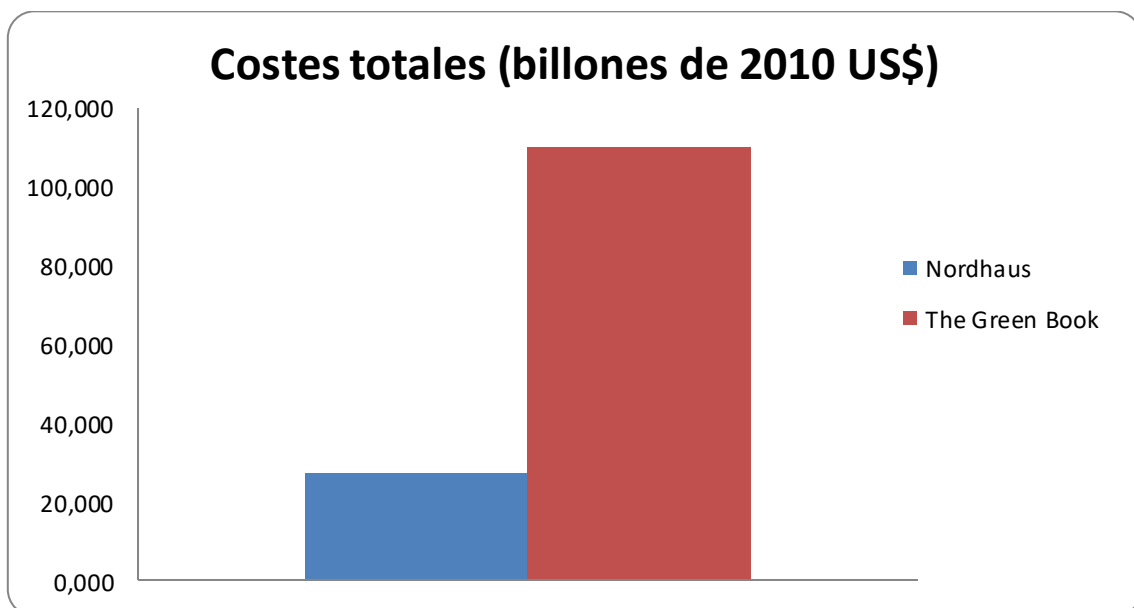


Figura 47. Diferencia entre los costes por la variación de la tasa de descuento.

Existen prácticamente 100 billones de US\$ de diferencia. Por tanto, es un valor que nos crea mucha turbulencia. Esta diferencia se debe a que la tasa de descuento elegida por Nordhaus es muy alta, por lo que apenas tiene en cuenta los costes a muy largo plazo.

Un problema con esta tasa de descuento muy alta es la ideología subyacente de que las inversiones en la mitigación del clima deberían ser igualmente rentables como las inversiones industriales actuales. Es decir, las inversiones en la mitigación del clima sólo deben hacerse cuando son tan rentables como cualquier otro negocio.

Por lo tanto, al insistir en las tasas de descuento muy altas que están fuera de sintonía con las escalas de tiempo largo del cambio climático, Nordhaus obtiene que el futuro cuenta muy poco, y las catástrofes climáticas futuras realmente no cuentan. Se podría incluso postular que con tales tipos de descuento, el modelo mostraría que podría resultar rentable seguir un camino que mantiene una alta tasa de crecimiento económico en este momento, pero conduce a la destrucción de toda la vida en el mundo en 500 años o 1.000 años.

8.4. Sensibilidad climática

Nordhaus asume la sensibilidad climática basándose en estudios previos y en datos observacionales, y con ello estima un calentamiento medio de 3,1 °C para una duplicación de CO₂ de equilibrio.

El problema es que el valor de la sensibilidad climática no es realmente conocido. Existe una gran incertidumbre sobre la sensibilidad climática, incluso muchos aseguran que está en el reino de lo incognoscible.

La sensibilidad climática fue propuesta en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC como probabilidades de estar en el rango de 2 a 4,5 °C.

Si comparamos las trayectorias del aumento de temperatura para el valor asumido por Nordhaus y los valores extremos asumidos por el IPCC:

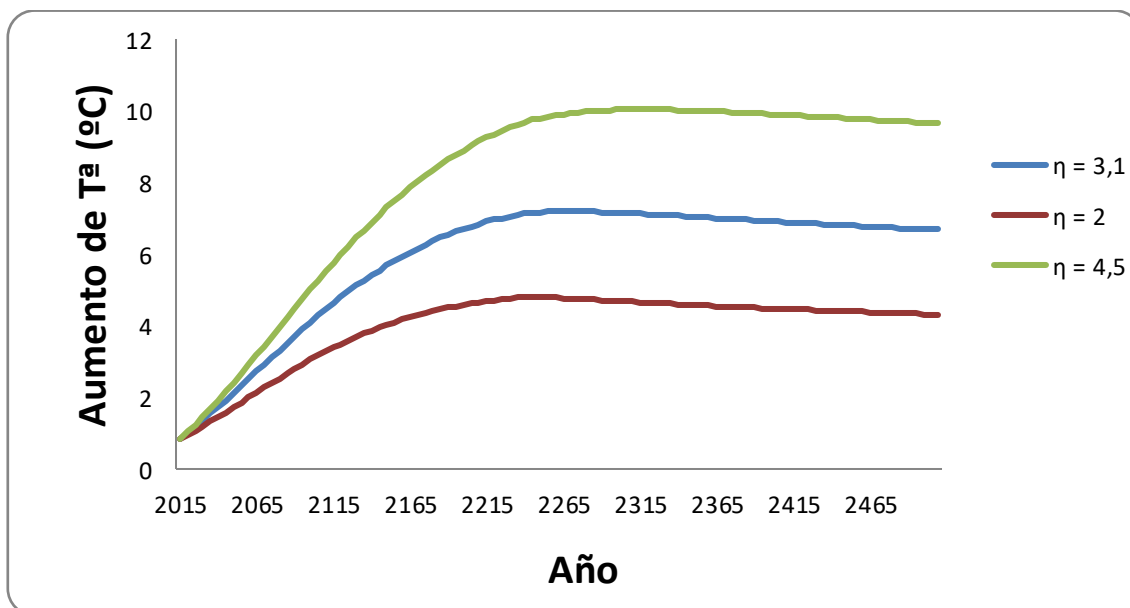


Figura 48. Aumento de Tª para distintos valores de la sensibilidad climática

En la Figura 48 se puede comprobar la gran variación existente de una sensibilidad a otra, variándonos enormemente, hasta casi una diferencia de 6ªC, entre los límites del rango. De ahí la importancia del desconocimiento de ese valor. Por lo tanto, la sensibilidad climática es un valor que tiene una gran influencia en el modelo.

8.5. Tasa de crecimiento de la productividad total de los factores

La incertidumbre en el crecimiento de la productividad total de los factores (o producto per cápita) es un parámetro crítico en la determinación de todos los elementos del cambio climático, desde las emisiones hasta el cambio de temperatura y los daños. Pero esta tasa de crecimiento es incognoscible, no se puede saber cuál va a ser.

El registro histórico proporciona un fondo útil para estimar tendencias futuras. Sin embargo, es claro desde las perspectivas teórica y empírica que los procesos que impulsan el crecimiento de la productividad no son estacionarios.

El modelo supone que la PTF irá aumentando pero dicho aumento irá disminuyendo a lo largo del tiempo por una tasa de disminución del progreso tecnológico. Pero el valor de la tasa de decrecimiento es una suposición, asume 0,5 % pero sin ningún tipo de argumentación. Si representamos otros valores para la tasa de decrecimiento obtendremos valores muy distintos.

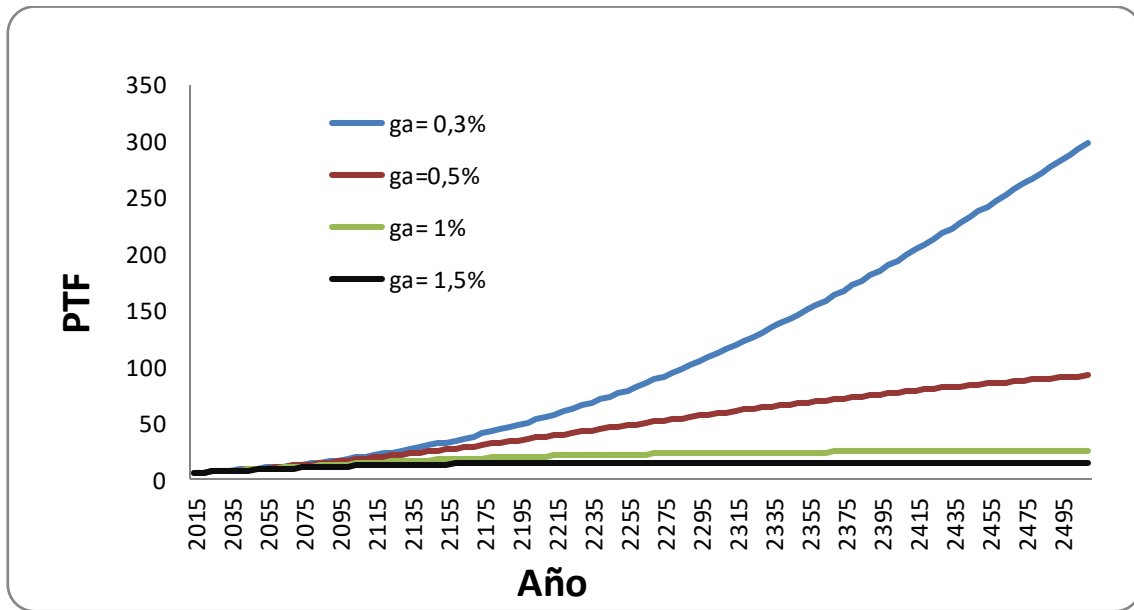


Figura 49. PTF para diferentes tasas de crecimiento

Si con estos valores representamos la producción, se ve que:

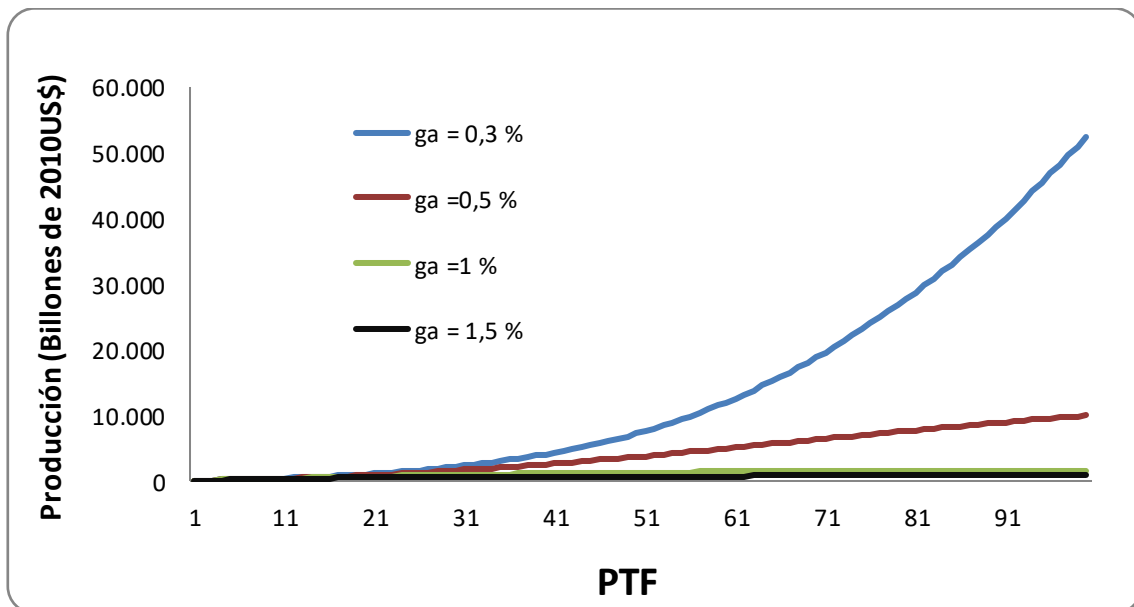


Figura 50. Variación de la producción con distintos valores de la tasa de decrecimiento

En la Figura 50 se puede observar cómo afecta la variación de decrecimiento de la PTF. Con disminuirla un 0,2 %, la producción se dispara. Por lo tanto, se puede concluir que el modelo es muy sensible a este parámetro.

Hay indicios para pensar además que primeramente habrá una disminución de la productividad total de los factores ante las nuevas tecnologías renovables, pero poco a poco,

gracias a la mejora tecnológica y la experiencia ganada por los trabajadores, irá aumentando dicha PTF.

8.6. La tasa de descarbonización

Nordhaus lo que supone es que la evolución de la descarbonización de la producción energética en los próximos años va a ir disminuyendo. Esta hipótesis se basa en que la intensidad de emisiones de CO₂ respecto a la producción ha ido disminuyendo a lo largo de los últimos años. Lo que hace es alargar una tendencia a partir de los datos observados. Pero estos datos son de países desarrollados, es decir, los datos de la intensidad de emisiones varían entre los distintos países y a lo largo del tiempo. De tal forma que, los países avanzados industrialmente, presentan generalmente un decrecimiento del ratio emisiones de CO₂ – producción. Sin embargo, países de bajos y medios ingresos muestran un crecimiento del ratio.

¿Pero que siga disminuyendo de qué va a depender? De coyunturas: de estabilidad en el crecimiento, de si parece que hay posibilidades de la evolución tecnológica... Por ejemplo, si la evolución tecnológica evoluciona más rápidamente y el crecimiento de la producción se mantiene, la tasa de descarbonización será mayor. Lo que se supone que podría pasar es que en los primeros periodos la intensidad se mantuviese o incluso creciese, para ir disminuyendo a lo largo de los años, cada vez más. Por el contrario, puede ocurrir que al aumentar la producción y al abaratarse los precios del CO₂ por la competencia de las nuevas tecnologías aumenten las emisiones y disminuya la tasa de descarbonización. Lo que está claro es que es un valor variable en la realidad. Si representamos para diferentes valores de la tasa de descarbonización:

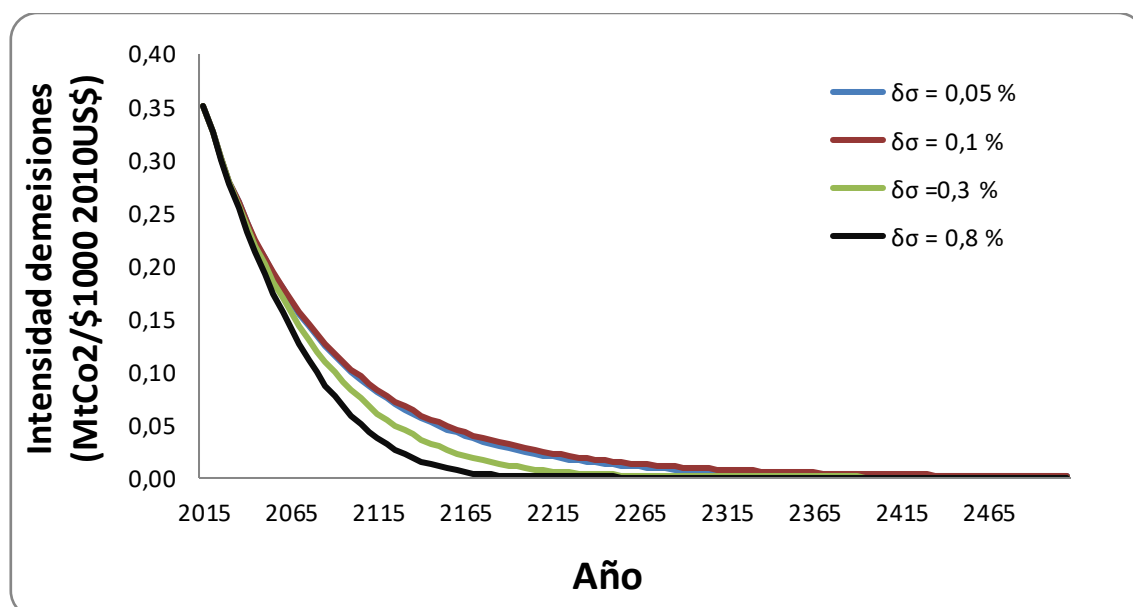


Figura 51. Variación de la intensidad de emisiones para distinta tasa de descarbonización

Si representamos cómo influye esta variación de la tasa de descarbonización en las emisiones industriales:

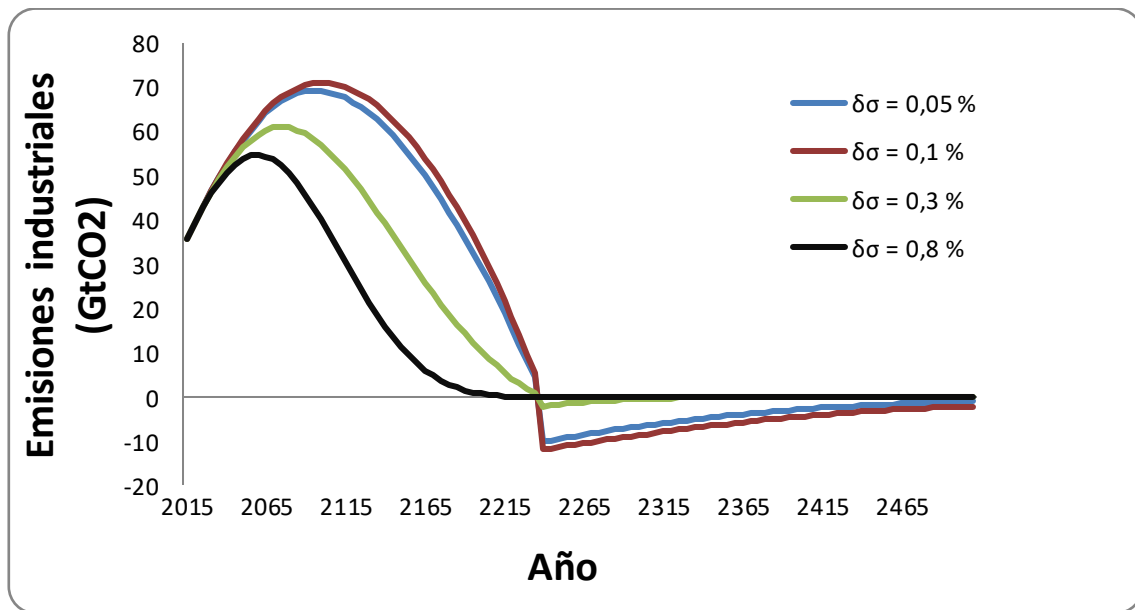


Figura 52. Variación de las emisiones industriales según la tasa de descarbonización

En la Figura 52 se observa que el valor de la tasa de descarbonización nos crea una gran turbulencia en el resultado de emisiones, por lo que es un parámetro controvertido.

8.7. El coste de la tecnología de backstop

Para la disminución del precio de la tecnología backstop supone un 2,5 % cada 5 años. Aunque esta disminución no parezca real, ya que se antoja difícil, si es verdad que empieza a haber indicios. Estos indicios son:

- Por aprendizaje, cada vez se mejora la eficiencia con estas tecnologías limpias.
- Por economía de escala, tener un sistema de control de emisiones global permite encontrar mecanismos de optimización.

Este coste de la tecnología, en realidad, no será constante, sino que según pasen los años irá disminuyendo de forma más rápida a medida de que se encarezca el precio de las emisiones de CO₂. Lo que se supone que va a pasar es que el coste de esta tecnología seguirá más o menos constante hasta que:

- Los daños del cambio climático sean tan grandes, que haga a la sociedad darse cuenta de que tiene que actuar en invertir en estas nuevas tecnologías de emisión cero de carbono para combatir el cambio climático.
- O bien que debido a la limitación de los combustibles fósiles o a los impuestos promovidos por los países, el precio de emisión de CO₂ sea tan alto que obligue a las empresas a invertir en estas nuevas tecnologías, aumentando la investigación en ellas.

Por tanto una trayectoria posible sería un coste de la tecnología backstop más o menos constante durante unos periodos hasta que tiene lugar un gran decrecimiento del precio. El problema es que es muy difícil saber que va a ocurrir. Por eso, se ensaya el modelo con diferentes tasas de decrecimiento del precio del backstop para comprobar la influencia que tienen en el modelo.

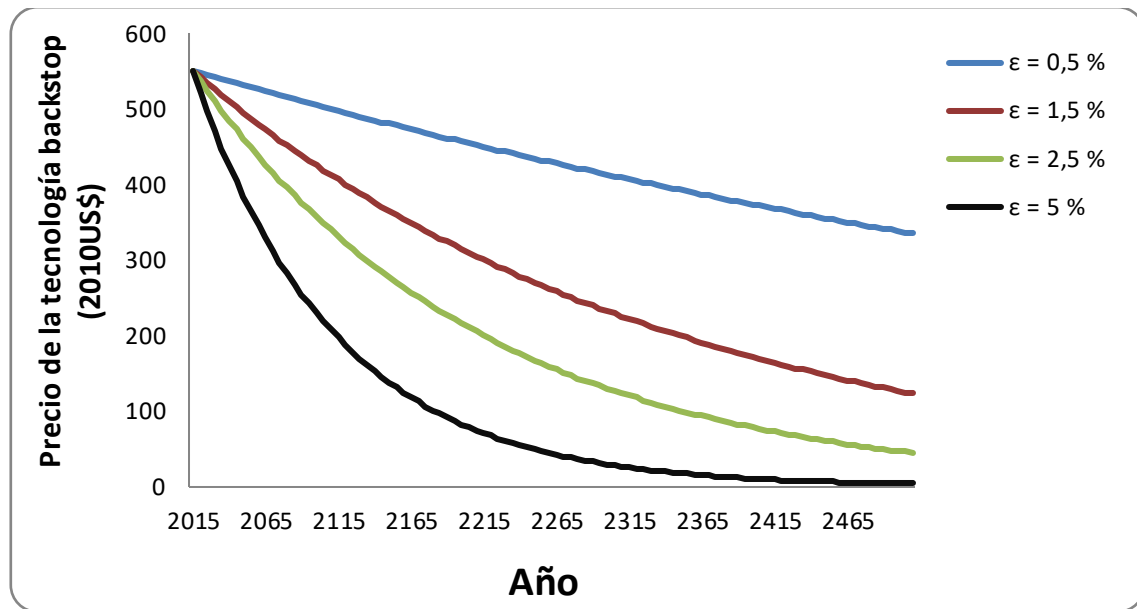


Figura 53. Variación del precio de la tecnología backstop según su tasa de decrecimiento

En la Figura 53 se observa como varía el precio de la tecnología backstop según su tasa de decrecimiento. Es un factor que nos crea importantes cambios.

8.8. La fracción de retención atmosférica de CO₂

Para el cálculo de la fracción de retención atmosférica de CO₂, asume unos coeficientes a partir de los cuales obtiene los demás. Los asume con el fin de intentar representar la dinámica actual del ciclo del carbono. Pero esos coeficientes no se conocen con exactitud, son meras estimaciones.

El ciclo del carbono tiene varios parámetros, pero el más importante es el tamaño del embalse intermedio (biosfera y nivel superior de los océanos). Los cambios en este parámetro tienen impactos importantes en la retención atmosférica.

Estos parámetros de flujo son los que nos marcan todo el ciclo del carbono, por lo que una variación en años nos cambiará todo el modelo climático.

El problema es que no se sabe exactamente el valor de estos parámetros, por lo que el modelo climático se ajustará tanto a la realidad como estos parámetros se parezcan a los fenómenos reales.

8.9. Inconsistencia ente el crecimiento de la población y el crecimiento de la función de daños

Supone un crecimiento ascendente de la población a lo largo del tiempo. Dicho crecimiento va disminuyendo hasta hacerse prácticamente igual a la unidad, cuando llega a la población de equilibrio. En mi opinión, no es del todo cierto, ya que si supone que el daño también va aumentando, el crecimiento de la población se verá afectado por el mismo. Es decir, la mayor frecuencia de eventos extremos puede causar grandes desastres humanitarios. Esto unido a la intensificación de las sequías en muchas zonas y menos cantidad de agua potable disponible pueden causar grandes crisis humanitarias, que nos hacen pensar en un estancamiento o incluso una reducción de la trayectoria de la población. No es creíble que mientras ocurren grandes desgracias humanitarias, falta de comida en muchas zonas, falta de agua potable, etc., la población siga creciendo. Por tanto, a unos determinados niveles de daños, no es creíble que la población aumente.

Pero modelar esto es muy difícil, a partir de qué valor de daños afectará a la población es algo impredecible, además de cómo le va a afectar.

8.10. Inconsistencia entre el crecimiento del PIB y el crecimiento de los daños climáticos

Nordhaus no modela la retroalimentación entre la cantidad de daños debidos al cambio climático y el crecimiento económico. Pero hay un problema importante con este enfoque. No se puede pronosticar con exactitud razonable qué sucedería realmente con la trayectoria de las emisiones de gases de efecto invernadero si no se adoptaran nuevas políticas de mitigación en el mundo durante los próximos 50-100 años. En particular, si no se implementan las nuevas políticas de mitigación del cambio climático, podría haber una gran crisis económica causada por el cambio climático que haga que la trayectoria del PIB u otros indicadores económicos se desvíe sustancialmente de las proyecciones asumidas. Pero Nordhaus no modela la retroalimentación entre la cantidad de cambio climático y el crecimiento económico.

Pero incluso sin considerar el cambio climático o el agotamiento de los recursos, ningún economista podría pronosticar la economía global para los próximos 50-100 años con cualquier precisión razonable con el propósito de formular políticas. Como es imposible (no sólo difícil) predecir el futuro de la economía energética para los próximos 50-100 años, no hay un escenario de emisiones de referencia válido al que puedan compararse los costos de un escenario de mitigación. Ni siquiera está claro que, en general, las previsiones económicas para los próximos 10 a 20 años puedan utilizarse con fines políticos.

9. RESULTADOS

Para la ejecución del modelo se ha utilizado un solver para Excel desarrollado por la empresa Frontline Systems.

Para calcular los beneficios o costos netos de la mitigación del cambio climático, debemos comparar varios escenarios. Para poder comparar distintos escenarios, es necesario la construcción del caso de referencia, el escenario Base, que asume que no se implementan nuevas políticas de mitigación del clima más allá de las existentes hoy en día.

9.1. Escenarios

Se han optimizado cinco escenarios diferentes:

- Escenario Base.
- Escenario Óptimo.
- Escenario Acuerdo de París, del que se modelan tres políticas diferentes:
 - Limitación del aumento de T^a hasta un máximo de 2°C .
 - Reducción del 50% de emisiones en el año 2050 con respecto al año 1990 y que se aproximen a 0 en el año 2100. Salida de EEUU del Acuerdo de París

9.1.1. Escenario Base

El escenario base es un marco en el que no se toman medidas para frenar o revertir el calentamiento por el efecto invernadero. Es un escenario en el que la sociedad se adaptaría al cambio climático, pero se supone que los gobiernos no toman medidas para frenar las emisiones de gases de efecto invernadero, excepto los países participantes en el Protocolo de Kyoto, los cuáles han reducido sus emisiones desde la entrada en vigor del mismo. La estrategia del modelo es que la política sigue el camino del mercado para asignar combustibles fósiles a lo largo del tiempo durante 45 períodos (225 años), después de lo cual el mundo "despierta" y optimiza su trayectoria de emisiones a la luz de los daños del cambio climático.

Pero hay un problema importante con este enfoque. Los modeladores de evaluación integrados (y modelos) no pueden pronosticar con exactitud razonable qué sucedería realmente con la trayectoria de las emisiones de gases de efecto invernadero si no se adoptaran nuevas políticas de mitigación en el mundo durante los próximos 50-100 años. En particular, si no se implementan las nuevas políticas de mitigación del cambio climático, podría haber una gran crisis económica causada por el cambio climático que haga que la trayectoria del PIB u otros indicadores económicos se desvíe sustancialmente de las proyecciones asumidas.

9.1.2. Escenario Óptimo

El segundo caso resuelve una política económicamente eficiente o "óptima" para frenar el cambio climático. Esto puede interpretarse como el escenario óptimo económico sin restricciones no económicas. En este ciclo, las emisiones se fijan para maximizar el valor del consumo económico neto, es decir, la función de bienestar. Este caso maximiza el valor

descontado de la utilidad sujeto a las diversas restricciones y relaciones económicas y geofísicas. Más precisamente, esta política encuentra una trayectoria para las reducciones de emisiones que equilibra los actuales costos de mitigación con los daños futuros causados por el calentamiento global. Supone una participación y un cumplimiento completos de todos los países y, por tanto, es extremadamente optimista. Reduce las emisiones de manera eficiente a lo largo del tiempo.

Pero el modelo óptimo no se presenta como un modelo medioambiental que promulga cánones infalibles de política que serán religiosamente seguidos por todos. El modelo óptimo es la mejor ruta política posible para las reducciones de emisiones, dadas las limitaciones económicas, tecnológicas y geofísicas que se han estimado. Por tanto, es un punto de referencia para determinar qué tan eficientes o ineficientes pueden ser los enfoques alternativos.

9.1.3. Escenario Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un acuerdo dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que establece medidas para la reducción de las emisiones de GEI a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del calentamiento global. Entró en vigor en noviembre de 2016.

Todas las naciones excepto Siria y Nicaragua están dentro del acuerdo. Siria y Nicaragua representaron en el año 2015 el 0,2 % y 0,02% del total de emisiones. Por lo tanto, el % de participación en relación a las emisiones es del 99,78 %, es decir, prácticamente el total.

Pero recientemente, EEUU, que inicialmente se había unido al Acuerdo con Barack Obama, se ha retirado del mismo con la llegada de Donald Trump a la presidencia, lo que puede complicar los objetivos del Acuerdo.

El objeto del Acuerdo de París es que cada país, desarrollado o no y sin importar su PIB, establezca metas para reducir las emisiones de dióxido de carbono para prevenir esos efectos. A diferencia del tratado anterior (el Protocolo de Kioto), el Acuerdo de París no es vinculante; así, los países pueden cambiar sus planes según la situación interna de los mismos. No hay multas por quedar por debajo de las metas declaradas. Las naciones que participan en el pacto simplemente deben anunciar qué porcentaje de emisiones se comprometen a reducir y en qué plazo. La expectativa es que las políticas y las metas sean reforzadas con el tiempo por medio de la diplomacia y de la presión social.

Los objetivos marcados en el Acuerdo son:

- El objetivo a largo plazo de mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C sobre los niveles preindustriales y, si es posible, limitar el aumento a 1,5 °C, lo que reduciría considerablemente los riesgos y el impacto del cambio climático.
- Que las emisiones globales alcancen su nivel máximo cuanto antes, si bien reconocen que en los países en desarrollo el proceso será más largo. El Consejo subrayó que las

emisiones mundiales de gases con efecto invernadero deberán alcanzar sus valores máximos en 2020 a más tardar, reducirse en al menos un 50% en 2050 en comparación con 1990 y aproximarse a cero o estar por debajo de cero para 2100.

- Aplicar rápidas reducciones basadas en los mejores criterios científicos disponibles.

El análisis aquí pretende ser un examen general que permita una comparación de tres variantes del Acuerdo con los otros enfoques principales. Las tres variantes suponen que hay un grupo de países que participa con un objetivo agregado de reducción de emisiones. El análisis supone, además, que los países tienen una armonización completa de las políticas mediante el comercio de emisiones para que los precios del carbono estén armonizados entre las regiones participantes. Además, asume que no hay reducciones de emisiones en países no participantes. Se asume que las políticas se introducen en 2020.

Se ejecutan tres escenarios referentes al Acuerdo de París:

9.1.3.1. Limitación del aumento de temperatura hasta 2°C.

Primeramente, se modelizó el incremento máximo de 1,5°C. Los resultados obtenidos decían que es muy improbable, por no decir imposible llegar a este límite. Los resultados del modelo exponían que para poder cumplirlo era necesario tener cero emisiones industriales en el año 2025 y que en ese año, era necesario que empezase la captación del CO₂. Debido a que es un escenario bastante irreal, se ha cogido el límite de 2°C. Para este caso, hemos supuesto que hay participación completa, es decir, que todos los países firmarían el Acuerdo. Llegar al objetivo de los 2°C es imposible si no adelantamos la hipótesis de la tecnología que capta carbono. Se supone que en el 2060 ya estará disponible dicha tecnología. En este caso, imponemos la restricción de la temperatura como un complemento a la optimización de la utilidad.

9.1.3.2. Reducción del 50% de emisiones en el año 2050 en comparación con 1990 y que se aproximen a 0 en el año 2100.

El Acuerdo expone tanto limitar a menos de 2°C el aumento de temperatura y reducir al 50 % las emisiones en el año 2050 (respecto al año 1990) y que se aproximen a 0 en el año 2100. Este escenario se modela con el fin de poder comparar si existe relación entre el límite impuesto en la temperatura y el límite impuesto en las emisiones. Es decir, se busca saber si una reducción del 50 % en el año 2050 y del 0% en el año 2100 conlleva un aumento menor de 2°C de la temperatura.

En el año 1990, las emisiones globales fueron de 22.400 GtCO₂, mientras que en 2015 fueron de 35.700 GtCO₂. Por tanto, la reducción esperada de emisiones del año 2015 para el año 2050 será:

$$22.400 \text{ GtCO}_2 * 0,5 = 11.200 \text{ GtCO}_2$$

$$\text{Reducción} = \frac{11.200 \text{ GtCO}_2}{35.700 \text{ GtCO}_2} * 100 = 31,40 \% = 32 \%$$

Resumiendo, buscaremos saber qué es lo que pasa con una reducción del 32% de las emisiones en el año 2050 respecto del año 2015 y que sean 0 en el año 2100. En este caso, también supondremos una participación completa de todos los países.

9.1.3.3. Salida de EEUU del Acuerdo de París.

Estados Unidos, durante el gobierno de Barack Obama, prometió recortar para 2025 los gases de efecto invernadero entre el 26 % y 28 % en comparación a los niveles de 2005, así como repartir, para 2020, tres mil millones de dólares en ayuda para que los países menos desarrollados puedan reducir su dependencia de los combustibles fósiles.

Un análisis del Rhodium Group estima que las emisiones del país con Trump caerán entre 15 y 19 por ciento para 2025 respecto a los niveles de 2005, en vez de entre 26 y 28 por ciento como prometió el gobierno de Obama. La retirada estadounidense también podría afectar los esfuerzos globales para combatir el cambio climático. Esto dependerá de cómo reaccionen los demás países. Es posible que la salida del segundo mayor emisor de gases de invernadero del mundo del Acuerdo de París lleve a otras naciones a relajar sus planes. Una salida estadounidense vuelve más difíciles las políticas en otros países.

India, Indonesia, Filipinas y otros países en desarrollo podrían ser más recelosos sobre reducir las emisiones, en particular si ya no reciben la ayuda financiera estadounidense para ajustarse a los efectos del cambio climático y paliar los costos de moverse hacia energías más limpias.

Con la salida, se prevé que EEUU reduzca sus emisiones un 15% menos respecto a 2005 de lo acordado en el Acuerdo. En el año 2005, EEUU emitió 6.132 millones de toneladas de CO₂, y en 2015, emitió 5.172 millones de toneladas de CO₂. La reducción respecto a las actuales sería:

$$Aumento = \frac{5,172 * 0,13}{6,132} * 100 = 11\%$$

Por tanto en términos globales, ese aumento sería:

$$Aumento\ global = 0,11 * 29,51\% = 3,25\%$$

Debido a las hipótesis de que otros países sigan sus pasos, además de retirar las ayudas a los países en desarrollo, se supone un aumento total de emisiones respecto a las previstas en el acuerdo del 25%.

Por tanto, la participación se nos reduce al 75 %. En este escenario se supone la entrada progresiva de estos países a partir del año 2040, estando todos dentro del acuerdo en el año 2050.

9.2. Vista general de los resultados

El modelo realiza multitud de suposiciones, por lo que los resultados del mismo serán tan buenos o tan malos como:

- Verosímiles sean sus hipótesis.

- Consistentes sean la combinación de ellos.

Con el fin de poder comparar cada una de las políticas, se van a resumir primero los resultados generales de las mismas.

ESCENARIO	VALOR PRESENTE DE LA UTILIDAD	VALOR PRESENTE DEL CONSUMO (billones de US2010\$)	VALOR TOTAL DE LOS COSTES POR DAÑOS CLIMÁTICOS + COSTES DE MITIGACIÓN (billones de US2010\$)	VALOR PRESENTE DE LOS COSTES POR DAÑOS CLIMÁTICOS (billones de US2010\$)	VALOR PRESENTE DE LOS COSTES DE MITIGACIÓN (billones de US2010\$)	VALOR NETO PRESENTE DE LOS COSTES POR DAÑOS CLIMÁTICOS + COSTES DE MITIGACIÓN (billones de US2010\$)
Base	4485,7	4469,7	52.302,1	27,4	0,1	27,5
Óptimo	4517,3	4447,5	9593,4	16,8	4,1	21,0
Limitada Tº <2 ºC	4414,3	4503,1	1680,6	7,2	35,2	42,4
Emisiones 50 %	4504,2	4453,5	4868,3	13,1	10,5	23,6
Sin EEUU	4500,9	4455	5412,3	13,8	10,4	24,3

Tabla 6. Resumen diferentes escenarios

La Tabla 6 representa un resumen de las distintas políticas ensayadas. La primera columna representa la función de bienestar de cada una de las políticas. La segunda muestra el valor del consumo presente y las siguientes cuatro columnas tienen que ver con los costes debidos a la mitigación y a los daños climáticos.

Comparando la columna 3 con la columna 6, se puede ver la necesidad de descontar los valores del futuro, ya que si no los descontásemos la política de limitar a 2°C el máximo aumento de T^a sería la de menor coste, mientras que descontando los costes se ve que es la que representa un mayor coste para la sociedad.

La política óptima es la que mayor utilidad proporciona, tiene mayor consumo y por tanto menos costes de daños y mitigación. Pero se debe de tener una cosa clara, y es que aunque unas políticas sean mejores que otras, sean más eficientes, están condicionadas por las hipótesis heroicas subyacentes del modelo. Por lo tanto, una trayectoria política será la mejor para esta economía teórica, para estas condiciones teóricas. Luego hay una hipótesis adicional, y es que lo mejor para el modelo es también lo mejor para esta sociedad, y eso tiene dos cuestiones importantes:

- La representatividad del modelo.
- Los costes de transacción.

Haremos una comparación con respecto al escenario base con el fin de saber la eficiencia de dichas políticas contra no hacer nada. Se ha calculado las diferencias de las demás utilidades respecto de ella:

ESCENARIO	FUNCIÓN OBJETIVO	COSTES DE MITIGACIÓN + DAÑOS
Base	0	0
Óptimo	31,6	-6,5
Limitada $T^a < 2^{\circ}C$	-71,4	14,9
Emisiones 50 %	18,4	-3,9
Sin EEUU	15,12	-3,2

Tabla 7. Comparación frente al escenario base

La columna denominada "Función Objetivo" es la medida exacta de la diferencia en el valor descontado de la utilidad con respecto a la línea de base. En otras palabras, mide el valor

actual del consumo bajo una determinada política menos el valor actual del consumo en el escenario base.

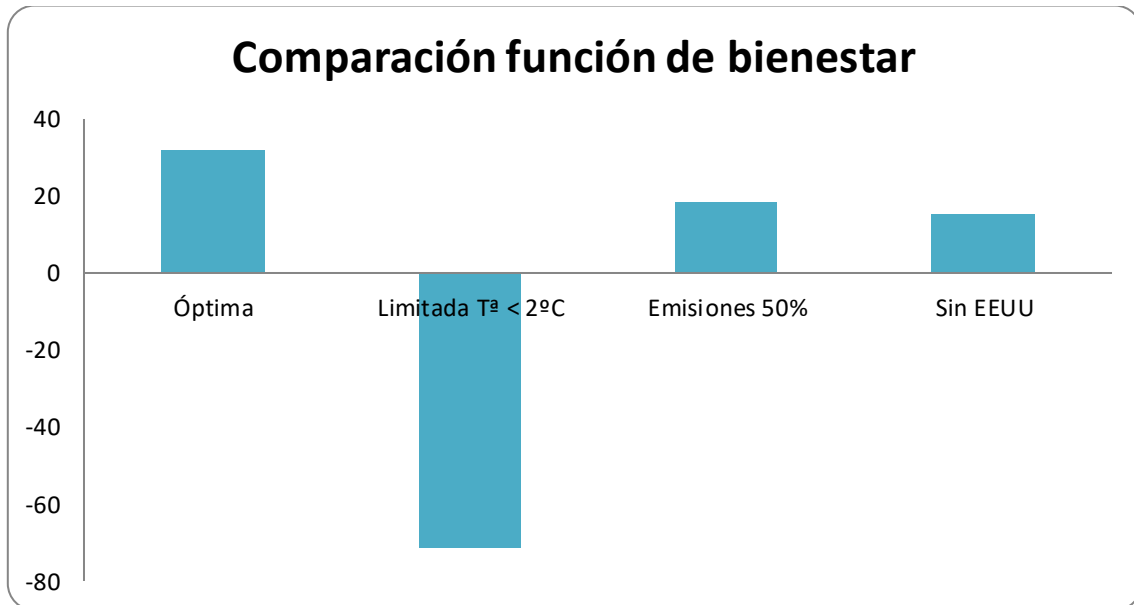


Figura 54. Comparación de la función de bienestar con respecto al escenario Base

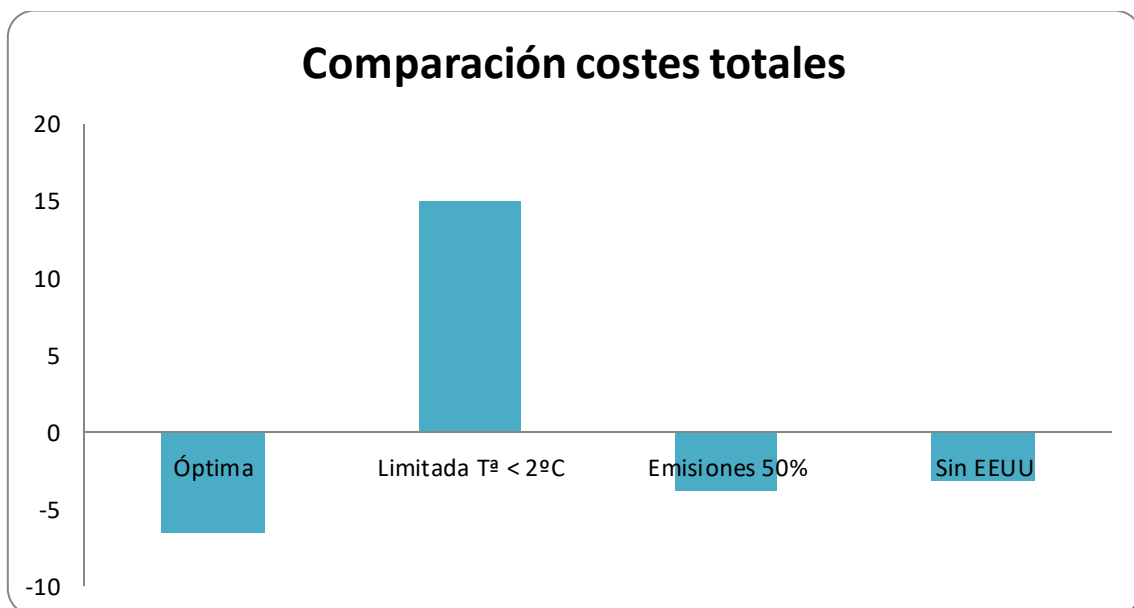


Figura 55. Comparación de los costes totales con respecto al escenario Base

Empezaremos por examinar la ganancia económica neta de diferentes políticas en relación con la política de referencia o sin controles. La Figura 54 y la Figura 55 muestran gráficamente las ganancias y pérdidas de las distintas políticas con respecto al escenario Base. La política óptima tiene una ganancia en bienestar económico neto por un total de 31,57 billones de

201US\$. Aunque se trata de un gran número absoluto, es una pequeña fracción, alrededor del 0,7 por ciento, del valor actual de los ingresos futuros totales.

La política óptima no difiere significativamente de las políticas que agregan una disminución del 50% de las emisiones para el año 2050.

La Tabla 8 muestra el costo incremental de agregar un límite climático y un límite en emisiones por encima del óptimo costo-beneficio.

Comparación de los diferentes escenarios del acuerdo respecto a la política óptima			
	VALOR PRESENTE DE LOS COSTES POR DAÑOS CLIMÁTICOS (billones de US2010\$)	VALOR PRESENTE DE LOS COSTES DE MITIGACIÓN (billones de US2010\$)	VALOR NETO PRESENTE DE LOS COSTES POR DAÑOS CLIMÁTICOS + COSTES DE MITIGACIÓN (billones de US2010\$)
Limitada T^a < 2°C	-9,5	31,0	21,5
Emisiones 50 %	-3,7	6,3	2,6
Sin EEUU	-3,0	6,3	3,3

Tabla 8. Comparación de los escenarios frente al escenario óptimo

Para todas las políticas menos la de limitar el aumento de la temperatura de 2°C, el coste de agregar una restricción climática encima del óptimo del coste-beneficio es bastante pequeño (del orden de menos de 3,3 billones de 2010US\$). La política de limitar el aumento de temperatura a 2 °C es extremadamente costosa.

La interpretación de los resultados para las restricciones es la siguiente:

El cálculo de costo-beneficio económico puro indica que un cierto camino de reducción de emisiones es económicamente beneficioso. Sin embargo, este camino puede omitir otras consideraciones, como que todos los países cumplan con lo pactado o que la sociedad sea capaz de adaptarse a esa nueva política. Los cálculos sugieren que la adición de las restricciones de la reducción de emisiones al 50 % tienen un precio incremental relativamente bajo, como se muestra en la Tabla 8.

Se debe tener en cuenta que se supone que las políticas tienen una participación completa y que se implementan de manera eficiente. Si se produce una implementación ineficiente (por ejemplo, mediante la asignación ineficaz de permisos, normas diferenciales, exclusiones, impuestos ineficientes o exenciones regionales), entonces los costos aumentarán y la relación de costo-beneficio incluso de la política óptima podría disminuir fácilmente.

9.2.1. Controles de emisiones, el costo social del carbono y los precios del carbono

Se muestran a continuación los diferentes resultados de los diferentes escenarios acerca de control de emisiones, el costo social del carbono y de los precios del CO₂.

Tasa de control de emisiones (% por año)	2015	2030	2050	2100	2150	2200	2300
Base	0,030	0,038	0,052	0,112	0,244	0,530	1,200
Óptimo	0,030	0,238	0,363	0,841	1,000	1,200	1,200
Limitado a 2°C	0,030	0,847	1,000	1,200	1,200	1,200	1,200
Limitado al 50%	0,030	0,502	0,604	0,960	1,200	1,200	1,200
Sin EEUU	0,030	0,391	0,582	0,960	1,200	1,200	1,200

Tabla 9. Tasa de control de emisiones

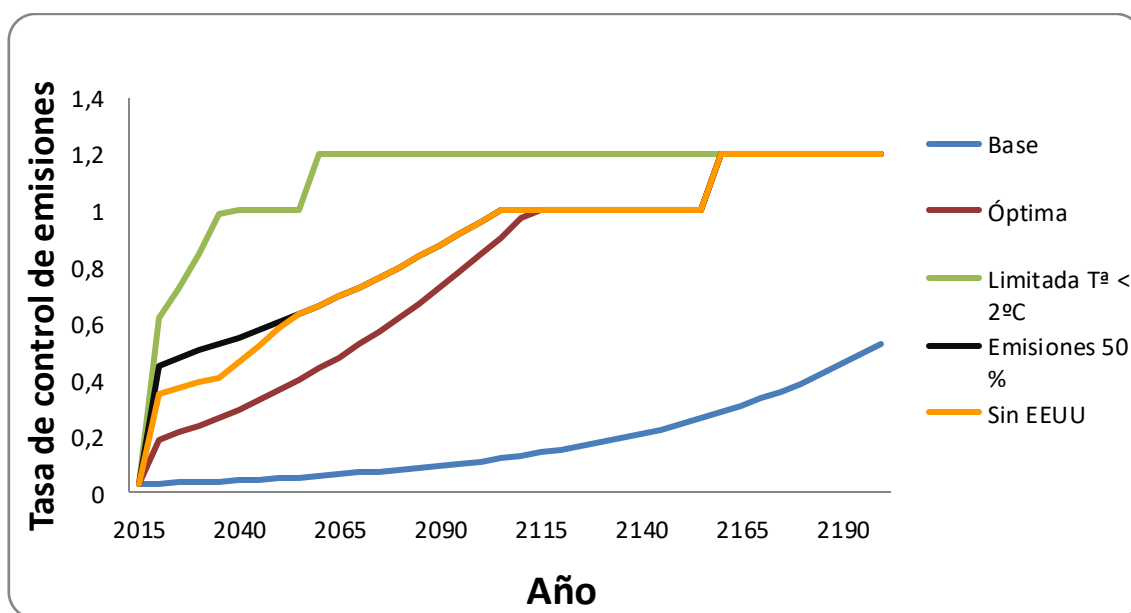


Figura 56. Tasa de control de emisiones

La Tabla 9 y la Figura 56 muestran la tasa de control de emisiones de CO₂ en las diferentes políticas. En el camino óptimo, la reducción de emisiones comienza a una tasa de alrededor del 20 por ciento de las emisiones de línea de base en el segundo período de modelo (2020-2030) y sube lentamente durante el próximo siglo, alcanzando alrededor del 32 por ciento en 2050.

La política Óptima y las de reducción de emisiones al 50 % presentan trayectorias similares, con un fuerte aumento inicial de la tasa de control para ir suavizándose a lo largo del tiempo.

La limitación a 2°C impone desde el principio una alta tasa de control de emisiones para poder alcanzar dicho objetivo, siendo las emisiones 0 en el año 2035.

Precio del carbono (2010US\$ por tonelada de CO ₂)	2015	2030	2050	2100	2150	2200	2300
Base	2,0	2,7	4,0	10,8	29,0	78,0	158,9
Óptimo	2,0	51,2	91,0	271,3	277,6	215,5	129,9
Limitado a 2°C	2,0	390,6	460,7	357,6	277,6	215,5	129,9
Limitado al 50%	2,0	169,1	205,6	334,8	277,6	215,5	129,9
Sin EEUU	2,0	113,3	193,5	334,8	277,6	215,5	129,9

Tabla 10. Precio del carbono

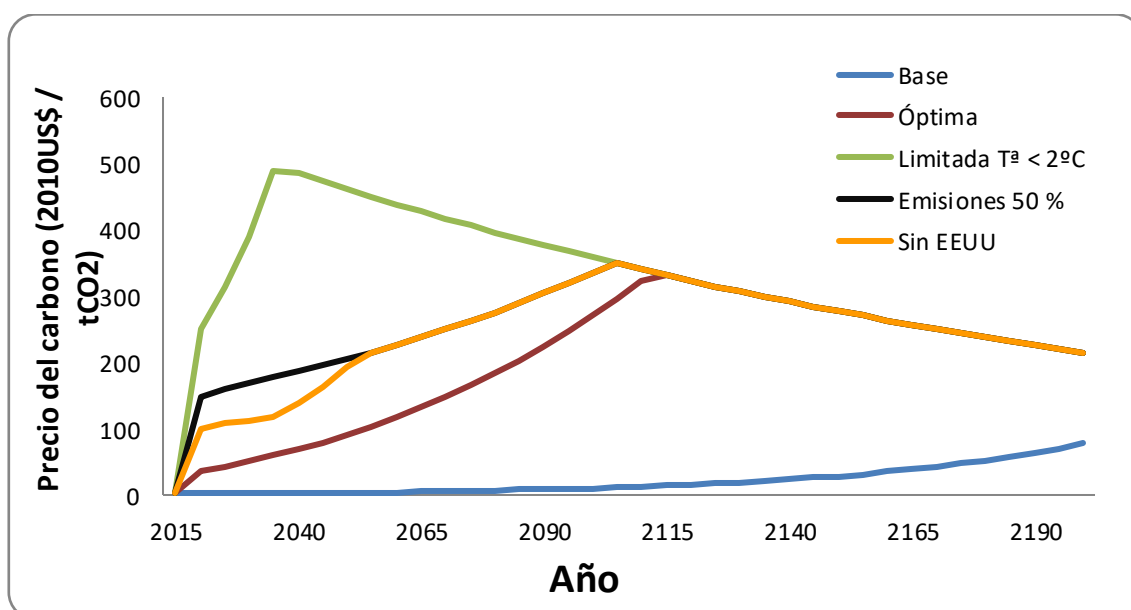


Figura 57. Precio del carbono

Como se puede observar, la Figura 56 y la Figura 57 son prácticamente idénticas. Y es que la reducción de emisiones depende del precio del CO₂. A mayor precio, a mayor impuesto del carbono, más se reducirán las emisiones y más se apostará por las energías limpias.

Se observa en la Figura 57 que cuanto más restrictiva sea la política mayor será el precio del CO₂. Vemos como a partir del año 2100 la política que restringe el aumento de temperatura a 2°C sigue la misma trayectoria que las políticas que limitan las emisiones. Esto es debido al Hotelling, a partir de ese momento es el precio de la tecnología de backstop el que manda. Algo más tarde seguirá esa misma trayectoria la política Óptima.

Se están analizando las políticas del próximo siglo, una de las hipótesis es que va a haber una reducción de las emisiones de CO₂ porque se va a imponer un impuesto. ¿Es razonable pensar que esta sociedad va a poner un impuesto sobre el carbono? Hoy por hoy no, pero sin

embargo, va a tener que sufrir una serie de daños para que se dé cuenta de que es necesario hacerlo. Para cuando lo haga van a ocurrir dos cosas:

- La energía renovable es más barata de lo que parece. Debido a que se ha aprendido a usarla (curva de aprendizaje) y se ha invertido en aprender a usarla.
- Los costes de desmantelamiento y limpieza de las energías sucias, que valen mucho dinero y antes no se tenían en cuenta. Por ejemplo, la liquidación de plantas nucleares nos está haciendo conscientes de los costes de desmantelamiento que, anteriormente, como eran al final de la vida útil nadie los consideraba, y supone un gran coste.

Entonces, para cuando ese proceso tenga lugar, las variables de entorno van a cambiar, y el impuesto que hoy en día parece imposible, será viable.

SCC (2010 US\$)	2020	2030	2050
Base	44,2	68,6	141,6
Óptimo	30,7	51,2	91,0
Limitado a 2°C	120,2	402,8	492,6
Limitado al 50%	63,4	107,1	192,6
Sin EEUU	59,7	104,3	188,2

Tabla 11. SCC

Uno de los cálculos más importantes en el modelo DICE es el costo social del carbono (SCC). La estimación del modelo DICE, que se muestra en la Tabla 11, es que el SCC sin intervenciones es de aproximadamente 44 2010US\$ por tonelada métrica de carbono.

9.2.2. Emisiones, concentraciones y cambio climático

Emisiones industriales de CO ₂ (GtCO ₂ /año)	2015	2030	2050	2100	2150	2200	2300
Base	35,8	46,4	58,2	70,9	60,6	33,0	-8,6
Óptimo	35,8	36,8	39,1	12,8	0	-14,5	-9,0
Limitado a 2°C	35,8	7,3	0	-15,9	-16,4	-14,6	-9,1
Limitado al 50%	35,8	24,0	24,3	3,3	0	-14,6	-9,0
Sin EEUU	35,8	29,3	25,6	3,3	0	-14,5	-9,0

Tabla 12. Emisiones industriales CO₂

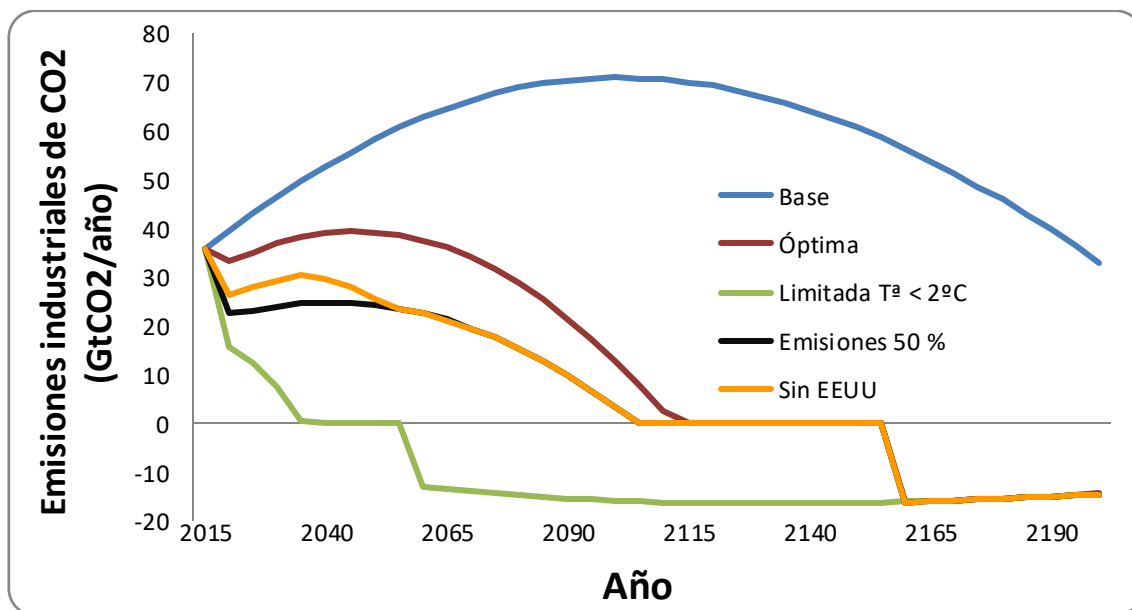


Figura 58. Emisiones industriales de CO₂

La Tabla 12 y la Figura 58 muestran las emisiones de CO₂ industriales por año. Las emisiones anuales siguen un patrón en forma de joroba para todos los escenarios excepto para el de limitación de la Tª, que empieza a decaer desde el primer momento.

Las proyecciones de emisiones industriales de CO₂ de base o incontroladas en el modelo DICE continúan aumentando rápidamente en las próximas décadas, llegando a 70 GtCO₂ anualmente en 2100. En el caso óptimo, las emisiones se limitan a 12,5 GtC anualmente en 2100.

Concentración atmosférica (ppm)	de	CO ₂	2015	2030	2050	2100	2150	2200	2300
Base			399,5	459,2	552,4	826,4	1.082,5	1.243,6	1.170,6
Óptimo			399,5	450,6	517,4	628,1	611,9	543,1	439,8
Limitado a 2°C			399,5	426,0	419,4	357,1	288,7	226,6	138,4
Limitado al 50%			399,5	436,9	477,2	534,1	521,0	454,5	355,2
Sin EEUU			399,5	442,2	491,7	545,9	532,4	465,7	365,8

Tabla 13. Concentración atmosférica de CO₂

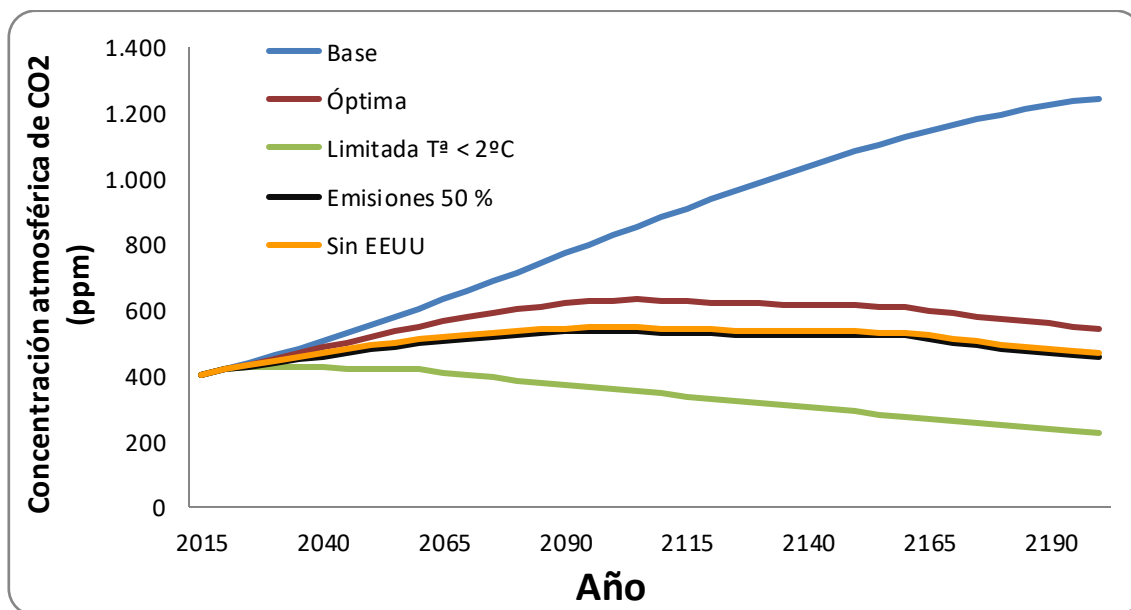


Figura 59. Concentración atmosférica de CO2

Las concentraciones atmosféricas de CO₂ se muestran en la Tabla 13 y la Figura 59. A partir de una concentración atmosférica de 399,4 ppm en 2015, las concentraciones de referencia aumentan a 826 ppm en 2100 y 1.243 ppm en 2200. En el caso de control óptimo, las concentraciones se limitan a 628 ppm en 2100 y 543 ppm en 2200. La mayoría de las diferencias entre las concentraciones de CO₂ en el óptimo económico y en los casos de los límites de emisiones vienen después de 2050.

Destaca que para poder llegar a un aumento máximo de 2°C, la concentración de carbono apenas puede aumentar desde nuestros días.

9.2.2.1. Aumento de la temperatura

Aumento de la Tª (°C desde 1900)	2015	2030	2050	2100	2150	2200	2300
Base	0,85	1,37	2,13	4,10	5,69	6,71	7,16
Óptimo	0,85	1,35	2,03	3,48	4,03	3,94	3,17
Limitado a 2°C	0,85	1,31	1,73	1,99	1,50	1,00	0,86
Limitado al 50%	0,85	1,34	1,91	3,02	3,40	3,24	2,30
Sin EEUU	0,85	1,36	1,96	3,10	3,49	3,34	2,42

Tabla 14. Aumento de la Tª atmosférica

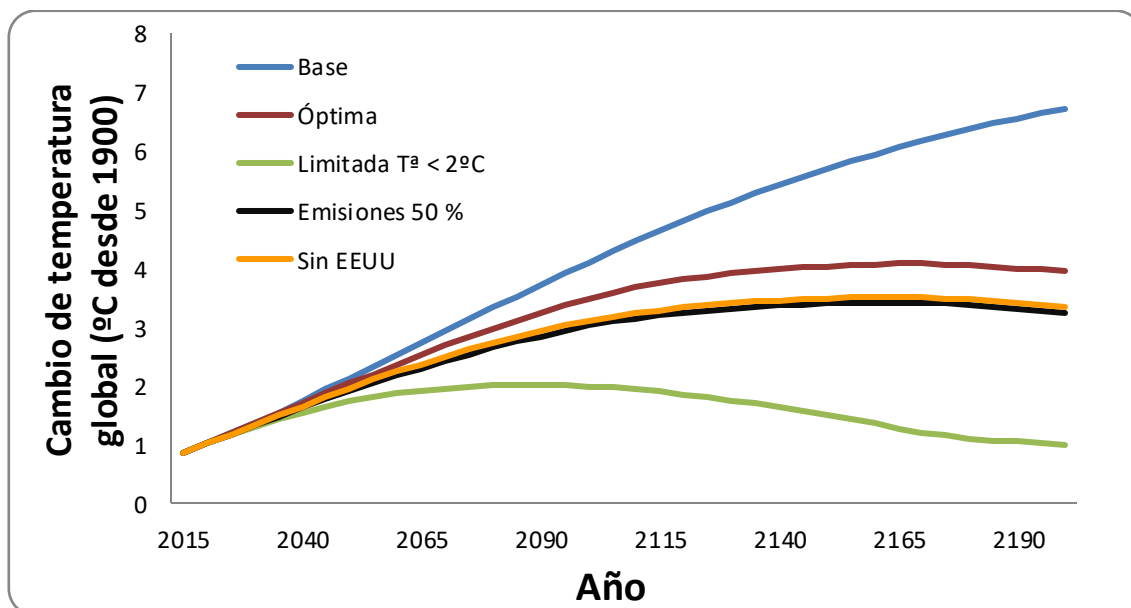


Figura 60. Aumento de la Tª atmosférica

Los aumentos en la temperatura media global se muestran en la Tabla 14 y en la Figura 60. El aumento proyectado para el escenario base es de 4,10 ° C en 2100 y 6,71° C en 2200. Claramente, de acuerdo con las proyecciones del modelo DICE, el mayor calentamiento está presente debido a las emisiones anteriores y la inercia climática. En comparación, el óptimo económico tiene un aumento proyectado de 3,48 ° C por 2100 y 3,94 ° C por 2200.

Después de 2100, el escenarios con límite climático comienza a tender hacia abajo en relación con los otros caminos. En cambio, los escenarios con límites de emisiones no comienzan a tender hacia abajo hasta el año 2165.

Uno de los resultados desalentadores de los análisis de evaluación integrados mostrados en estas cifras es la dificultad de tener un impacto importante en la trayectoria de la temperatura durante el próximo siglo debido a la inercia en los sistemas económicos y climáticos. La trayectoria óptima reduce la temperatura media global en aproximadamente 1° C con respecto a la línea de base en 2100. Incluso si las emisiones se redujeran un 50 por ciento con respecto a las emisiones de 1990, el cambio de temperatura global seguiría siendo de al menos 3 ° C. Sólo los caminos ambiciosos, con un exceso de costos de reducción, hacen una muy grande mengua en el calentamiento global en 2100. Sin embargo, las políticas eficientes tienen un impacto más sustancial sobre el largo plazo.

Se puede comprobar como la disminución del 50% promovido por el Acuerdo de París, no es suficiente para lograr el objeto de superar los 2°C, ya que con esta reducción se lograría limitar el aumento de temperatura hasta los 3,5°C.

9.2.3. Otras variables económicas

El modelo incluye muchas otras variables económicas y ambientales que forman parte del análisis de evaluación integrada.

A continuación se muestran las variables económicas más importantes en los diferentes escenarios:

Producción (billones de 2010US\$)	bruta	2015	2030	2050	2100	2150	2200	2300
Base		105,2	172,5	295,7	788,3	1.565,8	2.623,5	5.359,4
Óptimo		105,2	172,7	296,2	794,3	1.594,5	2.708,9	5.603,3
Limitado a 2°C		105,2	171,5	291,0	785,0	1.598,4	2.732,430	5.661,8
Limitado al 50%		105,2	172,4	295,4	794,4	1.601,7	2.723,1	5.631,3
Sin EEUU		105,2	172,4	295,4	794,0	1.600,7	2.721,3	5.627,9

Tabla 15. Producción bruta

Consumo per cápita (miles de 2010US\$ por año)	2015	2030	2050	2100	2150	2200	2300
Base	10,5	14,9	22,6	52,1	96,4	154,4	307,5
Óptimo	10,5	14,9	22,5	52,2	100,9	170,6	357,1
Limitado a 2°C	10,5	14,3	21,5	52,3	105,1	179,0	369,0
Limitado al 50%	10,5	14,7	22,3	52,4	102,6	173,7	363,1
Sin EEUU	10,5	14,7	22,3	52,3	102,4	173,3	362,3

Tabla 16. Consumo per cápita

Tasa de interés real (% por año)	2015	2030	2050	2100	2150	2200	2300
Base	0,0510	0,0476	0,0436	0,0358	0,0306	0,0272	0,0232
Óptimo	0,0510	0,0476	0,0436	0,0364	0,0320	0,0287	0,0233
Limitado a 2°C	0,0450	0,0428	0,0453	0,0384	0,0328	0,0285	0,0230
Limitado al 50%	0,0487	0,0475	0,0438	0,0370	0,0321	0,0287	0,0233
Sin EEUU	0,0487	0,0475	0,0438	0,0370	0,0321	0,0287	0,0233

Tabla 17. Tasa de interés real

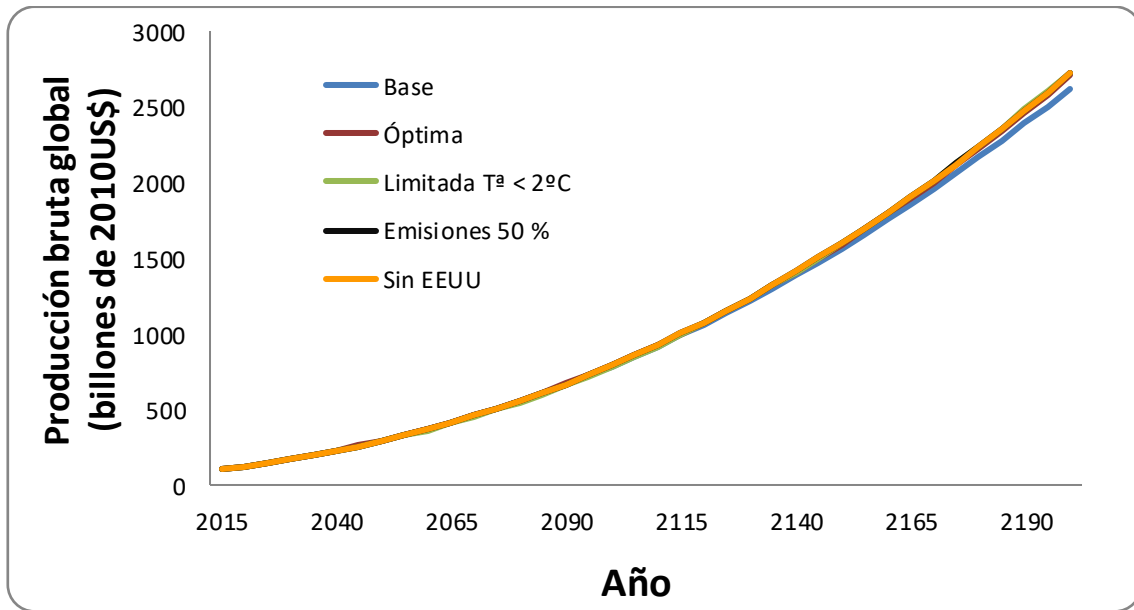


Figura 61. Producción bruta global

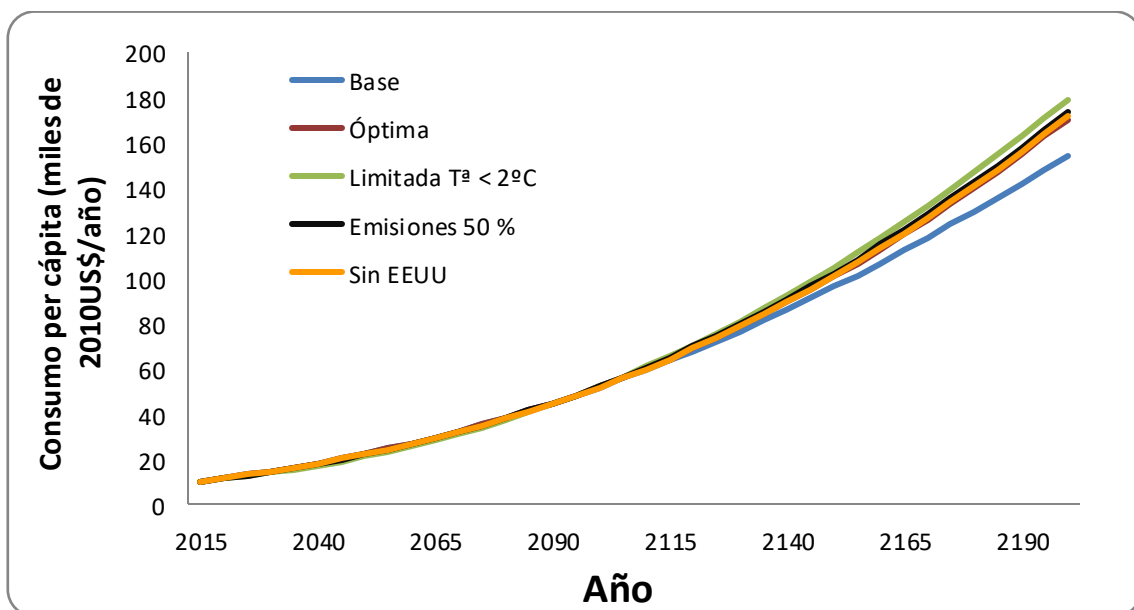


Figura 62. Consumo per cápita

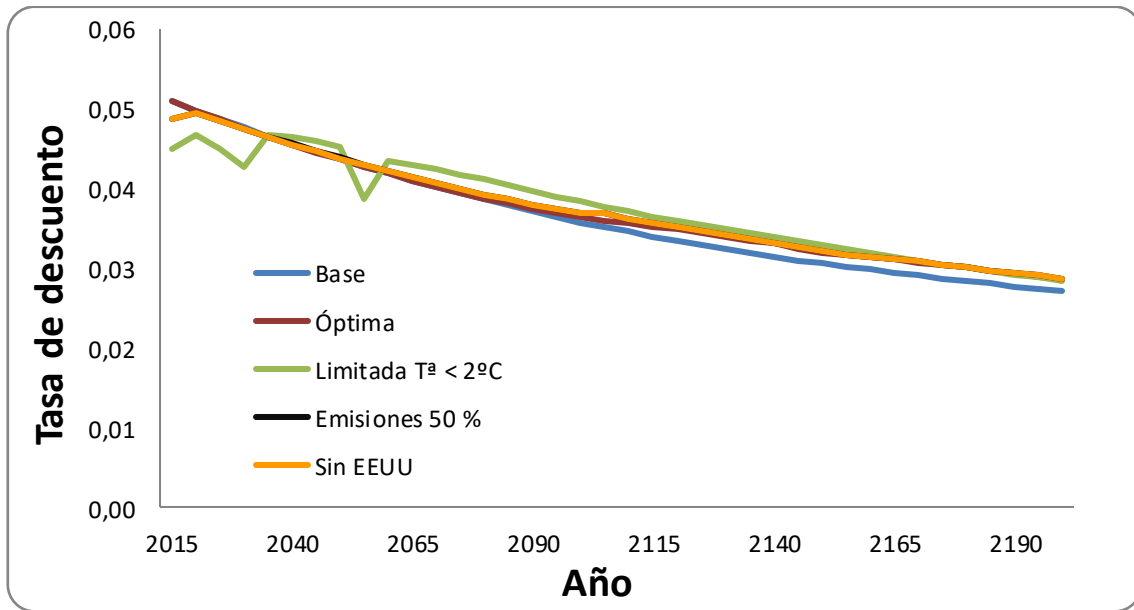


Figura 63. Tasa de interés

Hay que señalar dos puntos sobre las tendencias. En primer lugar, el modelo supone un crecimiento económico rápido y continuado en los próximos años. El crecimiento medio del consumo mundial per cápita (PPP ponderado entre países) durante el período 1960-2000 fue de alrededor del 2,5 por ciento al año. La proyección del modelo DICE para el período 2000-2100 es de 1,7% por año. Esto conduce a un nivel de consumo per cápita de 56.000 dólares en 2105, en comparación con 10.500 dólares en 2015. Este crecimiento conducirá a un aumento de las emisiones, pero también mejorará los niveles de vida y proporcionará recursos para hacer frente al calentamiento global.

10. CONCLUSIONES

Tras el análisis realizado a lo largo de todo este estudio, se puede afirmar que aunque el modelo DICE parezca un modelo sencillo, no lo es. Para lidiar con este modelo se necesita una capacidad de cómputo relevante, hacen falta aplicaciones potentes.

El modelo DICE es un modelo analítico y empírico, del que debemos conocer sus limitaciones para poder obtener resultados útiles. Es decir, no se debe trabajar con él como si fuese una máquina de la verdad, porque no lo es. Al igual que con todos los modelos a gran escala de este tipo, debe actualizarse continuamente, ya que sino sus parámetros se van quedando anticuados.

El modelo incluye suposiciones y simplificaciones sobre cómo funciona el sistema de clima físico, así como la interacción de variables demográficas, políticas y económicas. Es esencial comprender estas suposiciones subyacentes así como los insumos del modelo para poder trabajar con el mismo. Igual de importante es conocer las ecuaciones que conducen al modelo para poder comprender los mecanismos responsables de las proyecciones y predicciones del mismo.

La estructura, las ecuaciones, los datos y los parámetros del modelo tienen elementos inciertos. Prácticamente ninguno de los componentes principales se entiende completamente. Además, debido a que el modelo incorpora proyecciones a largo plazo de fenómenos mal entendidos, los resultados deben ser vistos como una tendencia a un error creciente a medida que las proyecciones avanzan hacia el futuro.

Otra conclusión, relacionada con lo anterior, es que el modelo DICE no es más que un enfoque para comprender las cuestiones económicas y de política relacionadas con el calentamiento global. Es decir, Nordhaus no pretende ser certero, sino ser consistente. Al trabajar con el modelo, se debe saber que se trabaja con una sociedad ficticia, una sociedad que Nordhaus supone. El problema es que se lean los resultados de este modelo como, por ejemplo, que el PIB va a ser un determinado valor, porque Nordhaus no está diciendo eso.

Es importante comprender que no podemos considerar los resultados como meramente predictivos, se trata de ensayar un modelo con un test y extraer conclusiones del comportamiento de la sociedad modelada ante un test virtual que simula la coyuntura climática.

El modelo realiza multitud de suposiciones, por lo que los resultados del mismo serán tan buenos o tan malos como:

- Verosímiles sean sus hipótesis.
- Consistentes sean la combinación de ellos.

Nordhaus, lo que está diciendo es que para una sociedad que partiendo de un punto de vista conocido que lleve una evolución razonable, le podría estar pasando eso. Y si se toma una medida en esa sociedad teórica en esas condiciones teóricas, sería capaz de controlar un cierto

porcentaje del daño. La probabilidad de que en el futuro esa sociedad sufra ese daño es imposible saberlo. Es por eso que en ocasiones los modelos a veces transmiten la impresión de que se sabe mucho más de lo que realmente se hace. De ahí nace la necesidad de analizarlos, de saber sus límites e hipótesis.

Otra conclusión importante es que el modelo DICE contiene representaciones altamente simplificadas de las principales relaciones entre las emisiones, las concentraciones, el cambio climático, los costos de las reducciones de emisiones y los impactos del cambio climático.

Al trabajar con el cambio climático, debe tenerse en cuenta que los efectos de los GEI dependen de su concentración, es decir, de su stock en la atmósfera y que, por lo tanto, el resultado inmediato de cualquier esfuerzo para reducir las emisiones será muy pequeño. Para reducir la concentración se requerirá de esfuerzos sostenidos en el tiempo, cuyos efectos serán visibles en plazos muy largos.

Por último, el modelo ha servido para evaluar distintas propuestas, por lo que ha sido de aplicación. Se han evaluado cinco políticas y se han analizado sus resultados. El impacto de las incertidumbres sobre las políticas no es obvio. La presunción común es que la incertidumbre conduciría a restricciones más estrictas a las emisiones de carbono o a mayores impuestos sobre el carbono. Esto, sin embargo, no es necesariamente correcto. Si las incertidumbres provienen principalmente de los cambios en la productividad, entonces la presencia de incertidumbre podría conducir a una reducción de los impuestos sobre el carbono óptimos.

Se debe de tener claro además, que ninguna política se presenta como un modelo medioambiental que promulga cánones infalibles que serán religiosamente seguidos por todos. El modelo óptimo es la mejor ruta política posible para las reducciones de emisiones, dadas las limitaciones económicas, tecnológicas y geofísicas que se han estimado. Por tanto, es un punto de referencia para determinar qué tan eficientes o ineficientes pueden ser los enfoques alternativos. Pero, aunque unas políticas sean mejores que otras, sean más eficientes, están condicionadas por las hipótesis heroicas subyacentes del modelo. Por lo tanto, una trayectoria política será la mejor para esta economía teórica, para estas condiciones teóricas. Luego hay una hipótesis adicional, y es que lo mejor para el modelo es también lo mejor para esta sociedad, pero eso tiene dos cuestiones importantes:

- La representatividad del modelo.
- Los costes de transacción.

.

11. CONCLUSIONES PEDAGÓGICAS

Cuando elegí este proyecto, lo que buscaba era experimentar un área completamente diferente de lo que venía haciendo, y así fue. La elaboración de este proyecto me ha servido para desarrollar un área bastante nueva para mí. A lo largo de mis estudios, nunca había realizado un trabajo parecido a este. Normalmente, los trabajos realizados eran mucho más prácticos y más enfocados a proyectos, no a un análisis o a una investigación de algo determinado.

Habituado a proyectos mucho más mecánicos, a seguir a normativa, etc., uno de los mayores cambios quizás ha sido el tener mis propias ideas, discutir hipótesis, indagar hasta llegar al fondo de la cuestión. En definitiva, desarrollar mis propias ideas y mis propias opiniones.

Pero al final, a pesar de las dificultades encontradas durante el camino, puedo concluir que el desarrollo del modelo me ha enseñado muchas más cosas de las que me esperaba:

- Primeramente, para analizar el modelo he seguido una metodología, identificando cada ecuación, cada variable, cada parámetro, sus flujos, etc. y he descubierto que con esa metodología puedo analizar cualquier modelo.
- Quizás una de las cosas más importantes que he aprendido es a analizar el problema antes de ir directamente a la solución. Es decir, me he dado cuenta que para utilizar cualquier modelo, cualquier herramienta, tengo que saber primero que es lo que hace y cómo lo hace. Tengo que investigar sus tripas, meterme dentro del mismo, pues es lo que realmente necesito conocer para saber lo que hacen y lo que verdaderamente significan los resultados que sacan. Un gran error es coger un modelo, correrlo y creer sus resultados como una verdad universal.
- A separar datos de resultados, que aunque parezca una cosa muy básica y lógica no siempre lo es. Tengo que saber distinguir que variables son de entrada y cuáles son los resultados, puesto que yo no puedo presentar una variable dato como un resultado.
- A descubrir las hipótesis limitantes de los modelos. He aprendido a llegar hasta el fondo de la cuestión para destapar las hipótesis que rigen cada una de las variables, saber porque el autor las supone así. A aflorar las hipótesis a partir de las cuales se basan determinadas variables del modelo.
- A separar lo que veo de lo que opino. También es una de las cosas más importantes que me llevo, separar mis pensamientos de los datos, de lo que es y se puede probar. Es muy importante tener opiniones y lo que he aprendido es a tenerlas fuera de lo que es estrictamente objetivo. En definitiva, a dar mi punto de vista manteniendo separados los juicios de valor de lo que son datos en frío.
- A identificar cuáles son las fuentes de información y a criticarlas, porque se van quedando anticuadas y son inconsistentes.
- A analizar las ecuaciones que conducen al modelo para poder comprender los mecanismos responsables de las proyecciones y predicciones.
- He aumentado considerablemente mi conocimiento en economía. Me ha ayudado a consolidar y a ampliar los conocimientos adquiridos en el máster.

- Necesidad de hacer un documento muy ordenado, con referencias automáticas, para una mejor comprensión.
- Y por último me ha descubierto una nueva rama profesional, que me gusta y que me abre aún más el abanico de posibilidades hacia donde encauzar mi futuro profesional.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, Bethencourt, Marrero, & Perera. (2012). *El modelo Neoclásico con tasa de ahorro endógena*.
- Alvarez, J. (Junio de 2006). *IPCC.com*.
- Antonio, J. S. (2010). *Forzamiento radiativo y cambio químicos en la atmósfera*.
- DGPI-MEF. (2011). *Cálculo de la Tasa Social de Descuento para Proyectos de Inversión Pública Ambientales*.
- Fernández, C. G. (2006). *El análisis coste-beneficio y la dificultad de su aplicación al cambio climático*.
- Gillingham, K., Nordhaus, W., Anthoff, D., Blanford, G., Bosetti, V., Christensen, P., y otros. (2015). *Modeling Uncertainty in Climate Change: a Multi-Model Comparison*. New Haven.
- I, I. W. (2013). *Climate Change 2013. The physical Science Basis. Summary for policymakers*. IPCC.
- IPCC Working Group III. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.
- Metcalf, G., & Stock, J. (2015). *The Role of Integrated Assessment Models in Climate Policy*.
- Nordhaus, W. (1993). *Reflections on the Economics of Climate Change*.
- Nordhaus, W. (1994). *Managing the global commons " The economics of climate change"*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Nordhaus, W. (2008). *A Question of Balance*. New Haven & London: Yale University Press.
- Nordhaus, W. (2014). *Estimates of the Social Cost of Carbon*. University of Chicago Press.
- Nordhaus, W. (2016). *Projections and uncertainties about climate change*. Yale University.
- Nordhaus, W. (2017). *Revisiting the social cost of carbon*. National Academics of Science.
- Nordhaus, W., & Boyer, J. (2000). *Warming the world*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Nordhaus, W., & Sztorc, P. (2013). *DICE 2013R: Introduction and User's Manual*.
- Pindyck, R. S. (2010). *Modeling the Impact of Warming in Climate Change Economics*.
- Pindyck, R. S. (2015). *The use and misuse of models for climate policy*. Massachusetts Institute of Technology.

Riebeek, H. (2011). <https://earthobservatory.nasa.gov>.

The National Academies of Sciences-Engineering-Medicine. (2017). *Valuing climate damages: Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide*. The National Academies Press.

Tol, R. S. (s.f.). *Economic impacts of climate change*.

Trausury, H. (2003). *The Green Book*. London.

Zuluaga, B., & Raffo, L. (2008). *Optimización dinámica y modelos de crecimiento con consumo óptimo: Ramsey-Cass-Koopmans*.