



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Análisis comparativo de modelos de cambio
climático desarrollados en Dinámica de
Sistemas**

Autor: Dña. Noelia Ferreras Alonso
Tutor: D. Luis Javier Miguel González
Cotutor: D. Iñigo Capellán Pérez

Valladolid, Noviembre, 2017



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Análisis comparativo de modelos de cambio
climático desarrollados en Dinámica de
Sistemas**

Autor: Dña. Noelia Ferreras Alonso
Tutor: D. Luis Javier Miguel González
Cotutor: D. Iñigo Capellán Pérez

Valladolid, Noviembre, 2017

RESUMEN

Los Modelos de Evaluación Integrada (IAM) son ampliamente usados en la investigación del cambio climático. Permiten integrar el conocimiento de un conjunto amplio de disciplinas, no sólo la parte climática, incluyendo también los factores sociales y económicos que crean los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero.

En este Trabajo Fin de Máster (TFM) se realiza la comparación, aplicando dinámica de sistemas, del módulo climático de dos modelos distintos (DICE y C-ROADS) integrados en el modelo IAM denominado MEDEAS-World. Con ese propósito en este trabajo se realiza la adaptación del módulo de C-ROADS para su integración en MEDEAS (el módulo de DICE ya estaba incluido en el modelo). La herramienta empleada para la modificación y simulación del modelo es el programa Vensim.

Los resultados muestran que el módulo climático de C-ROADS es una mejor alternativa, debido a que posee una estructura más compleja y realista que es capaz de reproducir mejor las tendencias históricas, y sus resultados se aproximan más a los de la literatura.

Palabras clave: *Cambio Climático, Dinámica de sistemas, Modelos de Evaluación Integrada, MEDEAS-World.*

ABSTRACT

Integrated assessment models (IAM) are widely used in climate change research. They allow the integration of knowledge from a broad range of disciplines, not only the climatic part, but also the social and economic factors that create the scenarios of greenhouse gas emissions.

This Master's Thesis consists of the comparison of the climate module of two different models (DICE and C-ROADS) integrated in the IAM model MEDEAS-World, applying system dynamics. This requires the adaptation of the C-ROADS module for its integration in MEDEAS (the DICE module was already included in the model). The tool used to modify and simulate the model is the Vensim program.

The results show that the climatic module of C-ROADS is a better alternative, because it has a more complex and realistic structure, and it is capable of reproducing historical trends better. In addition, these results are closer to those from the literature.

Keywords: *Climatic Change, System Dynamics, Integrated Assessment Modeling, MEDEAS-World.*

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Contexto	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	4
1.4. Contenido de la memoria	4
2. INTRODUCCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	7
2.1. Bases físicas.....	7
2.1.1. Ciclo de carbono	7
2.1.2. Perturbaciones del ciclo y otros GEI: cambio climático.....	8
2.2. La necesidad de mitigación.....	11
2.3. Negociaciones y acuerdos internacionales	13
2.3.1. Protocolo de Montreal	13
2.3.2. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	13
2.3.3. Límite de temperatura.....	15
3. MODELOS PARA LA INVESTIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	17
3.1. Introducción.....	17
3.2. IAM (Modelos de Evaluación Integrada)	18
3.2.1. Introducción a los IAM	18
3.2.2. Diseño de los IAM	19
3.2.3. Ejemplos de modelos IAM	22
3.3. MAGICC. Modelo climático simple.....	25
3.4. Proyección de escenarios climáticos. Escenarios IPCC.....	26
4. DINÁMICA DE SISTEMAS. VENSIM.	29
4.1. Introducción.....	29
4.2. Elementos básicos en Dinámica de Sistemas	30
4.3. Fases en el proceso de modelado	32
4.4. Programa de simulación: Vensim.....	33
4.4.1. Introducción.....	33
4.4.2. Características del modelado en Vensim.....	33
5. ESCENARIOS	37
6. MÓDULO CLIMÁTICO DEL MODELO DICE.....	39
6.1. Módulo climático de DICE.....	39
6.1.1. Ciclo de carbono.	40
6.1.2. Submodelo climático.....	41

6.2. Integración del módulo climático de DICE adaptado en MEDEAS	42
6.2.1. Ciclo de Carbono	42
6.2.2. Submodelo climático	43
6.3. Resultados	44
7. ADAPTACIÓN DEL MÓDULO DE C-ROADS PARA SU INTEGRACIÓN EN MEDEAS.....	47
7.1. Introducción. Modelo C-ROADS	47
7.2. Módulo climático de C-ROADS.....	49
7.2.1. Ciclo de carbono.	49
7.2.2. Otros GEI (Gases de Efecto Invernadero).....	53
7.2.3. Forzamiento radiativo.....	54
7.2.4. Submodelo climático.	55
7.3. Adaptación de C-ROADS para su implementación en MEDEAS.....	56
7.3.1. Metodología.....	56
7.3.2. Ciclo de Carbono	57
7.3.3. Otros GEI (Gases de Efecto Invernadero).....	62
7.3.4. Forzamiento Radiativo.....	68
7.3.5. Clima	70
7.4. Validación	72
7.5. Resultados simulaciones hasta 2050	74
8. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DICE Y C-ROADS.....	77
8.1. Comparación con los datos históricos	77
8.2. Comparación concentración de CO ₂	79
8.3. Comparación forzamiento radiativo total	80
8.4. Comparación temperatura.....	81
9. CONCLUSIONES	83
9.1. Resumen del trabajo realizado	83
9.2. Resumen de los resultados técnicos	84
9.3. Conclusiones personales sobre el trabajo.....	86
9.4. Líneas futuras de trabajo.....	86
10. BIBLIOGRAFÍA.....	91
11. GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS	95
ANEXOS	97
ANEXO 1: Modelo MEDEAS-World.....	97
ANEXO 2: Adaptación modelo DICE. Descripción de variables.....	101
ANEXO 3: Adaptación modelo C-ROADS. Descripción de variables.	107

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Contexto

El presente trabajo fin de máster se centra en el estudio comparativo del comportamiento de dos modelos climáticos diferentes mediante el empleo de la dinámica de sistemas.

El clima de la Tierra ha cambiado a lo largo de la historia. Hace aproximadamente 7.000 años finalizó la última era de hielo marcando el comienzo del clima moderno y de la civilización humana. La mayoría de estos cambios climáticos se atribuyen a muy pequeñas variaciones en la órbita de la Tierra que cambian la cantidad de energía solar que recibe nuestro planeta.

Por otro lado, los satélites en órbita terrestre y otros avances tecnológicos han permitido a los científicos ver el panorama general, reuniendo varios tipos diferentes de datos sobre nuestro planeta y su clima a escala global. Esta información, recogida durante muchos años, revela los síntomas de un clima que está cambiando.

Además, se demostró a mediados del siglo XIX la naturaleza de captura de calor del dióxido de carbono (CO₂) y otros gases denominados “de efecto invernadero” (GEI). Esto quiere decir que las alteraciones en la composición de estos gases en la atmósfera pueden provocar variaciones climáticas. Por ello, no hay duda de la relación de causalidad entre el aumento de los niveles de gases de efecto invernadero y el calentamiento de la tierra.

La actual tendencia en el aumento global de temperatura de la superficie de la tierra es de especial importancia, porque es muy probable que la mayor parte de ella tenga su origen en el aumento de las emisiones de esos gases de efecto invernadero, cuyo origen se encuentra en la actividad humana desde mediados del siglo XX, la cual continúa a un ritmo que no tiene precedentes.

Con el fin de comprender el sistema climático y sus recientes cambios se han construido varios modelos integrados de economía y clima, los denominados IAM (Integrated Assessment Models). [1] Estos modelos evalúan el cambio climático de extremo a extremo, es decir considerando tanto los factores sociales y económicos que impulsan las emisiones, como los ciclos bio-geoquímicos y la química atmosférica que determinan el destino de las emisiones. De la misma forma son capaces de analizar el efecto resultante de las emisiones en el clima global y local, y los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas y, por consiguiente, sobre las actividades humanas y el bienestar. Así, permiten integrar un conjunto amplio de disciplinas, evitando los límites que supone la investigación dentro de una única área.

En el presente TFM se estudia y compara dos modelos dinámicos integrados de cambio climático, en concreto el módulo que corresponde al clima. Se trata de los modelos DICE (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy), y el que incluye el simulador C-ROADS (Climate-Rapid Overview and Decision Support).

El primero es creado en 1994 (con posteriores mejoras) por William D. Nordhaus de la Universidad de Yale [2]. Es un modelo global agregado simplificado, analítico y empírico, que representa los aspectos económicos, políticos y científicos del cambio climático. [3]

Por otro lado, el simulador C-ROADS [4] ha sido desarrollado en 2008 en conjunto por “Climate Interactive”, “Ventana Systems” y el Grupo de Dinámica de Sistemas de

“MIT Sloan School of Management” (Escuela de Administración y Dirección de Empresas Sloan del MIT). Este programa proporciona una herramienta de ayuda en la toma de decisiones mejorando la comprensión de la respuesta del sistema climático. A diferencia de los IAM más complejos, el modelo C-ROADS permite rapidez de ejecución además de fácil accesibilidad, ya que está disponible en internet de forma gratuita.

Para llevar a cabo la comparación entre los dos modelos, se emplea un lenguaje de simulación común: Vensim. Esta herramienta gráfica permite la creación, modificación, análisis y simulación de modelos de Dinámica de Sistemas. [5]

1.2. Motivación

Los núcleos de hielo extraídos de Groenlandia, la Antártida y los glaciares de montañas tropicales muestran que el clima de la Tierra responde a los cambios en los niveles de gases de efecto invernadero (*Figura 1.1*) [6]. Esta evidencia antigua, o paleoclimática, revela que el calentamiento actual está ocurriendo aproximadamente diez veces más rápido que la tasa promedio de calentamiento en la recuperación de las épocas glaciales.

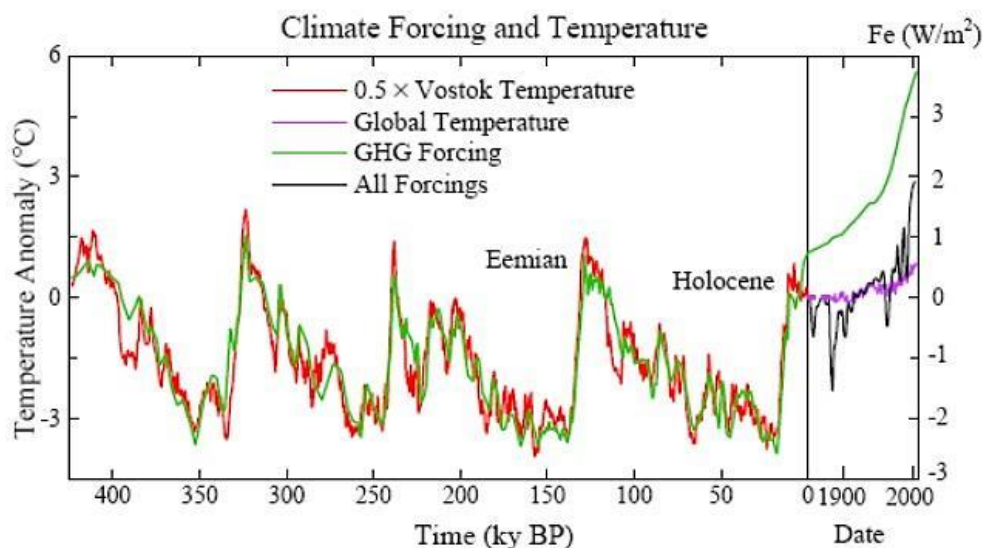


Figura 1.1: Temperatura global (escala izquierda) y fuerza de los GHG (escala derecha) debido al CO_2 , CH_4 y N_2O del núcleo de hielo de Vostok. La escala de tiempo se amplía para la era industrial. Entre las fuerzas modernas se incluyen aerosoles de origen humano, aerosoles volcánicos y la irradiación solar. El punto en el que la fuerza de GHG es cero es la media para hace 10-8 miles de años. El punto de referencia para las fuerzas climáticas modernas y la temperatura moderna es en 1850. [6]

Hacer frente a los desafíos del calentamiento global es una tarea desalentadora tanto para los científicos como para los economistas, quienes deben comprender los cambios futuros, así como para los responsables del desarrollo de políticas, quienes en última instancia deben tomar decisiones con el fin de equilibrar los riesgos y los costes.

Además en muchos casos, aun teniendo una educación científica y ciertas bases de conocimiento sobre el tema, no es posible entender en profundidad la dinámica fundamental de la acumulación de carbono y calor en la atmósfera al ser un sistema dinámico complejo. Esto impide que los encargados de tomar las decisiones puedan

valorar fácilmente el posible impacto a largo plazo de las políticas sobre el clima.

Respondiendo a ese problema, los modelos climáticos, basados en el conocimiento científico, surgen como las principales herramientas que ofrecen una solución a la necesidad de formular y analizar diferentes políticas racionales ante el cambio climático y los riesgos ambientales que puedan derivarse.

Además la integración de diversas disciplinas en los IAM permite a su vez una evaluación coste-beneficio, comparando así los costes de las respuestas o acciones llevadas a cabo con los impactos que estas impiden. Por otro lado, también dentro de estos modelos se integran a su vez módulos denominados económico-energéticos, que permiten estudiar las consecuencias de la limitación de emisiones, impuestos, objetivos concretos de emisiones u otras medidas.

En este contexto, se plantea el desarrollo de este trabajo como una aportación al proyecto MEDEAS en el que colabora la Universidad de Valladolid a través del grupo de investigación reconocido (GIR) de Energías, Economía y Dinámica de Sistemas.

Se trata de un nuevo modelo IAM denominado “MEDEAS-World” [7], que surge como una herramienta para evaluar mejor los impactos y las limitaciones de la transición del sistema de producción y consumo de energía en la Unión Europea a una socioeconomía sostenible y baja en carbono. Este modelo se extiende de 1995 a 2050 y está estructurado de forma flexible en 7 submódulos: Economía, Energía, Infraestructuras, Materiales, Uso del Suelo, Indicadores de Impacto Social y Ambiental y Cambio Climático. La *Figura 1.2* muestra las interrelaciones entre los 7 módulos representado por cajas:

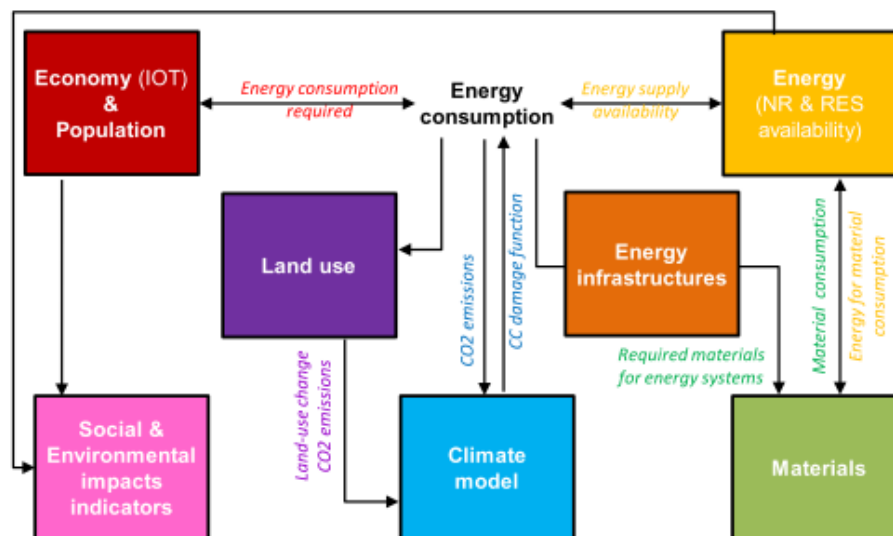


Figura 1.2: Esquema general de los distintos módulos y sus vínculos en MEDEAS-World.

Además este modelo utiliza cinco escenarios, que genéricamente se denominan: 1. Optimismo económico con cierta reforma del mercado, 2. Desarrollo global sostenible, 3. Competición y mercados regionales, 4. Desarrollo regional sostenible y 5. BAU (Continuidad de la tendencia histórica).¹

En concreto, en este Trabajo Fin de Máster se realiza el análisis y la comparación del comportamiento de dos módulos alternativos para cambio climático. Ambos módulos se

¹ Para más información sobre el modelo MEDEAS-World, ver *Anexo 1*. La documentación completa se puede consultar en Capellán-Pérez et al (2017). [7]

han integrado por separado en la estructura del modelo global para simular el ciclo de carbono y el submodelo climático, adaptándose al resto de relaciones y variables de Medeas y manteniendo sus cinco escenarios.

El trabajo fue propuesto por Luis Javier Miguel González, profesor titular del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Escuela de Ingenierías Industriales (EII) de Valladolid.

1.3. Objetivos

El principal propósito de este proyecto es el análisis y la comparación del comportamiento del módulo climático de dos modelos diferentes: DICE y el simulador C-ROADS. Este análisis se realiza dentro del proyecto MEDEAS, en cuyo modelo se implementa dicho módulo.

Para ello, es necesario incluir el ciclo de carbono y el submodelo climático de cada modelo en el de MEDEAS, manteniendo sus escenarios y utilizando como variable de entrada en el ciclo de carbono las emisiones antropogénicas que se calculan en MEDEAS.

El módulo climático de DICE estaba ya incluido en el modelo. Por ello, en el presente trabajo se describirá en detalle la adaptación del submodelo climático de C-ROADS en MEDEAS. La herramienta empleada para ello será el programa Vensim, que permite la modificación y simulación de modelos de Dinámica de Sistemas.

Los objetivos concretos son los siguientes:

- Comprender, a partir de la bibliografía disponible, el ciclo de carbono y las variables que intervienen, y conocer mejor los modelos integrados de cambio climático.
- Adaptar de forma adecuada el módulo climático del simulador C-ROADS en el modelo MEDEAS.
- Comparar el comportamiento y las salidas correspondientes de los modelos DICE y C-ROADS manteniendo los escenarios de MEDEAS.

1.4. Contenido de la memoria

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el presente apartado se indica las líneas generales que motivan y estructuran el proyecto. En él se recogen también los objetivos planteados por el proyecto.

2. INTRODUCCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.

En este capítulo se introducen los conceptos y variables necesarias que intervienen en el módulo climático que se adapta en el presente trabajo. Para ello se explica primero las bases físicas del cambio climático. A continuación se comentan los escenarios futuros y la necesidad de mitigación, para terminar con las negociaciones y acuerdos internacionales que surgen ante el problema del cambio climático.

3. MODELOS PARA LA INVESTIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En este capítulo se introducen los modelos que se emplean en la investigación sobre el cambio climático. El capítulo se centra más en los modelos IAM (Modelos de Evaluación Integrados), debido a su relación más directa con el presente trabajo (el modelo FREE, el DICE y el propio MEDEAS son IAM). Después, se describe brevemente el modelo climático simple MAGICC empleado por el modelo C-ROADS. Por último, se describen los escenarios utilizados por el IPCC.

4. DINÁMICA DE SISTEMAS. VENSIM.

Seguidamente se explica de forma resumida la teoría sobre la que se basa la dinámica de sistemas, así como el programa empleado en este trabajo: Vensim.

5. ESCENARIOS

En este capítulo se explican en detalle los cinco escenarios futuros utilizados en el modelo MEDEAS, siendo estos los escenarios empleados en las simulaciones realizadas en el presente trabajo.

6. MÓDULO CLIMÁTICO DEL MODELO DICE

Se explica el módulo climático del modelo DICE. A continuación, se describe cómo está integrado este módulo en MEDEAS, y se presentan los resultados de la evolución de la concentración de CO₂ y de la temperatura con escenarios del propio MEDEAS.

7. ADAPTACIÓN DEL MÓDULO DE C-ROADS PARA SU INTEGRACIÓN EN MEDEAS.

En este capítulo se introduce el modelo C-ROADS, explicando en detalle su módulo climático. Después, se describen los pasos seguidos para su integración en MEDEAS. Por último, se presentan los resultados de concentración de CO₂ y temperatura.

8. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DICE Y C-ROADS.

En este capítulo se comparan los resultados obtenidos en MEDEAS con cada uno de los dos módulos climáticos integrados en él (DICE y C-ROADS).

9. CONCLUSIONES

Se exponen las principales ideas y conclusiones técnicas derivadas del trabajo realizado, comentarios personales y posibles líneas futuras de trabajo.

10. BIBLIOGRAFÍA

En la lista aparecen las referencias bibliográficas empleadas en este trabajo numeradas según el orden de aparición en la memoria.

11. GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

2. INTRODUCCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.

En este capítulo se introducen los conceptos y variables necesarias que intervienen en el módulo climático que se adapta en el presente trabajo. Para ello se explica primero las bases físicas del cambio climático. A continuación se comentan los escenarios futuros y la necesidad de mitigación, para terminar con las negociaciones y acuerdos internacionales que surgen ante el problema del cambio climático.

2.1. Bases físicas

En este apartado se explican de manera resumida las claves físicas en las que se basa el cambio climático. Primero se describe el ciclo de carbono, para posteriormente introducir los restantes gases de efecto invernadero (GEI) y cómo las variaciones de todos ellos influyen en la evolución de la temperatura de la superficie de la tierra y por tanto, del clima terrestre.

2.1.1. Ciclo de carbono

El carbono es el fundamento de la vida en la Tierra. Por otro lado, también supone la fuente de la mayoría de la energía consumida por la civilización humana. Es el cuarto elemento más abundante en el Universo. En la Tierra, la mayor parte del carbono se almacena en rocas, mientras que el resto está en el océano, la atmósfera, las plantas, el suelo y los combustibles fósiles.

El carbono es intercambiado de forma cíclica entre cada depósito. Esta combinación de muchos procesos biológicos, químicos y físicos es lo que se denomina ciclo de carbono. Se representa de forma simplificada en la siguiente *Figura 2.1*:

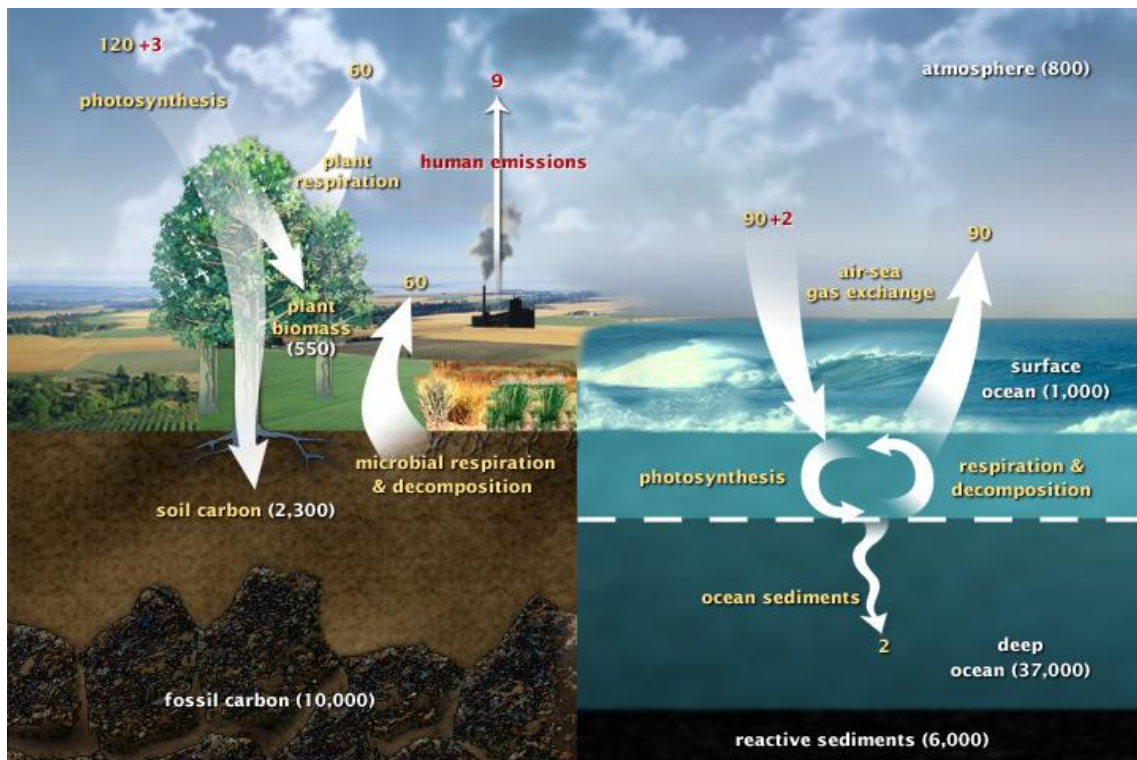


Figura 2.1: Diagrama del ciclo de carbono en el que se representa el movimiento de carbono entre tierra, atmósfera, y océanos. Los números en amarillo son flujos naturales, los rojos son contribuciones humanas en Gt C/año. Los números blancos indican el carbono almacenado. Fuente: Department of Energy Office of Science (genomicscience.energy.gov/carboncycle/). [8]

CICLO DE CARBONO LENTO

El movimiento del carbono de la atmósfera a la litosfera (rocas) comienza con la lluvia. El carbono atmosférico se combina con el agua para formar el ácido débil carbónico que cae a la superficie bajo la lluvia. El ácido disuelve las rocas y libera iones de calcio, magnesio, potasio o sodio. Los ríos llevan los iones al océano.

En el océano, los iones de calcio se combinan con iones de bicarbonato para formar carbonato de calcio (CaCO_3). Este carbono con el tiempo termina en forma de rocas sedimentarias como la piedra caliza.

Solamente el 80 por ciento de la roca que contiene carbono se hace actualmente de esta manera. El 20 por ciento restante contiene carbono de los seres vivos (carbono orgánico) que se ha comprimido en capas de barro. En casos especiales, cuando la materia vegetal muerta se acumula a mayor velocidad a la que lo hace su descomposición, las capas de carbono orgánico se convierten en petróleo, carbón o gas natural en lugar de roca sedimentaria. Finalmente, el ciclo devuelve este carbono a la atmósfera a través de los volcanes.

Por otro lado, el ciclo también posee otro componente ligeramente más rápido que los otros arriba explicados: el océano. En la superficie, donde el aire se encuentra con el agua, el gas CO_2 se disuelve y se elimina fuera del océano en un intercambio constante con la atmósfera. Una vez en el océano, el dióxido de carbono reacciona con las moléculas de agua para liberar hidrógeno, haciendo que el océano se acidifique. El hidrógeno reacciona con el carbonato de la roca para producir iones de bicarbonato.

CICLO DE CARBONO RÁPIDO.

Las plantas y el fitoplancton son los componentes principales del ciclo rápido del carbono. El fitoplancton (organismos microscópicos en el océano) y las plantas absorben dióxido de carbono de la atmósfera. Usando la energía del sol en la fotosíntesis, combinan dióxido de carbono (CO_2) y agua para formar azúcar (CH_2O) y oxígeno.

Por otro lado, también se devuelve el carbono a la atmósfera cuando las plantas y el plancton mueren y se descomponen (son consumidos por las bacterias). Así, el oxígeno se combina con el azúcar para liberar agua, dióxido de carbono y energía.

Esto se puede observar en la manera en la que el dióxido de carbono fluctúa en la atmósfera (*Figura 2.3*). Es como si la Tierra estuviera respirando.

De esta forma, el ciclo de carbono está constituido por sumideros y fuentes de dióxido de carbono. Los sumideros absorben y eliminan el CO_2 de la atmósfera, como por ejemplo las plantas en la fotosíntesis. Por otro lado, las fuentes liberan CO_2 , sirviendo como ejemplo la descomposición de las plantas. El océano se comporta como fuente y sumidero, cambiando con el tiempo el equilibrio entre estos dos procesos.

2.1.2. Perturbaciones del ciclo y otros GEI: cambio climático.

El ciclo de carbono, a largo plazo mantiene un equilibrio que ayuda a mantener la temperatura de la Tierra relativamente estable, como un termostato, manteniendo aproximadamente constante la concentración de carbono en la atmósfera. Pero cuando la cantidad de carbono en un depósito se modifica, el efecto se propaga a los otros.

En el pasado de la Tierra, el ciclo del carbono ha cambiado en respuesta al cambio climático. Según la teoría de Milankovitch las variaciones en la órbita de la Tierra alteran la cantidad de energía que la Tierra recibe del Sol, y esto conduce a un ciclo alterno de edades de hielo y períodos cálidos, que es el clima actual de la Tierra. En estos periodos el dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero también varían junto con la

temperatura, y actúan como retroalimentaciones positivas aumentando los efectos (Figura 2.2).

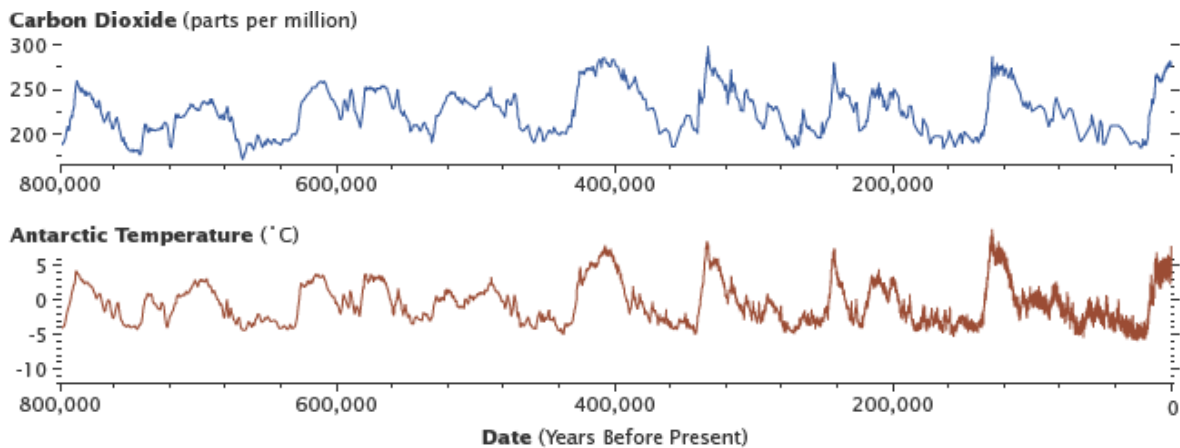


Figura 2.2: Diagramas de los niveles de CO₂ y de temperatura en los últimos 800.000 años. Fuente: datos de núcleos de hielo en la Antártida Dome C, Luthi et al. 2008. y Jouzel, J., et al. 2007.

Actualmente los cambios en el ciclo de carbono tienen origen antropogénico, debido a la liberación de grandes cantidades de carbono en la quema de combustibles fósiles, y a la deforestación y uso intensivo de la tierra (los cultivos almacenan menos carbono).

Por ello, desde la Revolución Industrial, las concentraciones de CO₂ en la atmósfera han aumentado desde 280 ppm (partes por millón) en 1780 a 404,21 ppm en 2016 [9] (Figura 2.3).

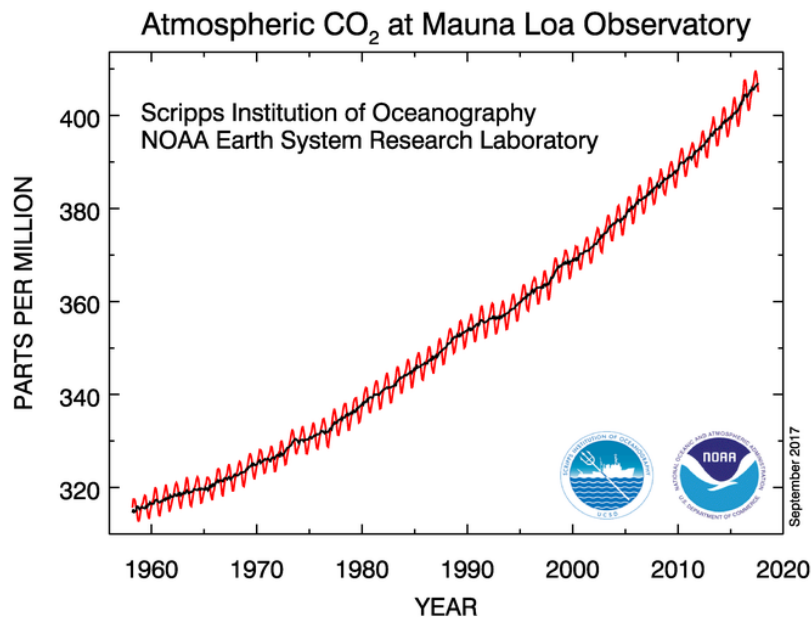


Figura 2.3: Datos de CO₂ medidos en el observatorio de Mauna Loa (curva roja).

Por otro lado, las concentraciones en metano (CH₄) también han aumentado de 791 ppm en 1850 a 1.754 ppm en 2005 [10].

Todos estos datos son significativos, ya que tanto el CH₄ como el CO₂, junto con el óxido nitroso (N₂O), el vapor de agua y los halocarburos, están entre los gases de efecto invernadero (GEI) que ayudan a controlar la temperatura de la Tierra. Estos absorben una amplia gama de energía (incluida la infrarroja) que emite la Tierra y luego la vuelven a emitir hacia fuera en todas direcciones, volviendo una parte de nuevo a la Tierra.

De esta forma, los GEI funcionan como una manta atmosférica que mantiene caliente la superficie de la Tierra, ya que sin este efecto estaría a -18°C . Pero al mismo tiempo que los GEI han estado aumentando desde la Revolución Industrial, las temperaturas globales promedio también lo han hecho en más de 1°C en el periodo de 1880 a 2016.

Este desequilibrio entre la energía solar absorbida y la radiación infrarroja emitida, que puede alterar potencialmente el clima, se cuantifica como “**forzamiento radiativo**”. Se expresa como cambios en el flujo de energía en W/m^2 , y puede ser negativo si su efecto es de enfriamiento, o positivo si aumenta la temperatura [11]. Como se puede observar en la *Figura 2.4* el gas que más contribuye al calentamiento es el CO_2 .

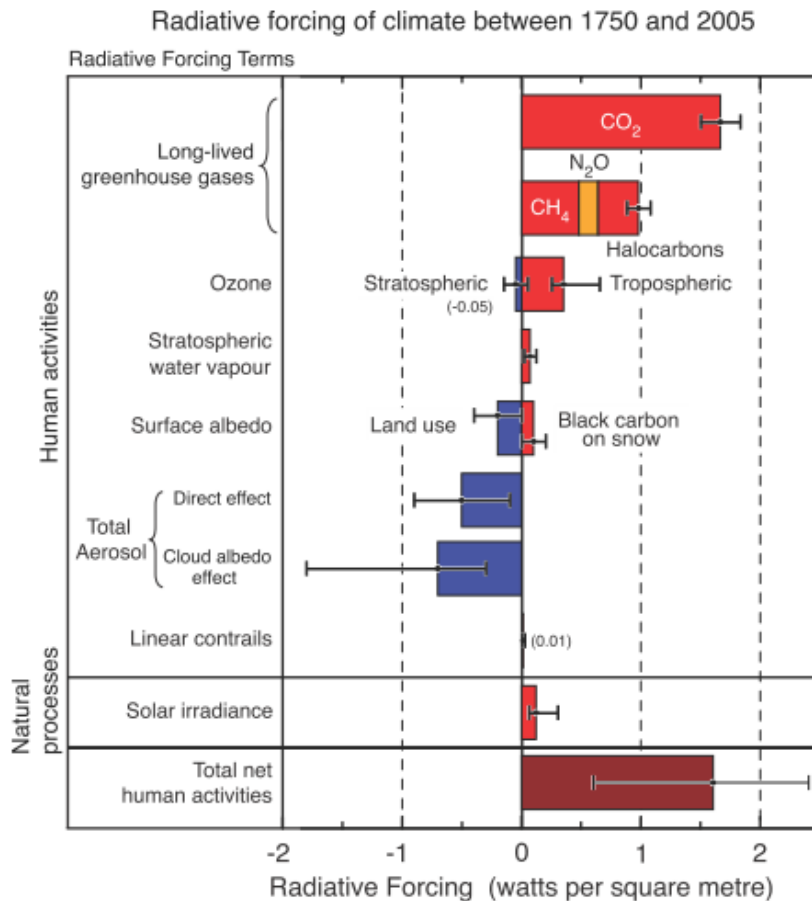


Figura 2.4: Resumen de los principales componentes del forzamiento radiativo del cambio climático. Los valores son con respecto al inicio de la era industrial (1750). Fuente: IPCC AR4 [11].

Uno de los índices más importantes usados para medir la intensidad del forzamiento radiativo para cada gas de efecto invernadero es el GWP (Global Warming Potencial). Este índice se basa en el impacto potencial de las emisiones de cada GEI, y se calcula relativo al dióxido de carbono.

Cuando el balance en la radiación se perturba, la temperatura de la superficie global se modifica y se ajusta a un nuevo estado estacionario. Es aquí donde entra el concepto de **sensibilidad climática**. Esta es una medida que, en condiciones de equilibrio, indica cómo es la respuesta del sistema (promedio mundial del calentamiento de la superficie) a una duplicación en la concentración de CO_2 . Su valor posee gran incertidumbre, y se estima de aproximadamente 3°C , encontrándose dentro de un intervalo de probabilidad entre 2 y $4,5^{\circ}\text{C}$, en el cual el límite superior es más difícil de cuantificar. [12]

2.2. La necesidad de mitigación.

En este apartado se presentan las posibles consecuencias del cambio climático y las proyecciones futuras del clima que indican una necesidad clara de mitigación.

Para empezar, la influencia humana en el sistema climático está clara. Como ya se explicó las emisiones de GEI han aumentado a gran velocidad, siendo actualmente las más altas de la historia. Por otro lado, tampoco hay duda del calentamiento actual del planeta, a pesar de su variabilidad natural en espacios de tiempo cortos (*Figura 2.5*).

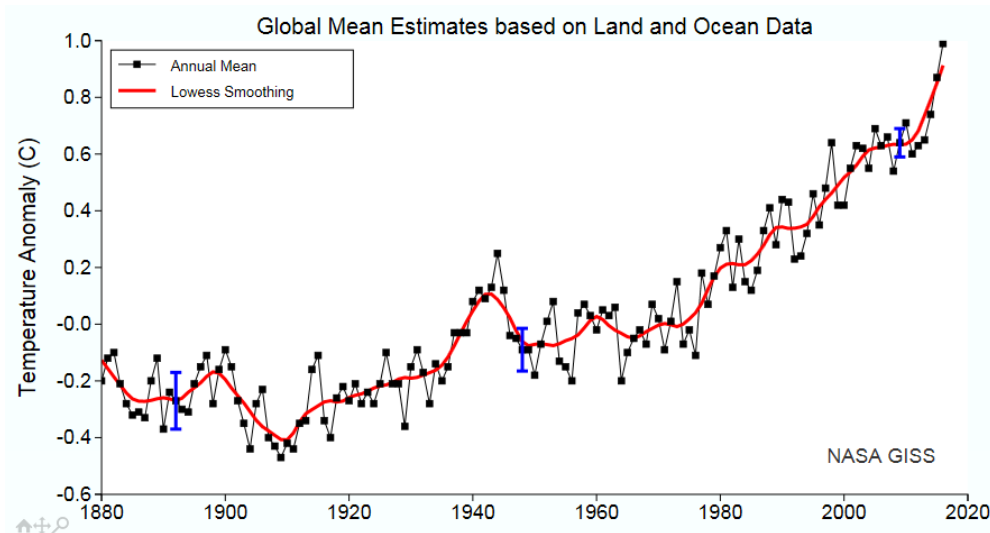


Figura 2.5: Evolución de la temperatura de la superficie de la Tierra. Fuente: NASA GISS.

Desde la revolución industrial, se ha producido el calentamiento del océano, y su absorción del CO_2 ha resultado en su propia acidificación disminuyendo su pH. Además las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida han perdido masa, mientras que los glaciares han seguido disminuyendo en casi todo el mundo. En consecuencia, también el nivel del mar ha aumentado.

Para estimar las consecuencias del cambio climático en el futuro se han realizado multitud de estudios, entre los que destaca el del IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático), y que está formado por un grupo de expertos. Se creó con el fin de analizar la información disponible sobre los elementos científicos, las repercusiones y los aspectos económicos del cambio climático, así como las opciones para atenuar los efectos y/o adaptarse. Además, proporciona asesoramiento a los países que se reúnen en las convenciones del cambio climático (COP), y que se introducirán en el siguiente apartado.

Para las estimaciones en el futuro, el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC emplea las rutas RCP, que son consistentes con un amplio rango de escenarios de la literatura, y cuyo origen y fundamento se explicará en más detalle en el siguiente *Capítulo 3*. Así, es posible mostrar las consecuencias de mantener en el futuro las tendencias históricas y presentes de emisiones, es decir, *escenarios de referencia o BAU* en los que no se realizan esfuerzos adicionales para la restricción en las emisiones y que se encuentran entre las rutas RCP6.0 y RCP8.5. A continuación se incluyen gráficas del IPCC (AR5) [13] en las que se muestran las proyecciones de emisiones de CO_2 y de variación de temperatura (*Figura 2.6*).

Así para un escenario BAU o estándar los modelos existentes en la literatura proyectan un rango de emisiones entre 75-100 GtCO_2 en el año 2050 y de 80-150 GtCO_2

para el año 2100. Respecto a la variación de temperatura, si se mantienen las tendencias actuales de emisiones en el futuro, en el año 2050 se estima que se alcanzará un rango de 1,5-2,25 °C de incremento de temperatura, y de 3-5,75°C para el 2100. Estos resultados indican que sin esfuerzos de mitigación adicionales a los actuales, el calentamiento hacia el final del siglo XXI generará un riesgo alto de impactos graves, generalizados e irreversibles a nivel mundial. Por ejemplo, olas de calor más frecuentes y de mayor duración, y precipitaciones extremas más intensas y también más frecuentes en muchas regiones. Además el océano continuará calentándose y acidificándose, y el nivel del mar aumentando.

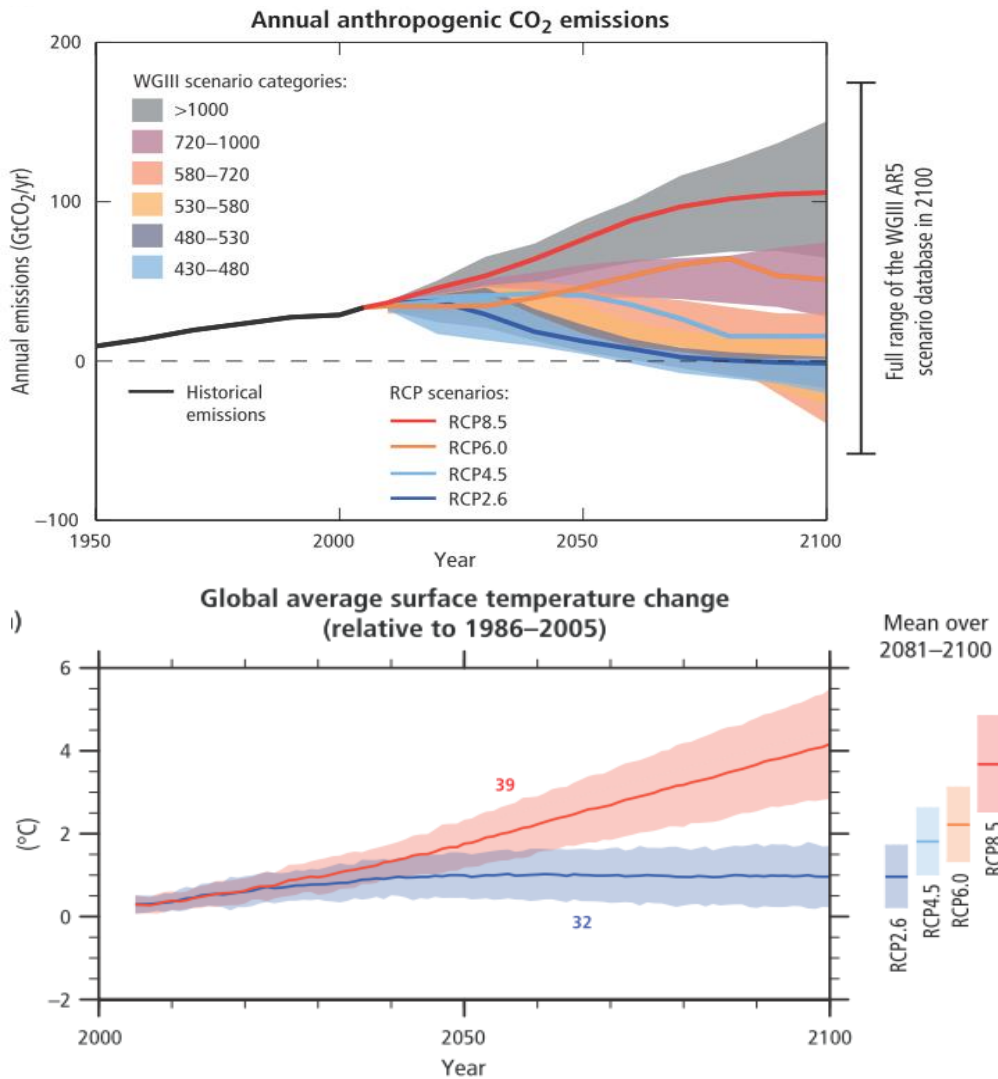


Figura 2.6: Emisiones de CO₂ históricas y proyectadas hasta el año 2100 (figura superior). Variación media de la temperatura de la superficie (figura inferior). Fuente: IPCC AR5 [13].

Por tanto, si el aumento de emisiones de GEI continúa, las consecuencias se agravarán, con un mayor calentamiento y cambios más importantes en los componentes del sistema climático, aumentándose por tanto la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles para las personas y los ecosistemas. Además, muchos de estos impactos se mantendrán durante siglos, incluso cortando por completo las emisiones de GEI.

Por tanto, para limitar el cambio climático y sus consecuencias, se necesita la mitigación de los GEI, es decir, reducciones sustanciales y sostenidas de sus emisiones que, junto con la adaptación, puedan limitar los riesgos del cambio climático. Estas dos

estrategias (mitigación y adaptación) son complementarias, reduciendo no solo los riesgos, si no también aumentando las perspectivas de una adaptación efectiva, y reduciendo los costes y los desafíos de lo que conllevaría una mitigación a largo plazo, así como contribuyendo a vías climáticas para el desarrollo sostenible.

2.3. Negociaciones y acuerdos internacionales

En este apartado se comentan los acuerdos y negociaciones internacionales que han tenido lugar como reacción al problema del cambio climático. Primero se presenta el Protocolo de Montreal, que aunque es un acuerdo que se tomó frente a sustancias que originan el agotamiento de la capa de ozono, estas también son GEI que contribuyen al forzamiento radiativo. A continuación se introduce la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, y el acuerdo vinculado a él: Protocolo de Kioto. Por último se discute el límite de temperatura considerado en las negociaciones recientes.

2.3.1. Protocolo de Montreal

En 1987 se llegó a un acuerdo internacional conocido como Protocolo de Montreal sobre sustancias que agotan la capa de ozono (ODS, ozone-depleting substances) [14]. A través de ese acuerdo y sus posteriores enmiendas y ajustes, muchas naciones del mundo han llevado a cabo políticas para reducir y luego eliminar gradualmente el uso de productos químicos que agotan el ozono. Las ODS se dividen en dos grupos: las ODS de Clase I, como los clorofluorocarbonos (CFC) y las ODS de Clase II, como los hidroclorofluorocarbonos (HCFC).

El Protocolo de Montreal también pidió a la comunidad científica internacional que informara periódicamente a los gobiernos sobre los últimos descubrimientos científicos relacionados con la capa de ozono.

Después de la firma del Protocolo de Montreal, nuevos datos mostraron peores daños de lo esperado en la capa de ozono. En 1992, las Partes en el Protocolo decidieron modificar los términos del acuerdo de 1987 para poner fin a la producción de halones (compuestos formados por Bromo, Flúor y Carbono) para 1994 y CFC (clorofluorocarbonos) en 1996 en los países desarrollados.

Debido a las medidas adoptadas en el Protocolo de Montreal, las emisiones de ODS están disminuyendo y se espera que la capa de ozono se recupere completamente a mediados del siglo XXI. La larga escala de tiempo de esta recuperación se debe a la lentitud con que las ODS son eliminadas de la atmósfera por procesos naturales.

2.3.2. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) es un tratado intergubernamental elaborado para abordar el problema del cambio climático. La Convención, que establece un marco para abordar esta cuestión, se negoció entre febrero de 1991 y mayo de 1992 y se firmó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD) de junio de 1992, también conocida como Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro. La CMNUCC entró en vigor el 21 de marzo de 1994, noventa días después de haberse recibido la ratificación de 50 países. En diciembre de 2007, había sido ratificado por 192 países.

En la Conferencia de las Partes (COP) se continúan reuniendo periódicamente para hacer un balance de los progresos realizados en el cumplimiento de sus obligaciones en

virtud del tratado y considerar nuevas medidas para hacer frente a la amenaza del cambio climático. En unas de las reuniones se negoció el Protocolo de Kyoto adoptado en 1997 en Kyoto, Japón. Se describe a continuación este acuerdo.

2.3.2.1 Protocolo de Kioto.

El Protocolo de Kioto es un acuerdo internacional vinculado a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que compromete a las Partes mediante el establecimiento de objetivos internacionales de reducción de emisiones con el fin de promover el desarrollo sostenible.

Se reconoce en él que los países desarrollados son los principales responsables de los actuales niveles elevados de emisiones de GEI en la atmósfera como resultado de más de 150 años de actividad industrial. Además también impone una carga más pesada a las naciones desarrolladas bajo el principio de "responsabilidades comunes pero diferenciadas".

El Protocolo de Kioto fue adoptado en Kioto (Japón) el 11 de diciembre de 1997 y entró en vigor el 16 de febrero de 2005. Las normas detalladas para la aplicación del Protocolo se adoptaron en la "COP 7" en Marrakesh, Marruecos, en 2001, y se denominan los "Acuerdos de Marrakesh". Su primer período de compromiso comenzó en 2008 y terminó en 2012 [15].

En virtud de los términos acordados en Kyoto, el Protocolo sólo entraba en vigor después de su ratificación por 55 de las Partes (que a su vez representarían el 55% de las emisiones totales de CO₂ de 1990). Aunque el mayor emisor mundial de gases de efecto invernadero, Estados Unidos, rechazó el Tratado de Kyoto, en 2001 después de la elección del presidente Bush, la mayoría de las demás Partes incluidas en el Anexo I, incluyendo Canadá, Japón y los países de la Unión Europea ratificaron el Tratado. En noviembre de 2004, la Federación de Rusia ratificó también el Protocolo, alcanzando así el umbral del 55%. El Protocolo entró finalmente en vigor como documento jurídicamente vinculante el 16 de febrero de 2005. En diciembre de 2007, el Protocolo había sido ratificado por 177 países.

En Doha, Qatar, el 8 de diciembre de 2012, se aprobó la "Enmienda de Doha al Protocolo de Kioto", en el que se establecieron nuevos compromisos para las Partes que aceptaron asumir compromisos en el segundo período desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020.

Durante el primer período de compromiso, los países se comprometieron a reducir las emisiones de GEI a un promedio del 5% en comparación con los niveles de 1990 (cada país adquirió un compromiso individual). Durante el segundo período, las Partes se comprometieron a reducir las emisiones de GEI por lo menos un 18 % por debajo de los niveles de 1990 en el período de ocho años comprendido entre 2013 y 2020.

Sin embargo, la composición de las Partes en el segundo período de compromiso fue diferente. [16] Así, se retiraron del Protocolo de Kioto países que suponen un alto porcentaje de emisiones de GEI, como Canadá, Japón y Rusia.

2.3.2.2 COP más recientes

La COP 21 tuvo lugar del 30 de noviembre al 12 de diciembre de 2015 en París, Francia. En resumen, los acuerdos a los que llegaron fueron mantener el aumento de la temperatura en este siglo por debajo de los 2 grados centígrados, y de seguir esforzándose por limitar el aumento de la temperatura a 1,5 grados centígrados sobre

los niveles preindustriales.

Por otro lado, el acuerdo también se centró en reforzar las necesidades de adaptación frente a los impactos del cambio climático, sobre todo en el caso de países en desarrollo, así como aumentar la transparencia y la información entre gobiernos con el fin de poder ir evaluando los avances [17]. Pero, el centrar todo en la adaptación frente a los posibles riesgos, en lugar de la mitigación con recortes importantes en las emisiones de GEI, conlleva a que el compromiso principal de la comunidad internacional incluye mantener el sistema social y económico actual. Así, “el resultado es la negación de que enfrentar las emisiones de GEI es incompatible con un crecimiento económico sostenido” [18].

La última COP (22), también denominada como “primera sesión de la Conferencia de las Partes del Acuerdo de París” (CMA 1), tuvo lugar en Bab Ighli, Marrakech (Marruecos) del 7 al 18 de noviembre de 2016. En ella los gobiernos han fijado un plazo hasta 2018 para completar las normas de aplicación del Acuerdo de París con el fin de asegurar la confianza, la cooperación y su éxito en los años siguientes.

La próxima COP23 tendrá lugar en Bonn, Alemania, bajo la presidencia de Fiji, del 6 al 17 de noviembre de 2017 [19]. En ella se pretende promover los objetivos y las ambiciones del Acuerdo de París, y lograr progresos definiendo las directrices de aplicación. Por último, cabe añadir que en julio de este año 2017 Donald Trump anunció que EEUU abandonará el Acuerdo de París y que pedirá renegociar el tratado como condición para volver al mismo.

2.3.3. Límite de temperatura.

En las Convenciones por el Cambio climático, se han llegado siempre a acuerdos para limitar el aumento de la temperatura a 2 °C respecto niveles preindustriales, con el objetivo de “evitar que la interferencia humana en el sistema climático llegue a ser peligrosa”, reduciendo para ello las emisiones mundiales para evitar llegar a ese límite.

Pero algunos impactos proyectados para el nivel de 2 grados pueden exceder las capacidades de adaptación, sobre todo de los países más vulnerables, por ello muchos países piden cambiar ese límite a 1,5 °C.

Además mediante modelos, datos paleolíticos y observaciones modernas, se estima que el aumento de temperatura de 2 °C (que se suele asociar con 1000 GtC de emisiones acumuladas de combustibles fósiles), estimularía “feedbacks” (retroalimentaciones), y el calentamiento es posible que se amplificara debido a la inercia del sistema climático cuando está fuera de su equilibrio, con consecuencias desastrosas y fuera de control.

Por ello, el limitar el calentamiento a 2 grados no proporciona seguridad, ya que sus resultados permanecerían presentes durante muchos siglos, destacando sobre todo los impactos en los sistemas de circulación oceánicos, los cuales tienen un gran efecto en el clima del planeta. El objetivo en definitiva, es mantener el clima cerca del nivel del Holoceno, restaurando el equilibrio energético planetario ([20] y [21]).

Para poder pasar de un límite de temperatura a otro, será necesario cambiar las medidas de mitigación, sobre todo en cuanto a la reducción de emisiones de CO₂. Por lo tanto es importante una transición temprana y más rápida, no sólo en cuanto a emisiones sino también de modelo energético, así como modificaciones respecto a prácticas en la agricultura y la forestación. [22]

En la última COP22, el Foro de Vulnerabilidad Climática (CVF) [23] presidido por

Filipinas, que es un grupo actualmente de 43 países en desarrollo vulnerables al cambio climático, hizo pública una declaración que refuerza su llamamiento para limitar la subida de la temperatura media mundial a 1,5°C, en lugar de los 2 grados. Entre los miembros del CVF comprenden varias regiones del mundo, desde las Maldivas a Costa Rica, a Afganistán, Bangladesh, Etiopía, Tualu, Madagascar y Nepal.

El Ministro de Medio Ambiente, Bosques y Cambio Climático de Etiopía expresó su preocupación en una reunión en la COP22: "Aunque nuestra contribución (al cambio climático) es insignificante, el impacto que nos ha provocado es muy alto, y estamos aquí juntos para asegurar que tenemos algo que decir respecto a nuestro futuro".

Ya emitieron en la COP21 el Comunicado de Manila, en el que pedían que la meta climática estuviera en los 1,5 °C. En él los líderes de los países del CVF emitieron de forma conjunta una declaración histórica llamando a la descarbonización total de la economía mundial, el 100% del uso de energía renovable y cero emisiones para 2050, con el fin de conseguir mantener al mundo por debajo de los 1,5°C de calentamiento.

El gran problema, es que el calentamiento global alcanzó ya en 2015 1°C por encima de los niveles preindustriales (*Figura 2.5*). Siendo esta una señal de que el tiempo se está agotando para poder llevar a cabo esa reducción de emisiones lo suficientemente rápido como para lograr mantener el calentamiento por debajo de los 2°C para el 2100, y aún más difícil por tanto, por debajo de los 1,5°C.

3. MODELOS PARA LA INVESTIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En este capítulo se introducen los modelos que se emplean en la investigación sobre el cambio climático. A continuación el capítulo se centra más en los modelos IAM (Modelos de Evaluación Integrada), debido a su relación más directa con el presente trabajo ya que los módulos climáticos integrados en MEDEAS se extraen de ese tipo de modelos (FREE y DICE) y el propio modelo MEDEAS lo es también. Después, se describe brevemente el modelo climático simple MAGICC debido a que se emplea en el modelo de C-ROADS para las calibraciones y el cálculo del forzamiento radiativo, siendo un modelo importante en el análisis del cambio climático. Por último, se describen los escenarios del IPCC que son ampliamente utilizados en los modelos.

3.1. Introducción.

El IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) publicó ya en 1995 la conclusión de que las tendencias climáticas recientes no se pueden atribuir completamente a fuerzas naturales. Esto creó un sentido de urgencia entre los científicos y las partes implicadas. Además, muchas de las discusiones en las COP sobre la respuesta política se centran en los costes de mitigación. Comparativamente, se posee menos información sobre los beneficios de los impactos que se consiguen evitar, incluyendo aquí las opciones de adaptación. [24]

Aquí entra la necesidad de modelos que ayuden a proyectar la evolución del cambio climático y a evaluar los impactos que derivan de él. En este entorno de aplicación los modelos se pueden clasificar en cuatro tipos:

1. **Modelos climáticos.** (GCM, Global Circulation Models). Estos son modelos numéricos muy complejos que modelan con gran nivel de detalle los procesos físicos en la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie terrestre, pero sin considerar la parte humana. Por ello, necesitan utilizar escenarios/proyecciones exógenas de emisiones de GEI. Actualmente son las herramientas más avanzadas disponibles para simular la respuesta al aumento de las concentraciones de GEI del sistema climático.
2. **Modelos climáticos simples.** En este caso este tipo de modelos se diseñan con el fin de que capturen las ideas clave de los GCM pero a la vez que sean lo suficientemente simples, buscando la rapidez y facilidad a la hora de utilizarlos. Es decir, no modelan todos los procesos sino que replican los resultados de los GCM. Dentro de este tipo de modelos se incluyen el modelo MAGICC y el C-ROADS.
3. **Modelos de evaluación integrada (IAM).** Estos modelos integran diversas disciplinas no sólo la climática. Incluyen, por tanto, representaciones del clima de otros modelos climáticos simples, y también modelando la parte “humana” (economía, población, tecnología, etc.). Gracias a esa integración, los IAM pueden aportar escenarios de emisiones de GEI a otros modelos climáticos. Aquí se incluyen FREE, DICE y MEDEAS.
4. **Modelos IAV.** Son modelos creados para la investigación y modelado de impactos, adaptación y vulnerabilidad.

A continuación se representa un esquema de todo lo anterior explicado, en el que se pueden apreciar las relaciones entre los distintos tipos de modelos (*Figura 3.1*):

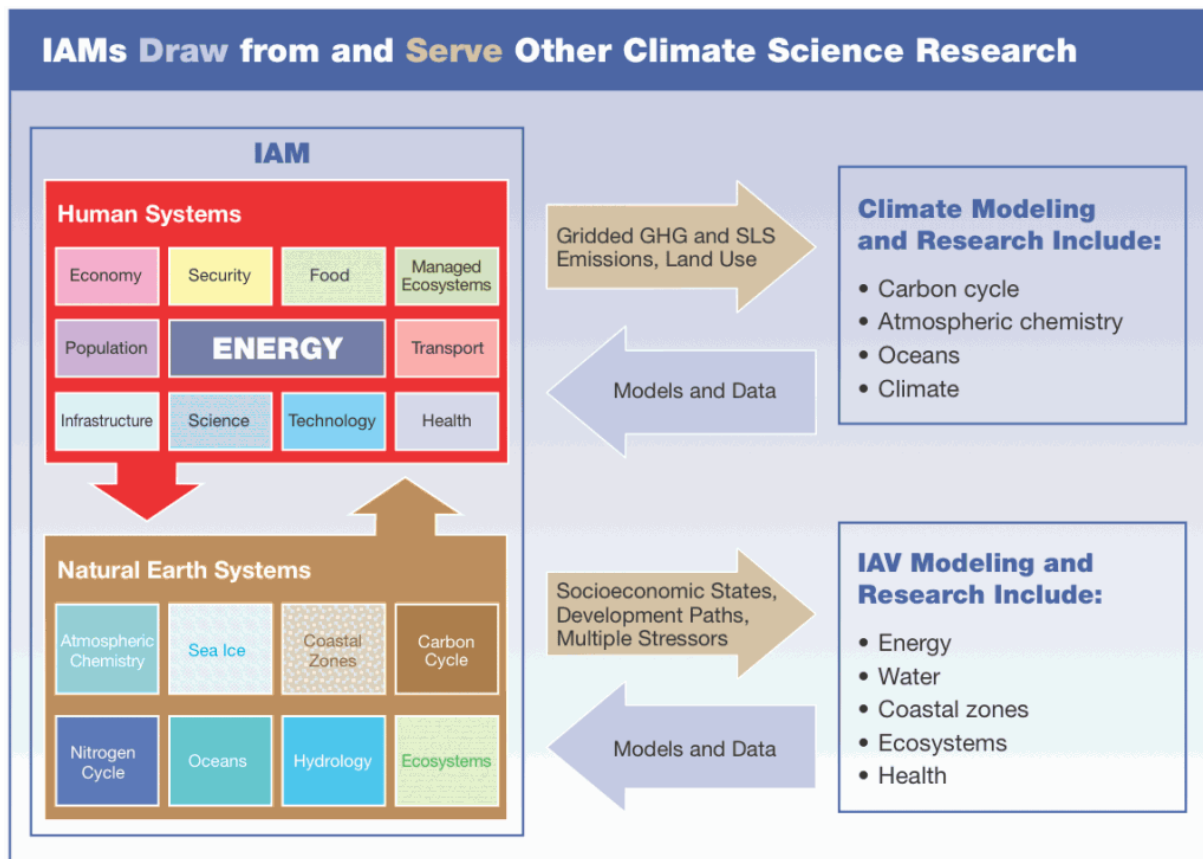


Figura 3.1: Esquema simplificado de las entradas y salidas de los IAMs. Estos usan datos y a la vez se emplean en el modelado e investigación de IAV (Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad), y en el modelado climático. Fuente: IAMC (Integrated Assessment Modeling Consortium) [25].

3.2. IAM (Modelos de Evaluación Integrada)

El cambio climático es uno de los problemas ambientales mundiales más complicados. Por la naturaleza misma de este, la investigación debe ser interdisciplinaria. Desde su empleo en los debates sobre políticas de mitigación y en la investigación del cambio climático, los resultados de los **IAM (modelos de evaluación integrada)** han atraído considerable atención, debido a que estos incluyen una amplia gama de enfoques de investigación y disciplinas. De hecho, las conclusiones de los informes de evaluación del IPCC se extraen sustancialmente de numerosos IAM.

3.2.1. Introducción a los IAM

La evaluación integrada posee dos características principales:

- Pretende proporcionar información de uso importante en lugar de simplemente avanzar en la comprensión del tema.
- Reúne un conjunto más amplio de áreas, métodos, estilos de estudio o grados de certeza, que caracterizarían típicamente un estudio de la misma cuestión dentro de los límites de una sola disciplina de investigación.

La evaluación integrada cuando se aplica en concreto al cambio climático, en general se concentra en la integración de proyectos y modelos. Por ejemplo, existen varios tipos de estudios de componentes que se integran como **módulos** en estudios de evaluación integrada. Entre ellos figuran los modelos económico-energéticos, algunos de los cuales se han aplicado recientemente al cambio climático para estudiar las consecuencias

económicas de las medidas de limitación de emisiones; modelos de química atmosférica o ciclos biogeoquímicos; impuestos, objetivos de emisión u otras medidas para limitar las emisiones de CO₂.

Las contribuciones de cada disciplina en un IAM dependen de las representaciones matemáticas de ciertas relaciones que intervienen en el cambio climático; los componentes se vinculan a través de una plataforma de modelado unificada, es decir, los módulos funcionan de manera integrada en lugar de tomar entradas exógenas de otros modelos. En particular, los IAM de cambio climático suelen incluir componentes socioeconómicos, así como componentes de ciencias naturales (por ejemplo, el ciclo de carbono). Los vínculos clave en los IAM son las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) en los sistemas climáticos y los impactos del cambio climático en los sistemas socioeconómicos. Los resultados de los IAM son resultados de simulación numérica basados en suposiciones, datos históricos y diseños de escenarios (Figura 3.1).

Es necesario añadir que un IAM bien desarrollado por lo general ha sufrido revisiones, mejoras y recalibraciones con el tiempo. Estos deben estar sujetos a revisiones constantes y críticas por los expertos y modeladores de IAM. [26]

Clasificación de los IAM.

Los IAMs se dividen en dos grandes clases: modelos de optimización de políticas y modelos de evaluación de políticas [27]. Los primeros optimizan variables clave de control de políticas tales como las tasas de control de emisiones de carbono o impuestos sobre el carbono, dadas las metas políticas formuladas (por ejemplo, maximizar el bienestar o minimizar el coste de cumplir con una meta de emisión o concentración de carbono). Por otro lado, los modelos de evaluación de políticas proyectan las consecuencias físicas, ecológicas, económicas y sociales de políticas específicas.

Los modelos de **optimización de políticas** pueden dividirse en tres tipos principales:

- 1) Modelos de *coste-beneficio*, que tratan de equilibrar los costes y beneficios de las políticas climáticas. Por ejemplo, se equilibran los costes que supone controlar las emisiones de gases de efecto invernadero frente a los de adaptarse a cualquier cambio climático.
- 2) Modelos basados en *objetivos*, que optimicen las respuestas, teniendo en cuenta los objetivos de emisiones o los efectos del cambio climático.
- 3) Modelos basados en la *incertidumbre*, que se ocupan de la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre.

Por otro lado, los modelos de **evaluación de políticas** incluyen:

- a) Modelos de proyección *deterministas*, en los que cada entrada y salida toma un solo valor.
- b) Modelos de proyección *estocásticos*, en los que al menos algunas entradas y salidas adoptan un rango de valores.

Cada enfoque tiene fortalezas y debilidades y produce ideas particulares sobre el cambio climático y las posibles respuestas políticas a la misma. Algunos de los modelos más avanzados se pueden utilizar para varios propósitos.

3.2.2. Diseño de los IAM

A la hora de llevar a cabo el diseño de un modelo de evaluación integrada es necesario tener en cuenta dos tipos de cuestiones. La primeras son generales,

incluyendo quienes serán los que hagan uso de la información que proporcione el modelo, y cómo debe estar limitado y organizado. Las otras cuestiones son claves a la hora de representar componentes particulares del cambio climático. [1]

Finalidad, diseño y otras cuestiones de gran escala

Estas son características y cuestiones inherentes a todos los proyectos de evaluación integrada. Se incluyen:

- a) **Audiencia, Propósito y Relación.** Es necesario hacer coincidir la evaluación con su audiencia y el propósito al que pretende servir.
- b) **Alcance.** Determinar las dimensiones necesarias de la evaluación.
- c) **Flexibilidad, abstracción y accesibilidad.** Diseño que permita incorporar y actualizar la información.

Componentes en la evaluación integrada para el cambio climático.

A continuación se resumen las cuestiones clave que incluye la evaluación integrada para el cambio climático en concreto:

1. **Rutas de Emisiones Futuras.** El futuro cambio climático depende de la trayectoria futura de las emisiones mundiales, las cuales son necesarias proyectar. Los métodos utilizados para ello se dividen en tres categorías:
 - a. *Especificación externa de los escenarios de emisiones.* Pueden extraerse de otros estudios o de fuentes como el IPCC.
 - b. *Representación detallada de las tecnologías.* A menudo este enfoque del modelado es denominado “bottom-up”. Se especifica la situación actual y futura de la tecnología (incluido su coste, eficiencia y emisiones de GEI).
 - c. *Modelización económica agregada.* Modelado económico proyectando emisiones futuras como el resultado de relaciones de producción específicas, preferencias y crecimiento.

También es posible mezclar estos tres enfoques. Por ejemplo, se pueden modelar las emisiones de CO₂, y a la vez emplear escenarios para otros gases.

2. **El cambio tecnológico.** Es un poderoso determinante de las rutas de emisiones a largo plazo. Contribuye a cambios fundamentales en la sociedad, pero su extensión y carácter son prácticamente imposibles de predecir.

Debido a que la evolución de la tecnología no está bien integrada en la teoría económica, los modelos existentes tratan la tecnología como una tendencia autónoma que influye en la eficiencia energética o los costes de producción, eliminando así el bucle de retroalimentación positiva que proviene de la evolución de la tecnología a partir de la investigación y el desarrollo y la acumulación de la experiencia. Para compensar esta omisión, los modeladores realizan simulaciones de sensibilidad a través de un rango de escenarios.

3. **Crecimiento de la población.** Es otra variable que influye mucho en las proyecciones de emisiones junto con el cambio tecnológico. Esto se debe porque a largo plazo el crecimiento demográfico impulsa las emisiones globales de GEI. Sin embargo, hay poco conocimiento sobre cómo será su evolución futura, por ello, normalmente se emplean escenarios externos de tasas de crecimiento de la población.
4. **Uso de la tierra.** Es importante por dos razones: los cambios antropogénicos en el uso de la tierra (como la deforestación y la agricultura), y por otro lado, el cambio en la

idoneidad de las tierras para usos particulares con los efectos que influyen en el bienestar humano y en cambios en los patrones de uso, son fuerzas motrices importantes en el cambio ambiental.

5. **Atmósfera y Océanos.** Se trata de representaciones de forma simplificada del sistema atmósfera-oceano. Cualquier intento de una representación detallada de este sistema en un proyecto de IAM hace que este componente sea, con mucho, la pieza más exigente desde el punto de vista computacional.

Se suele enfocar a partir de la vida atmosférica de los gases y su contribución a los cambios en el forzamiento radiativo, el balance energético global y el retraso que precede el cambio de temperatura (ya en estado de equilibrio). De esta forma, el cambio en el forzamiento radiativo o el cambio en la temperatura global promedio se utiliza para dirigir una función de daño o impacto.

6. **Impactos Ecológicos.** Incluye los cambios en la localización y las propiedades de los ecosistemas. Las respuestas de los ecosistemas al cambio climático y los cambios en las concentraciones de GEI pueden ser de dos tipos: las plantas existentes pueden cambiar su funcionamiento (productividad y ciclo de nutrientes), y por otro lado, también se puede modificar la distribución espacial de las especies. Actualmente esta cuestión se encuentra en una etapa temprana de investigación.

7. **Impactos Socioeconómicos.** Se trata de encontrar estimaciones del valor de los cambios inducidos por el clima en las personas, centrándose en los impactos que son más fáciles de determinar. Se suelen dividir estos impactos en impactos de mercado (economía) y de no mercado, siendo estos últimos más difíciles de proyectar (por ejemplo, cambios en la salud y el bienestar).

8. **Tratamiento de la Incertidumbre.** Incluye el conocimiento, incertidumbre y la comunicación de la información. Es básico reconocer el estado actual del conocimiento que pueda ser relevante para cuestiones políticas.

Especificar un conjunto de escenarios futuros es una manera simple de presentar la incertidumbre (abarcando un rango de posibles "futuros"). Por otro lado, un método más sistemático sería el análisis de sensibilidad. Sin embargo, el enfoque más completo involucra la especificación de distribuciones de probabilidad.

9. **Tasa de descuento.** Constituye una evaluación de los cambios futuros relativos a los actuales. Esta compensación se formula normalmente como una tasa de descuento: una tasa constante por año en la que las personas reducen las ganancias o pérdidas futuras en relación con las ganancias o pérdidas actuales. La elección de una tasa de descuento afecta de manera decisiva las decisiones óptimas. Los resultados básicos son los siguientes:

- a. Los resultados más allá del año 2100 son completamente intrascendentes para la toma de decisiones en el período presente, a menos que se utilicen tasas de descuento muy bajas.
- b. La plena importancia de la preocupación por el futuro sólo puede reflejarse en modelos que se optimizan dinámicamente a través del tiempo, en los que una mayor preocupación por el futuro podría conducir a cambios sustanciales en el comportamiento hoy en día equivalentes a aumentos repentinos de la tasa de ahorro.

10. **Resolución.** Se trata del desafío de combinar, reconciliar y divulgar la información disponible en diversas escalas espaciales y temporales. El problema ocurre al integrar la información entre disciplinas. Por ello, es necesario adaptar y ajustar las

escalas, implicando a veces importantes dificultades técnicas. Por ejemplo los modelos de energía pueden ser proyectados en un intervalo de tiempo de varios años, mientras que la química atmosférica tiene lugar rápidamente a pequeña escala.

11. Representación de políticas. Es necesario evaluar las posibles opciones de respuesta. Las clases de respuestas políticas potenciales para el cambio climático son:

- a. *Mitigación.* Medidas de reducción de las emisiones contribuyentes.
- b. *Adaptación.* Medidas para reducir las pérdidas asociadas a un cambio climático
- c. *Geoingeniería.* Alteración del sistema climático para compensar los cambios causados por el aumento de las emisiones.

La mayor parte de la atención se ha dedicado hasta ahora a la mitigación, menos a la adaptación, y menos aún a la geoingeniería. Los IAM pueden optar por representar cualquiera o todos ellos.

12. Incorporación de los procesos políticos y la negociación. Un IAM está generalmente dirigido a una audiencia que es la responsable de tomar decisiones sobre la gestión del riesgo del cambio climático. Pero un solo gobierno no es capaz de manejar este asunto. Por ello, las decisiones y comportamientos de otros (distintos de aquellos a los que se dirige el estudio) afectan el cambio climático.

3.2.3. Ejemplos de modelos IAM

En este apartado, se enumeran las principales características de los proyectos más importantes de evaluación integrada y modelización del cambio climático. Seguidamente, se describen de forma resumida los modelos FREE y DICE debido a su relación más directa con el presente trabajo.

A continuación se presenta una lista de los IAM (Modelos de Evaluación Integrada) más usados en la siguiente *Tabla 3.1* [28]:

Nombre del modelo	Autor	Tipo	Ámbito
AIM	Morita et al. (1994)	Evaluación	Clima, agua, agricultura, contaminación, socioeconómico.
DICE	Nordhaus, W. D. (1994)	Optimización	Capital, carbono, clima, población.
FREE	Fiddaman, T.S. (1997)	Optimización	Energía, economía, clima, carbono.
ICAM	Dowlatabadi & Morgan (1995)	Evaluación	Clima, energía, economía.
IMAGE	Alcamo (1994)	Evaluación	Uso de la tierra, clima, energía, nivel del mar.
MiniCAM	Edmonds et al. (1994, 1996a)	Optimización y Evaluación	Energía, economía, agricultura, clima, uso de la tierra.
RICE	Nordhaus & Yang (1996)	Optimización	Versión regional del modelo DICE.
TARGETS	Rotmans et al. (1994, 1997b)	Evaluación	Población, energía, uso de la tierra, agua, economía.

Tabla 3.1: Lista de los IAM (Modelos de Evaluación Integrada) más usados.

3.2.3.1 DICE

El modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía (DICE, Dynamic Integrated model of Climate and Economy), desarrollado por William Nordhaus [3], es un modelo integrado dinámico del cambio climático, que representa sus aspectos económicos, políticos y científicos. En contraste con el modelo RICE, el DICE es un modelo agregado global.

Este modelo considera la economía del cambio climático desde la perspectiva de la *teoría neoclásica* del crecimiento económico. Desde este enfoque, las economías realizan inversiones en capital, en la educación y en las tecnologías, reduciendo así el consumo actual, 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 capital natural negativo y las reducciones de emisiones como inversiones que aumentan la cantidad de capital natural (o reducen el capital negativo). Al destinar la producción a reducciones de emisiones, las economías reducen el consumo actual, pero previenen un cambio climático nocivo desde el punto de vista económico y, por lo tanto, aumentan las posibilidades de consumo en el futuro.

En la siguiente *Figura 3.2* se muestra el diagrama de flujo de los módulos principales que contiene la estructura del modelo DICE:

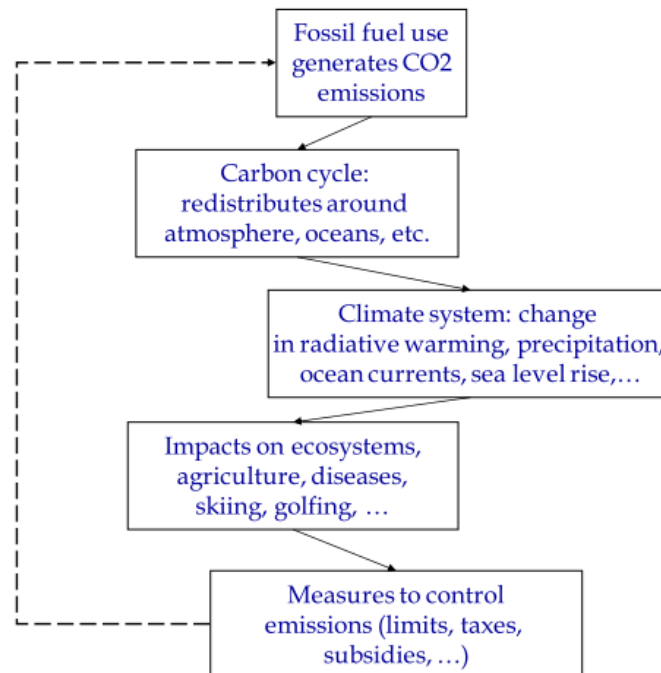


Figura 3.2: Diagrama de flujo de la estructura del modelo IAM DICE. Fuente: DICE 2013. [3]

Los modelos DICE / RICE están diseñados principalmente como modelos de optimización de políticas, aunque también pueden funcionar como simples modelos de proyección. En ambos modos, el enfoque es maximizar una función objetivo económica. Esta función objetivo representa la meta implícita en el problema, y se refiere al bienestar económico asociado con un escenario de consumo.

El uso de la optimización puede interpretarse de dos maneras. Primero, desde un punto de vista positivo, la optimización es un medio de simular el comportamiento de un sistema de mercados competitivos; y, segundo, desde un punto de vista normativo, es un posible enfoque para comparar el impacto de escenarios o políticas alternativas sobre el bienestar económico.

3.2.3.2 FREE

El modelo FREE (Feedback-Rich Energy-Economy) de Fiddaman [29] es un modelo integrado de clima y economía que incorpora varias características importantes que no eran abordadas por otros modelos. Éstas incluyen:

- Un sistema de economía-energía desequilibrado, con ajustes y retrasos, representación de las necesidades de energía en el capital y agotamiento de los recursos.
- Cambios tecnológicos endógenos y otros efectos de retroalimentación positiva.
- Reglas de comportamiento explícitas, en lugar de la optimización simple, para la toma de decisiones,
- Separar la búsqueda de políticas sociales óptimas de los ahorros, asignación de factores y otras decisiones.
- Un enfoque equitativo para la valoración de los impactos a través del tiempo.

De esta forma, la mayoría de la estructura es endógena. La generación de las salidas económicas, la inversión, la oferta y la demanda de energía, el agotamiento, y el desarrollo de la tecnología energética están estrechamente acoplados entre sí. Las políticas de impuestos sobre el carbono y la energía se formulan como reglas de control de retroalimentación endógena, en lugar de entradas exógenas.

Para facilitar la exploración de estas nuevas estructuras, otros aspectos del modelo siguen siendo simples. No contiene desagregación regional o sectorial (excepto en el sector energético) y utiliza modelos simples del clima y el ciclo de carbono. Con los parámetros apropiados, el modelo podría parecerse a los modelos neoclásicos más simples. El modelo se puede dividir en nueve subsistemas [30]. La *Figura 3.3* ilustra los nueve módulos y sus relaciones:

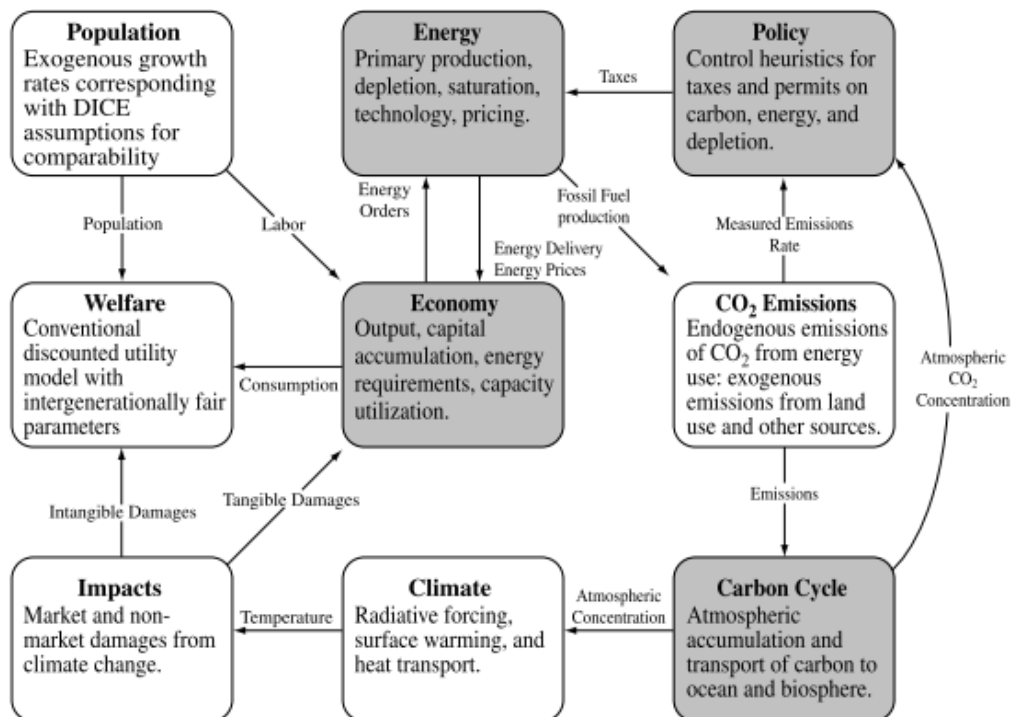


Figura 3.3: Diagrama de los sectores que incluye FREE. Fuente: Fiddaman 2002 [30]

El proceso de refuerzo de la acumulación de capital impulsa el crecimiento

económico (aumentado por la población exógena y el crecimiento de los factores de productividad). El cambio climático actúa como un lazo de equilibrio débil que restringe el crecimiento. La actividad económica requiere entradas energéticas; lo que conduce a las emisiones de carbono.

Las emisiones aumentan la concentración de CO₂ en la atmósfera, causando que la temperatura aumente. A medida que aumenta la temperatura global, los daños causados por el cambio climático reducen la producción económica y la desvían de otros fines, reduciendo el crecimiento.

Los sectores de la energía y la economía interactúan a través del intercambio de bienes para la energía. En el sector de la energía, el aprendizaje y el agotamiento impulsan los costes de producción de energía. Los impuestos y los permisos elevan los precios de la energía de carbono en respuesta a las emisiones de CO₂ y las concentraciones atmosféricas.

3.3. MAGICC. Modelo climático simple

El modelo para la Evaluación del Cambio Climático Inducido por Gases de efecto invernadero (MAGICC, Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change) es un modelo del clima de complejidad simple/reducida usado en numerosos IAM. MAGICC fue desarrollado originalmente por Tom Wigley (Centro Nacional de Investigación Atmosférica, Boulder, EE.UU., y Universidad de Adelaida, Australia) y Sarah Raper (Manchester Metropolitan University, Reino Unido) a finales de 1980 y continuamente se ha ido mejorando desde entonces. Ha sido uno de los modelos climáticos ampliamente utilizados en varios informes de evaluación del IPCC. La última versión, MAGICC6 [31], es co-desarrollada por Malte Meinshausen (Instituto Potsdam para la Investigación del Impacto Climático, Alemania, y la Universidad de Melbourne, Australia).

Los diferentes módulos que contiene este modelo se pueden ver en la siguiente *Figura 3.4*:

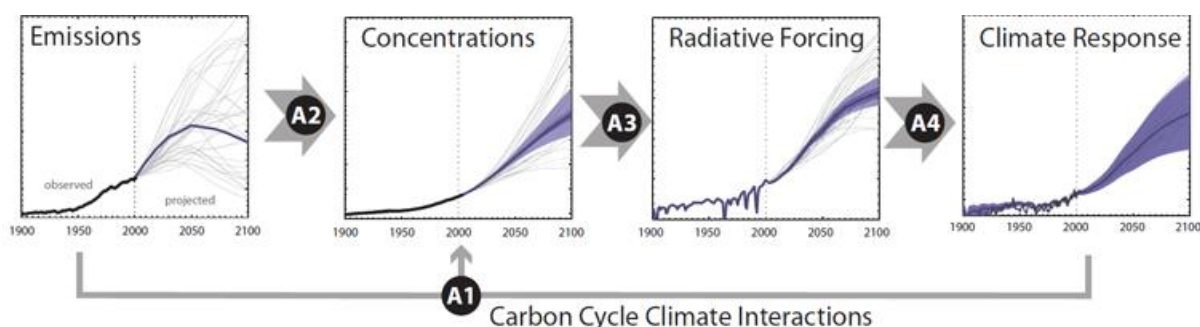


Figura 3.4: Esquema general de los cálculos que realiza MAGICC que muestran los pasos clave desde las emisiones hasta las respuestas climáticas globales. Fuente: Meinshausen et al. 2011.

Mientras que MAGICC está diseñado para proporcionar la máxima flexibilidad con el fin de coincidir con los diferentes tipos de respuestas observadas en modelos más sofisticados y muy complejos, como lo son los modelos de circulación general de atmósfera-oceáno (AOGCM, Atmosphere-Ocean General Circulation Models), el enfoque en el desarrollo del modelo MAGICC siempre ha sido derivar las ecuaciones simples tanto como sea posible de los principales procesos físicos y biológicos. En otras palabras, MAGICC es tan simple como sea posible, pero tan mecanicista como sea necesario. Este enfoque basado en procesos tiene una fuerte ventaja conceptual en comparación con las estadísticas simples, que tienen más probabilidades de degradar rápidamente su

habilidad al emular escenarios fuera del espacio de calibración original de modelos sofisticados. [31]

MAGICC es utilizado por varios modelos de evaluación integrada IAM, incluyendo el grupo IMAGE, el modelo MESSAGE en IIASA, el modelo GCAM por el “Joint Climate Change Research Institute” en el “Pacific Northwest National Laboratory” y la Universidad de Maryland y varios otros. También se empleó para crear las concentraciones de GEI de referencia en el proceso de creación de las RCP para los informes de evaluación del IPCC. Además, en el simulador C-ROADS (utilizado en este trabajo) se incluye el modelo MAGICC proporcionando datos exógenos para calibración y para el forzamiento radiativo.

La última versión actualizada (MAGICC6) incluye una representación mejorada de las sensibilidades climáticas que varían en el tiempo, de las retroalimentaciones del ciclo de carbono, de los forzamientos radiativos de los aerosoles y de las características de la captación de calor por el océano.

3.4. Proyección de escenarios climáticos. Escenarios IPCC.

En la investigación y la evaluación del cambio climático, los escenarios se utilizan ampliamente en los modelos para explorar las consecuencias socioeconómicas y ambientales a largo plazo de las actividades humanas. Esto incluye el análisis de las futuras emisiones y el potencial de las políticas de mitigación, el modelado de las respuestas del sistema climático a las variaciones en la composición atmosférica y los estudios de los impactos del cambio climático, la adaptación y la vulnerabilidad. Los escenarios también desempeñan un papel clave en la transferencia de información a través de las diferentes comunidades de investigación relacionadas con estos temas. El desarrollo de escenarios es un ejercicio que requiere mucho tiempo.

Un ejemplo, es el Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) sobre escenarios de emisiones (SRES). Estos escenarios se publicaron en el año 2000, y en el informe se definieron cuatro familias de escenarios: A1, A2, B1 y B2. Cada una representa diferentes desarrollos demográficos, sociales, económicos, tecnológicos y ambientales. Las cuatro combinan dos conjuntos de tendencias divergentes: una que varía entre valores fuertes económicos y valores ambientales, y la otra entre globalización creciente y regionalización creciente (Figura 3.5) [32].

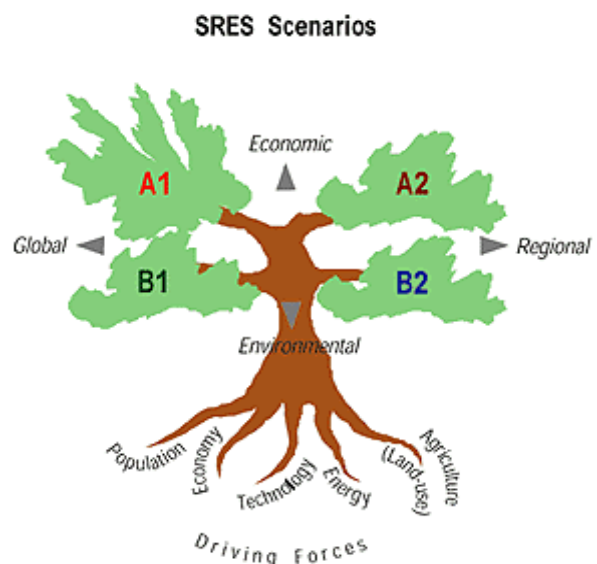


Figura 3.5: Ilustración esquemática de los escenarios SRES. [32]

Ya en 2006 se inició el desarrollo de nuevos escenarios, que comprenden dos elementos clave: 1. Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs, Representative Concentration Pathways), y 2. Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSPs, Shared Socio-economic Pathways).

Las RCP son el producto de una colaboración innovadora entre modeladores de evaluación integrada, modeladores climáticos, modeladores de ecosistemas terrestres y

expertos en emisiones. El producto resultante forma un amplio conjunto de datos con grandes resoluciones espaciales y sectoriales para el período que se extiende hasta 2100. Para la mayoría de las variables, las RCP cubren una amplia gama de la literatura existente. Además, las RCP se complementan con extensiones (Extended Concentration Pathways, ECP), que permiten realizar experimentos hasta el año 2300. [33]

En el proceso de desarrollo de estas proyecciones se establecieron los siguientes criterios, con la intención de facilitar la investigación y evaluación climática:

1. Deben basarse en escenarios publicados en la literatura existente, desarrollados independientemente por diferentes equipos y, en conjunto, ser "representativos" de la literatura total, en términos de emisiones y concentraciones.
2. Deben proporcionar información sobre todos los componentes del forzamiento radiativo que sean necesario para el modelado.
3. Las RCPs deben tener los mismos años de referencia para las emisiones y uso de la tierra, y permitir una transición suave entre datos históricos y futuros.
4. Deben abarcar el periodo hasta 2100, pero la información debe estar también disponible para siglos posteriores.

Respetando todo lo anterior, las trayectorias que se obtuvieron están basadas en escenarios independientes seleccionados de cuatro equipos/modelos individuales:

- RCP 2.6: PBL/IMAGE
- RCP 4.5: PNNL/MiniCAM
- RCP 6.0: NIES/AIM
- RCP 8.5: IIASA/MESSAGE)

Cada trayectoria se nombra de acuerdo con su nivel de forzamiento radiativo en 2100 (en W/m^2) tal como se puede observar en la *Figura 3.6*. Las estimaciones se basan en el forzamiento de gases de efecto invernadero y otros forzamientos, pero no incluyen los impactos directos del uso de la tierra (albedo) o el forzamiento del polvo mineral.

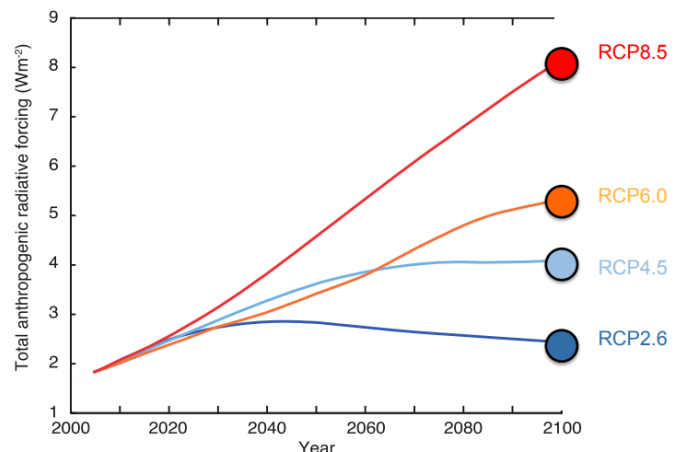


Figura 3.6: Forzamiento radiativo total para los cuatro escenarios RCP. Fuente: IPCC AR5 2013.

Comparando con la literatura, RCP8.5 debería considerarse como un escenario de altas emisiones, RCP6 puede interpretarse tanto como el término medio o bien como "algo de mitigación", RCP4.5 puede ser considerado también un escenario intermedio de mitigación pero algo más fuerte, mientras que finalmente RCP2.6 es representativa de los escenarios de mitigación más altos actualmente en la literatura.[33]

Por último, las RCP están diseñadas para servir como entradas en el desarrollo de nuevos escenarios para el quinto informe de evaluación del IPCC (AR5). Por ello, no son escenarios nuevos totalmente integrados, sino que son conjuntos de proyecciones de forzamiento radiativo. Hay que añadir también, q las RCP tampoco son pronósticos, ni límites o normativas, ya que no representan futuros específicos ante acciones políticas [34].

En definitiva, las RCP proporcionan un conjunto único de datos. Las fases siguientes

del proceso de desarrollo de nuevos escenarios se centran en la definición de un marco para supuestos socioeconómicos que guíen la mitigación, la adaptación y los análisis de impactos basados en las RCP. En este punto, aparecen las SSP.

Las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, Shared Socio-economic Pathways) proporcionan descripciones narrativas y cuantificaciones de posibles desarrollos de variables socioeconómicas (como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico y la tasa de cambio tecnológico) que caracterizan los desafíos para la mitigación y adaptación. Pueden identificarse cinco trayectorias distintas: SSP1 (desafíos bajos de mitigación y adaptación), SSP2 (desafíos intermedios), SSP3 (desafíos altos de mitigación y adaptación), SSP4 (desafíos de baja mitigación y alta adaptación) y SSP5 (desafíos de alta mitigación y baja adaptación) (Figura 3.7).

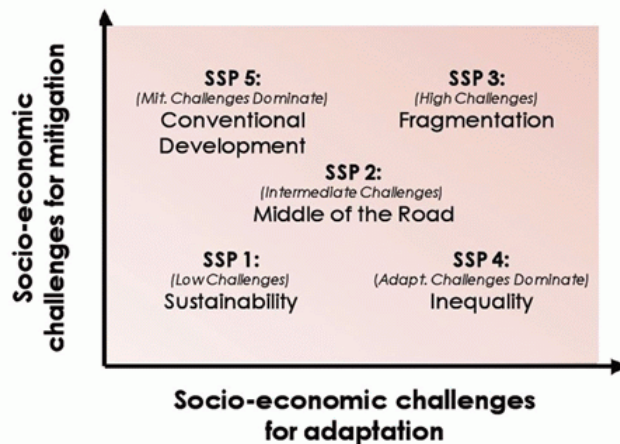


Figura 3.7: Las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP). Fuente: O'Neill et al. (2012).

Los RCP y SSPs pueden ser reunidos en una matriz bidimensional RCP / SSP. Aquí, cada célula describe una trayectoria plausible de emisiones y concentraciones que resulta en un nivel dado de forzamiento radiativo en 2100, que es consistente y está superpuesta a una trayectoria de desarrollo socioeconómico.

Esta matriz se describe en Vuuren et al. [35] y puede utilizarse para responder a cuestiones diversas sobre la investigación climática. La comparación de los escenarios en las columnas de la matriz puede ayudar a evaluar los costes y beneficios de las políticas de mitigación y adaptación para una trayectoria futura determinada de desarrollo socioeconómico. La comparación entre las filas de la matriz puede proporcionar ideas sobre cómo las diferentes condiciones socioeconómicas pueden influir en los impactos y las políticas climáticas (Figura 3.8).

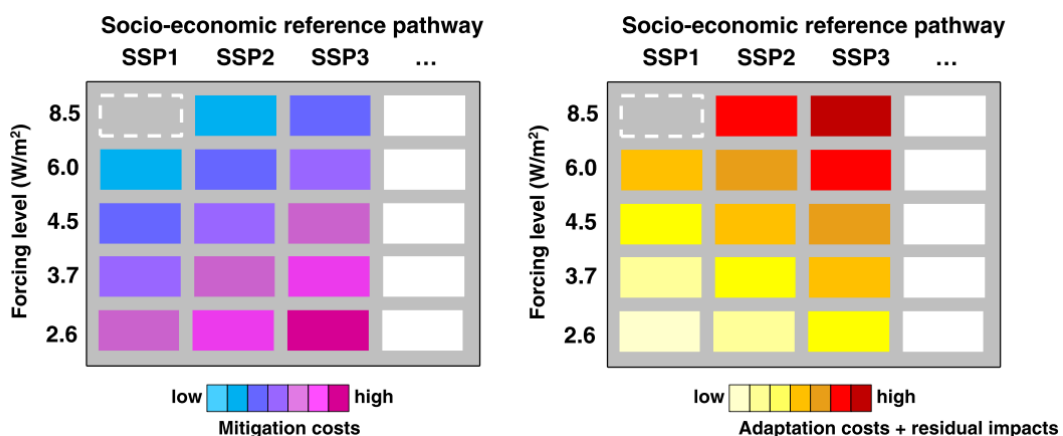


Figura 3.8: Ilustraciones de cómo se puede utilizar la matriz para estudiar el coste y los beneficios de la política climática (indicados por los diferentes colores). La celda vacía (líneas discontinuas) ilustra que no todas las combinaciones de RCP y SSP pueden ser consistentes. El nivel de 3.7 W/m² se ha añadido para ilustrar que también se pueden explorar otros niveles de forzamiento radiativo.

4. DINÁMICA DE SISTEMAS. VENSIM.

4.1. Introducción.

La dinámica de sistemas es una herramienta para analizar y diseñar políticas mediante la construcción de modelos de simulación. Utilizando datos y tecnología, la Dinámica de Sistemas modela las relaciones entre todas las partes de un sistema y cómo estas relaciones influyen en el comportamiento de ese sistema en el tiempo.

Se aplica a problemas dinámicos que surgen en sistemas complejos sociales, de gestión, económicos o ecológicos, es decir, cualquier sistema dinámico caracterizado por interdependencia, interacción mutua, retroalimentación y causalidad circular.

La dinámica de sistemas nació en el MIT Sloan (Management Sloan School) [36] en la década de 1950 y fue desarrollado por el profesor Jay W. Forrester. En su origen se creó para mejorar la comprensión de los procesos industriales.

El objetivo básico de la Dinámica de Sistemas es “llegar a comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema” [37]. Es útil a la hora de abordar problemas complejos, ya que la mente humana tiende a pensar en términos de relaciones causa-efecto, es decir, en términos lineales sin tener en cuenta las posibles retroalimentaciones que existen en el sistema. Esta visión en la que no hay principio o final es más realista, ya que un problema causa una acción que produce un resultado, que a su vez crea futuros problemas y acciones. (Figura 4.1).

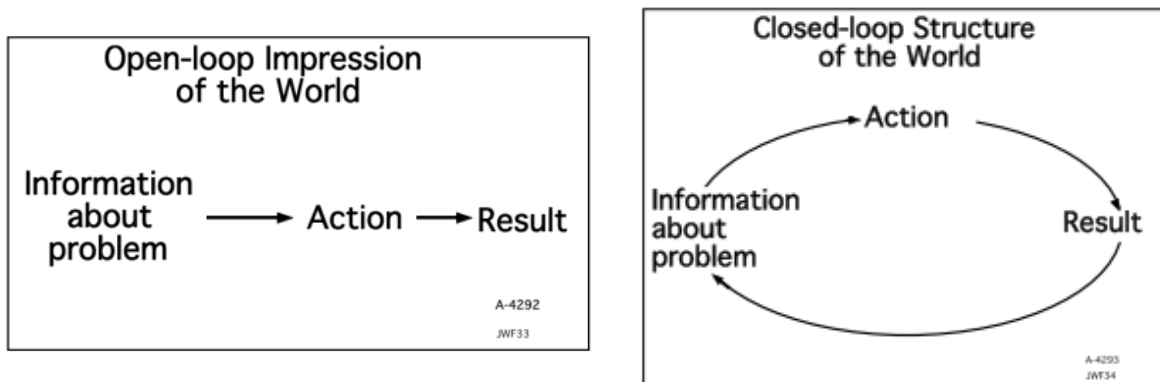


Figura 4.1: Problema lineal (imagen izquierda) frente a uno con realimentación más realista (imagen derecha). Fuente: Jay .W. Forrester [38]

Es necesario añadir que la Dinámica de Sistemas construye **modelos de gestión**, en los que se analiza qué alternativa es mejor, sin necesidad de alta precisión, ya que el fin último es la comparación. Por tanto, no se encarga de obtener datos precisos sobre el futuro (modelos de predicción).

Dentro de los diez primeros años del desarrollo de la Dinámica de Sistemas, el abanico de aplicaciones pasó de los problemas corporativos e industriales a la gestión de la investigación y el desarrollo, el estancamiento y la decadencia urbanos, los ciclos de las mercancías y la dinámica del crecimiento en un mundo finito.

Hoy en día, esta disciplina se enseña en todo el mundo y es utilizada por corporaciones en la toma de decisiones estratégicas y operativas, organizaciones, consultores, escuelas, y gobiernos para manejar desafíos que son complejos y orientarse en la toma de decisiones políticas.

4.2. Elementos básicos en Dinámica de Sistemas

En este apartado se explica la estructura básica empleada en el modelo en dinámica de sistemas. Se describen por tanto, los diagramas de influencia causa-efecto, las variables de estado “stock”, los flujos, las variables auxiliares y los retrasos. [37] y [39]

DIAGRAMAS CAUSALES

La retroalimentación (feedback) es uno de los conceptos centrales de la dinámica del sistema. Los diagramas de influencia, también denominados CLD (Causal loop diagrams), son una herramienta importante en la representación de estructuras de retroalimentación en los sistemas.

Consisten en variables conectadas por flechas que indican las influencias entre las variables. A cada enlace se le asigna una polaridad positiva (+) o negativa (-) para indicar cómo cambia la variable dependiente cuando cambia la variable independiente (*Figura 4.2*). Así, con el signo positivo, la variable *B* aumenta si *A* aumenta, eso quiere decir que si la causa aumenta el efecto también aumentará; de la misma forma, si *A* disminuye *B* también disminuirá. En cambio, si la polaridad es negativa ocurrirá exactamente lo contrario: si *A* aumenta *B* disminuye, y de igual forma si *A* disminuye *B* aumentará.



Figura 4.2: Representación de la polaridad de las flechas (izquierda: positiva, derecha: negativa).

Los bucles de realimentación, son cadenas cerradas de relaciones también llamadas lazos o feedback. El bucle puede ser positivo (R, refuerzo) o negativo (B, estabilizante) (*Figura 4.3*). El bucle es positivo cuando el número de relaciones negativas es par, en cuyo caso la realimentación refuerza el cambio inicial haciendo el sistema inestable. Por otro lado, cuando el número de relaciones negativas es impar, el lazo es negativo, y el bucle atenúa el cambio inicial.

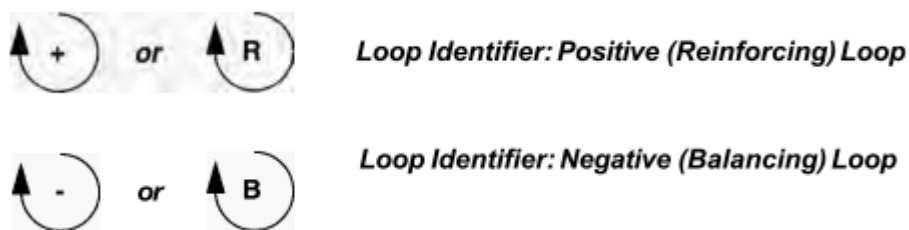


Figura 4.3: Los dos tipos de lazos o bucles (positivo y negativo).

Los lazos de refuerzo tienden a hacer el modelo inestable, mientras que los lazos estabilizantes llevan al modelo hacia la estabilidad. En los sistemas se dan lugar los dos tipos de lazos, y el comportamiento, por tanto, se determina a partir del dominante.

DIAGRAMA DE FLUJOS O FORRESTER

Los diagramas causales con bucles son muy útiles para representar las relaciones y las realimentaciones, por eso se utilizan en el comienzo de la construcción del modelo para representar en papel las relaciones mentales. Sin embargo tienen limitaciones, sobre todo a la hora de representar las variables estado o “stocks” y los flujos. Por ello, la Dinámica de Sistemas emplea un diagrama particular denominado Diagrama de Flujos,

que es la traducción del Diagrama Causal en el ordenador. La representación de cada variable se explica a continuación (Figura 4.4).

- 1) **VARIABLES DE ESTADO, “Stocks” o Niveles.** Son variables dinámicas (dependen del tiempo) que representan acumulaciones y caracterizan el estado del sistema. Se representan mediante rectángulos con el nombre de la variable en el interior.
- 2) **Flujos.** Son variables que causan la variación de los stocks y representan flujos de materia, energía o información. Pueden ser positivas (incrementan el stock) o negativas (disminuyen el stock). Se representan mediante una flecha que entra o sale del stock, en la que se incluye un símbolo de válvula.

Las fuentes o sumideros, que representan existencias indefinidas o fuera del modelo, se representan mediante una nube. Una fuente representa el stock desde el cual surge un flujo que se origina fuera del límite del modelo; los sumideros representan las existencias que se salen del límite del modelo. Se supone que las fuentes y sumideros tienen una capacidad infinita y nunca pueden restringir los flujos que soportan.

- 3) **VARIABLES AUXILIARES.** Comprenden el resto de variables o constantes que aparecen en el modelo. Se relacionan entre ellas y con las variables de flujo y stock, y son fundamentales para entender el modelo. Además, con frecuencia, el número de este tipo de variables es muy superior al de variables flujo o stock.

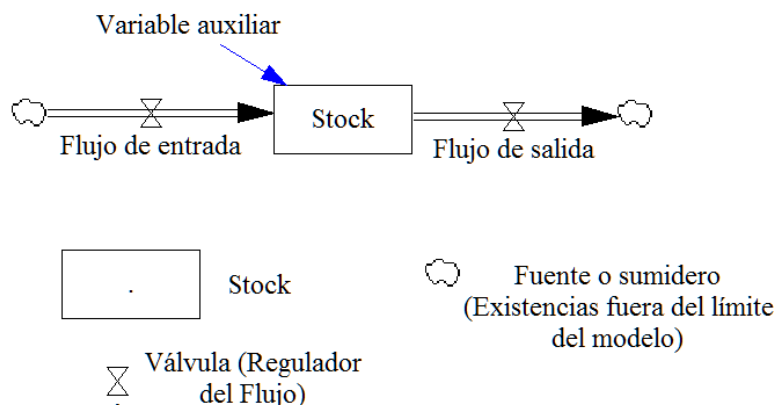


Figura 4.4: Estructura general en el diagrama de flujos.

Se explica ahora la **representación matemática** del diagrama. La cantidad de material en una variable stock es la acumulación de los flujos de entrada de material menos los flujos de salida de materia. Los stocks, por tanto, acumulan o integran los flujos. El flujo neto que entra en la variable stock es justamente la variación que sufre. Así, la estructura representada en la Figura 4.4 corresponde a la siguiente ecuación integral:

$$Stock(t) = \int_0^t [Flujo\ de\ entrada(s) - Flujo\ de\ salida(s)]ds + Stock(t_0) \tag{Ec. 4.1}$$

Por último, los **retardos, retrasos** o “**delays**”, son críticos en la dinámica de casi todos los sistemas. Por ello es necesario entenderlos y representarlos, ya que en ocasiones su comportamiento no es intuitivo. En general, un retardo es un tiempo de demora entre una acción y su efecto. La representación matemática de un retardo puro es la siguiente:

$$Salida(t) = Entrada(t - T), \quad \text{siendo "T" el retardo} \tag{Ec. 4.2}$$

4.3. Fases en el proceso de modelado

Un modelo es una representación simplificada o esquema de un sistema o de una realidad compleja. Aunque el proceso de construir un modelo (modelado) es creativo, todos siguen unas etapas que involucran las siguientes actividades [39]:

- 1) **Descripción y articulación del problema.** En este primer paso es necesario definir el problema o seleccionar el tema. También se eligen las variables clave del sistema y el horizonte temporal a considerar. Por último, hace falta tener una referencia del comportamiento histórico de las variables y cuál debería ser su comportamiento en el futuro.
- 2) **Formulación de una hipótesis o teoría sobre el comportamiento del sistema.** En este ya se realiza un enfoque endógeno, formulando las hipótesis que explican el comportamiento de las variables como consecuencias endógenas de la estructura de realimentación. Aquí ya se lleva a cabo la construcción del diagrama causal.
- 3) **Formulación de un modelo de simulación.** Se realiza con el fin de probar las hipótesis formuladas en la anterior etapa. Para ello hace falta estimar los parámetros y las condiciones iniciales.
- 4) **Análisis y test del modelo.** Se prueba el modelo hasta que sea adecuado para su propósito. Se le somete a pruebas de robustez y de sensibilidad con condiciones extremas e incertidumbres.
- 5) **Diseño y evaluación de las políticas de mejora.** En esta última etapa se diseñan los escenarios y políticas o nuevas reglas de decisión aplicables al modelo. De esta manera se evalúan los efectos de las políticas y su interacción.

Por último, es necesario añadir, que el proceso de modelado es un proceso de iteración, no una secuencia lineal de pasos. Los modelos pasan por una iteración constante, cuestionamiento continuo, pruebas y mejoras. Por ello, se puede volver hacia atrás en cualquier paso del modelado (Figura 4.5).

Por otro lado, los modelos también se retroalimentan con los modelos construidos en nuestra mente y con la información que recogemos en el mundo real, ya que todas las decisiones o estrategias pueden ser representadas y probadas en el mundo virtual del modelo. A su vez esta información que se obtiene a partir de las pruebas, influye de nuevo en nuestra forma de pensar. Esto se encuentra representado en la Figura 4.5.

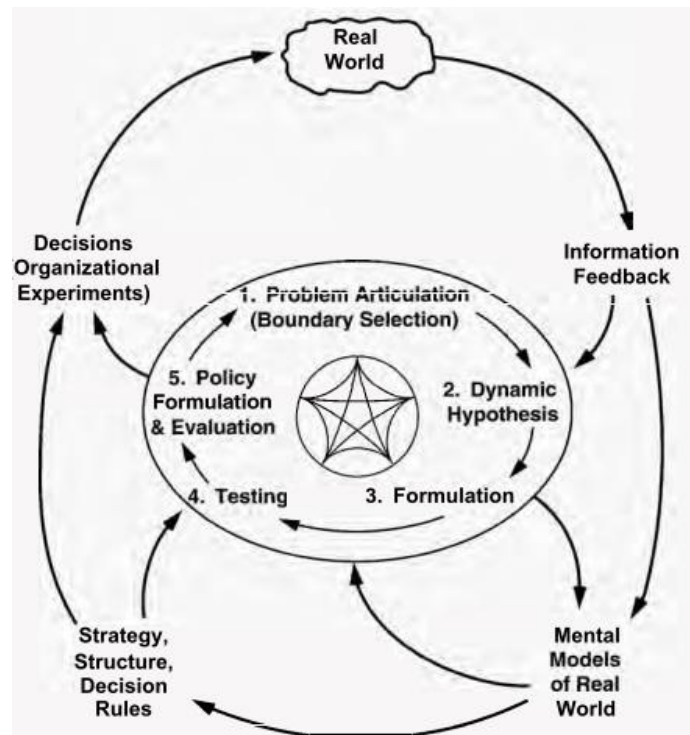


Figura 4.5: Proceso iterativo del modelado. Fuente: Serman [39].

4.4. Programa de simulación: Vensim

4.4.1. Introducción.

El programa empleado en el presente Trabajo Fin de Máster es el software Vensim. Es una herramienta gráfica de modelado que permite programar, simular, analizar y optimizar modelos de sistemas dinámicos [5]. Además proporciona la posibilidad de construir modelos de simulación de forma simple y flexible a partir de los diagramas descritos anteriormente en este capítulo (*Figura 4.4*).

Así, las fórmulas que se introducen y las relaciones entre variables representadas forman el modelo. Los experimentos o pruebas generan unos conjuntos de datos que son almacenados fuera del modelo, permitiendo esto hacer uso posterior de ellos.

Vensim posee tres configuraciones diferentes para instalar en el ordenador según las funcionalidades que se necesite. En este trabajo se emplea la versión DSS (Decision Support System), que aumenta la capacidad del modelo y proporciona herramientas para construir sistemas de apoyo a la toma de decisiones.

4.4.2. Características del modelado en Vensim

Las principales características del modelado en Vensim se presentan a continuación [5]:

1) Conceptos matemáticos.

Este programa ayuda a resolver problemas que serían difíciles de abordar matemáticamente sin la ayuda de la simulación. El formato que Vensim utiliza para ello se basa principalmente en la ecuación integral explicada arriba en este capítulo (*Ecuación 4.1*). Para esta cuestión Vensim ofrece varias opciones de integración:

- i. *Euler*. Lleva a cabo la integración de Euler. Es la solución más simple y rápida. Este es el método que se emplea en el presente trabajo.
- ii. *Diff*. Realiza la integración de Euler pero almacena los valores de las variables auxiliares en un paso anterior. Se utiliza principalmente para las ecuaciones en diferencia.
- iii. *RK4*. Realiza la integración Runge-Kutta de cuarto orden. Se utiliza para la obtención de una respuesta precisa. Dentro de este método de integración hay otras cuatro opciones entre las que elegir.

2) Secuencia computacional. Vensim utiliza la estructura causal para determinar la secuencia apropiada de cálculo. Los pasos que realiza para simular un modelo cambian según el método de integración. Para Euler son los siguientes:

- i. *Preparación*. Todas las Constantes se ajustan a los valores especificados para ellas y se procesan todos los cambios y las referencias de hojas de cálculo. De esta forma, se leen todos los datos, los valores cargados y las ecuaciones calculadas. Al final de la preparación, todas las Constantes tendrán valores asignados.
- ii. *Inicialización*. Al final de la inicialización todas las variables “stock” o “niveles” en el modelo tendrán valores. En el proceso de cálculo de estos valores, algunas variables auxiliares también pueden tener valores asignados.
- iii. *Cálculo de variables auxiliares*. Se calcula mirando su ecuación.
- iv. *Almacenamiento de los resultados*. Se almacenan los valores de las

variables “stock” y las auxiliares que resultan de esas variables stock.

- v. *Cálculo de la Tasa Neta.* Se calcula la tasa neta de cambio para cada variable stock en el modelo.
- vi. *Integración.* Para la integración con Euler, los resultados del paso 5 se multiplican por el TIME STEP (definido al comienzo de crear el modelo) y se añaden a los valores de los niveles.
- vii. *Continuación.* Los pasos 3, 4, 5 y 6 se repiten hasta que el tiempo llega a FINAL TIME.

3) **Ecuaciones.** En Vensim se puede definir el modelo escribiendo un conjunto de ecuaciones y expresiones matemáticas. En la ecuación se muestra cómo la variable depende de otras variables especificando también otras informaciones importantes. Es fácil de introducir todo esto en el modelo mediante el “Editor de ecuaciones” (Figura 4.6).

Así, se puede especificar para cada variable las unidades de medida, el rango de valores mínimos y máximos esperados, un comentario con la descripción de la variable, y el grupo al que se desea asociar la variable.

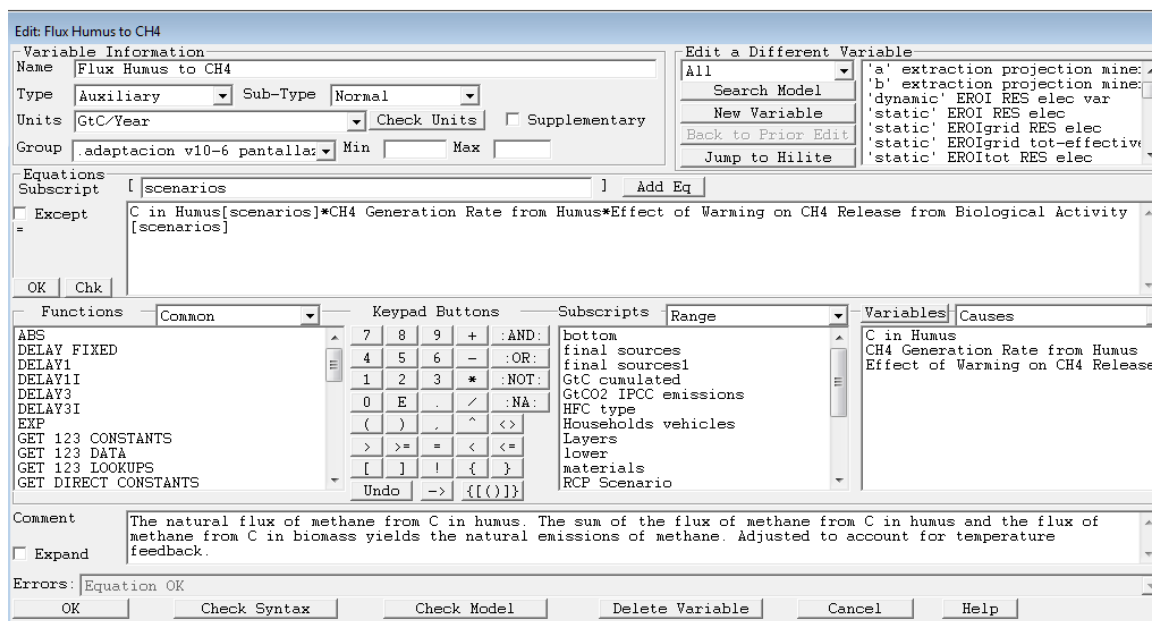


Figura 4.6: Editor de ecuaciones en el programa Vensim.

4) **Interfaz del Usuario.** Vensim proporciona un conjunto de herramientas para el usuario que se utilizan para construir, ejecutar y analizar modelos. La ventana principal de Vensim es el “Workbench” o “Banco de Trabajo”, que incluye la barra de título, el menú, la barra de herramientas y las herramientas de análisis (Figura 4.7).

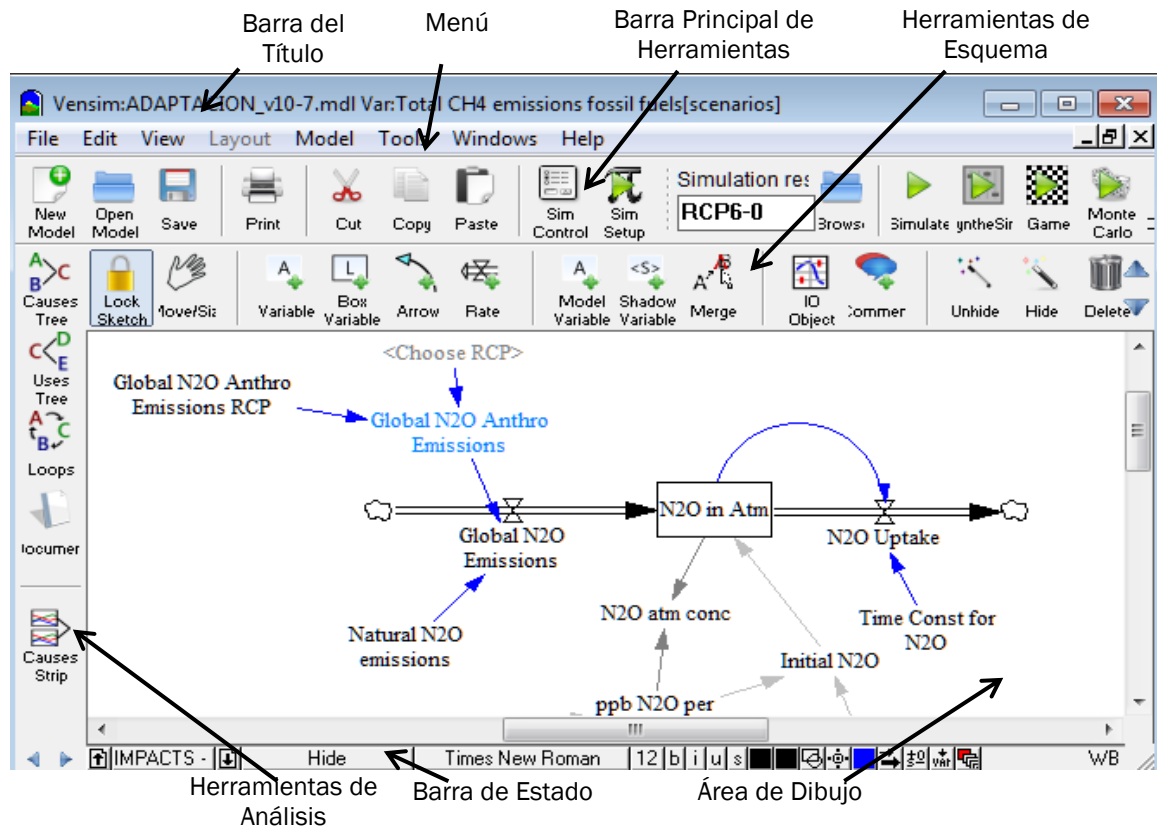


Figura 4.7: Interfaz del usuario en Vensim. Ventana principal.

- 5) **Control de subíndices.** Se emplea esta opción en la versión DSS utilizada en este trabajo. Denominado “Subscript Control” en el programa, es útil para añadir un vector a una variable, de tal forma que por ejemplo, a la hora de definirla, se pueda agregar una ecuación o valor diferente a cada posición del vector. Así se puede enfocar el modelo en uno o más rangos que se indique. Se emplea, sobre todo, al definir escenarios, dando la opción a escoger de qué escenario ver los resultados de la simulación o bien su representación gráfica. (Figura 4.8)

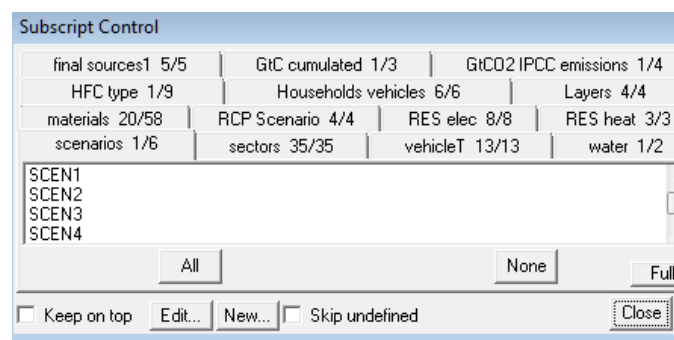


Figura 4.8: Control de subíndices en Vensim. Ejemplo con escenarios.

6) **Análisis y Simulación. Gráficas y tablas.**

Una vez construido el modelo y siempre que se desee, se puede analizar su estructura mediante los “Tree Diagrams” (a la izquierda en la Figura 4.7).

Posteriormente, se realiza la simulación para ver el comportamiento dinámico del modelo. La forma más fácil para hacerlo es pulsando el botón “Simulate” de la barra principal de herramientas, dando nombre antes al archivo donde se guardarán los

datos de esa prueba o simulación.

Una vez que se ha simulado el modelo, se puede examinar su comportamiento en más detalle empleando las herramientas de análisis, que pueden ser gráficas o tablas. Vensim permite almacenar todo el comportamiento dinámico de las variables del modelo, así como visualizarlo en cualquier momento, incluso representar más de una prueba o experimento a la vez pudiendo así compararlos. Estas opciones se encuentran en la barra izquierda de la ventana principal.

7) Importar datos externos.

Vensim también permite importar datos externos exógenos, bien desde un archivo de texto o bien de una hoja de cálculo Excel (que será lo empleado en este trabajo). Para ello es necesario indicarlo en el editor de ecuaciones de la variable de interés.

Por ejemplo: `GET XLS DATA ('inputs.xlsx', 'Climate', '5', 'A6')`. De esta forma se pide que se importen datos del archivo Excel denominado "inputs", de la Hoja "Climate", en la que el argumento siguiente '5' indica la fila donde aparecen los valores del tiempo, y por último 'A6' describe la celda desde donde se empieza a coger el primer dato.

5. ESCENARIOS

En este capítulo se explican en detalle los cinco escenarios futuros implementados por defecto en el modelo MEDEAS, y que han sido aplicados en el presente trabajo en la simulación hasta el año 2050.

Las características más importantes de estos escenarios han sido identificadas en los estudios GEA (Global Environmental Assessment) en Van Vuuren et al. (2012) [40]. En esta investigación se descubrió que algunos escenarios que compartían una lógica y cuantificación similar se repetían en multitud de literatura. Los elementos clave que determinan estos escenarios son: una política ambiental activa o proactiva, un enfoque global o regional, la continuación o desviación respecto a las tendencias históricas, y la postura hacia cooperación o competición. Dadas estas claves, la descripción de cada escenario se presenta a continuación [41]:

- **ESCENARIO 1:** *Optimismo económico con cierta reforma del mercado (Economic optimism with some market reforming)*. Este escenario se centra en conseguir mercados competitivos y eficientes, dentro de un contexto de libre comercio y rápido crecimiento económico, pero incluye algunas suposiciones políticas adicionales destinadas a corregir algunas deficiencias del mercado respecto al desarrollo social, la lucha contra la pobreza o el medio ambiente.

El escenario asume una rápida difusión del desarrollo tecnológico y una convergencia de los niveles de ingresos en todas las regiones y países del mundo. Se asume que un mayor crecimiento económico coincide con un bajo crecimiento de la población (debido a la rápida caída en los niveles de fertilidad). Los recursos escasos de energía y materiales se superan mediante la explotación de nuevas reservas gracias al desarrollo tecnológico, o se sustituyen eficientemente (mediante el aumento de precios por ejemplo). Se considera que todos se beneficiarán de la globalización y los avances tecnológicos solucionarán los problemas ecológicos.

- **ESCENARIO 2:** *Desarrollo global sostenible (Global Sustainable Development)*. En este escenario está presente una fuerte orientación hacia la protección del medio ambiente y la reducción de la desigualdad, basada en soluciones encontradas a través de la cooperación internacional, cambios en el estilo de vida y avances tecnológicos (tecnologías más eficientes, desmaterialización de la economía, economía de servicios y de la información, etc.).

Los elementos centrales son un nivel elevado de conciencia medioambiental y social combinado con un enfoque global hacia el desarrollo sostenible. En este escenario se asume que es posible un alto nivel de coordinación internacional que permita tratar los problemas de lucha contra la pobreza, protección del clima y conservación de la naturaleza.

- **ESCENARIO 3:** *Competición regional (Regional competition/regional markets)*. En este caso las regiones se centran más en su autosuficiencia, su soberanía nacional y su identidad regional, aumentando la diversidad, pero también las tensiones entre regiones y/o culturas. Los países se preocupan por la seguridad y la protección, haciendo hincapié principalmente en los mercados regionales (proteccionismo, desglobalización) y prestando poca atención a los bienes comunes. Debido a la importante reducción de la difusión tecnológica, el desarrollo tecnológico avanzará lentamente.

- **ESCENARIO 4: Desarrollo regional sostenible (Regional Sustainable Development).** También en este escenario se acaba con la globalización, pero es la versión “sostenible” del escenario anterior. En este caso, hay un cambio importante en los valores tradicionales y las normas sociales contra el consumismo sin sentido y la falta de respeto por la vida. Ciudadanos y países deciden asumir sus responsabilidades siendo un ejemplo “verde” para el resto. Aunque se vuelven a construir barreras al comercio de mercancías, los obstáculos a la difusión de información tienden a ser eliminados.

En resumen, este escenario se centra en la búsqueda de soluciones regionales para problemas ambientales y sociales actuales, combinando cambios drásticos en el estilo de vida con la descentralización del gobierno.

- **ESCENARIO BAU (Business-As-Usual).** Escenario de referencia en el que se supone que las tendencias históricas de los últimos años continuarán en el futuro.

Se añade a continuación la siguiente *Tabla 5.1* que compara de forma resumida los cinco escenarios ya explicados en términos de desarrollo económico, crecimiento de la población, desarrollo tecnológico, principales objetivos, protección del medio ambiente, comercio, y de políticas e instituciones.

	ESCENARIO 1: Optimismo económico con cierta reforma del mercado.	ESCENARIO 2: Desarrollo global sostenible	ESCENARIO 3: Competición regional	ESCENARIO 4: Desarrollo regional sostenible	ESCENARIO BAU (Business-As-Usual).
Desarrollo económico	Rápido.	Varía entre lento y rápido.	Lento.	Varía entre medio y rápido.	Medio (globalización).
Crecimiento de la población	Lento.	Lento.	Alto.	Medio.	Medio.
Desarrollo tecnológico	Rápido.	Varía entre medio y rápido.	Lento.	Varía entre lento y rápido	Medio.
Principales objetivos	Crecimiento económico.	Sostenibilidad global.	Seguridad.	Sostenibilidad local.	No definidos.
Protección del medio ambiente	Reactivo.	Proactivo.	Reactivo.	Proactivo.	Ambos (reactivo y proactivo).
Comercio	Globalización.	Globalización.	Barreras comerciales.	Barreras comerciales.	Globalización débil.
Políticas e instituciones	Las políticas crean mercados abiertos, reduciendo las deficiencias del mercado.	Sólida gobernanza global.	Gobiernos nacionales fuertes.	Organización local. Instituciones locales.	Mezcla.

Tabla 5.1: Comparación de las principales características de los cinco escenarios. Fuente: Van Vuuren et al. 2012. [40]

6. MÓDULO CLIMÁTICO DEL MODELO DICE.

En este capítulo se explica de forma más detallada el módulo climático del modelo DICE (introducido de manera resumida en el *Capítulo 3*). A continuación, se describe cómo se encuentra adaptado este módulo en el modelo MEDEAS. Por último, se presentan resultados de la evolución de la concentración de CO₂ y de la temperatura con los escenarios descritos en el capítulo 5.

6.1. Módulo climático de DICE

Como ya se vió en el *Capítulo 3*, el modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía (DICE, Dynamic Integrated model of Climate and Economy), es un modelo integrado global que fue desarrollado por William Nordhaus en el principio de los años 1990.

Se emplean en este modelo relaciones bastante simplificadas debido a tres razones prácticas [42]. Primero, porque se facilita la comprensión de la interacción entre la economía y el clima con una estructura subyacente simple y transparente. En segundo lugar y relacionado con lo anterior, cuanto más grande es un modelo, más difícil es llevar a cabo un análisis exhaustivo de sensibilidad e incertidumbre. Por último, desde un punto de vista computacional, con el fin de que puedan estar disponibles en ordenadores personales, construyendo así un modelo que puede ser utilizado fácilmente por otros investigadores.

Así, la estructura causal del modelo DICE es lo suficientemente simple para ser representada en un solo diagrama. El modelo, adaptado a dinámica de sistemas por Fiddaman [29], puede subdividirse en tres subsistemas principales (*Figura 6.1*): la economía, el ciclo del carbono y el clima.

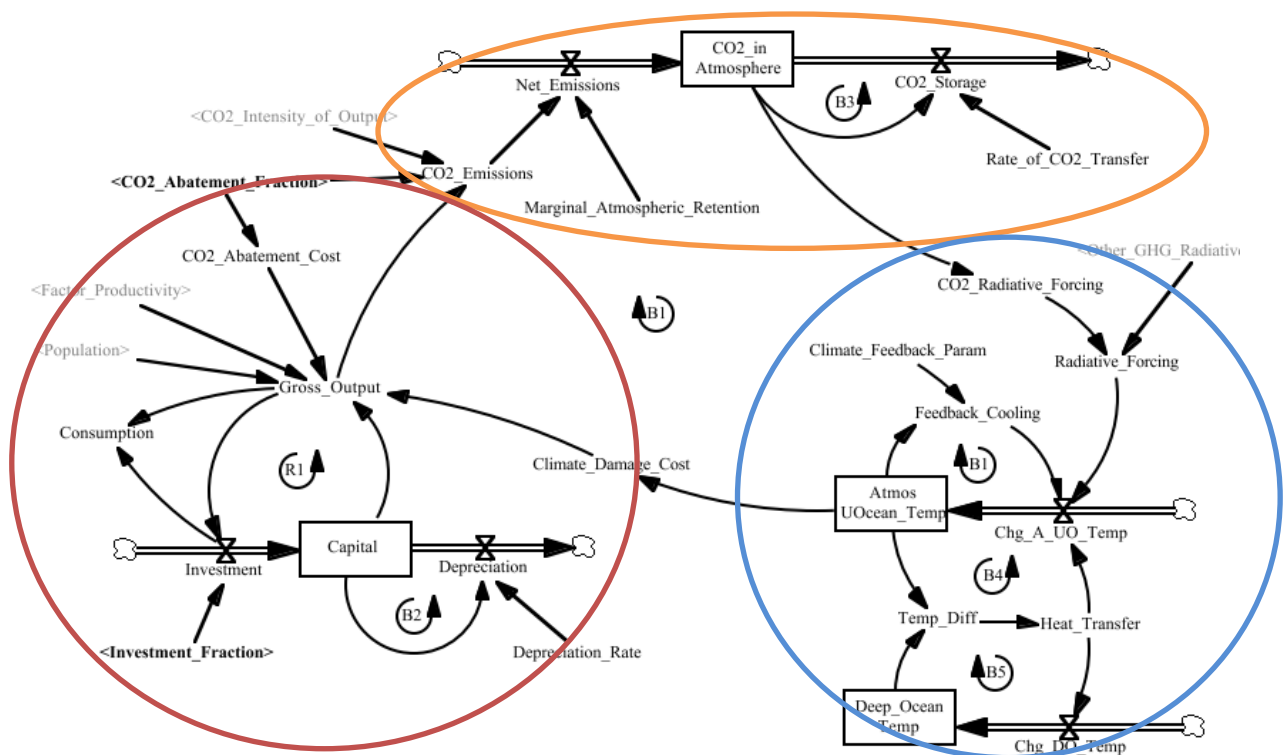


Figura 6.1: Estructura modelo DICE y sus tres subsistemas principales: la economía (círculo rojo), el ciclo del carbono (naranja) y el clima (azul). Fuente: Fiddaman, 1997 [29]

Una parte importante del modelo DICE es la relación entre la economía y el mundo físico. El ciclo de carbono transforma las emisiones de CO₂ en concentraciones y el submodelo del clima transforma éstas (junto con la contribución exógena de otras emisiones GEI y las procedentes de los cambios de uso de suelo), en forzamiento radiativo y cambio de temperatura. Estas emisiones de GEI modifican el clima, que impacta a su vez en las sociedades humanas y en los ecosistemas naturales mediante una función de daño (“damage function”). En concreto, este apartado describe el módulo climático de DICE (ciclo de carbono y el clima), que se encuentra adaptado en MEDEAS.

6.1.1. Ciclo de carbono.

El ciclo del carbono incluido en DICE es simple. Se trata de una estructura lineal de primer orden, en la que una fracción de las emisiones se acumula en la atmósfera a corto plazo y se almacena gradualmente en el océano profundo a largo plazo. (Figura 6.2)

Las emisiones se acumulan en la variable stock de carbono en la atmósfera (“CO₂ in Atmos”). Con un retraso, los procesos de almacenamiento a largo plazo (“CO₂ Storage”) restauran la concentración de carbono atmosférico a su nivel preindustrial. Como se aprecia, el único gas cuyo ciclo se representa en este modelo es el CO₂, simplificación fundamentada en el hecho de que este gas es el principal contribuyente al calentamiento global. Este modelo considera que es probable que los otros GHG sean controlados mediante acuerdos internacionales como ocurrió con los CFC, y por lo tanto los introduce de manera exógena. [3]

Cabe destacar tres características de este sistema. Primero, hay un flujo de carbono, paralelo al flujo de emisiones antropogénicas, que representa los procesos de almacenamiento a corto plazo que se acumulan en la atmósfera. Esto quiere decir que un porcentaje fijo de las emisiones indicado en la variable “Marginal Atmos Retention” se retiene en la atmósfera, mientras que el resto se almacena inmediatamente en la superficie del océano o en la biosfera. Se considera que la capacidad de almacenamiento de emisiones a corto plazo por la biosfera y el océano es infinita.

En segundo lugar, el flujo de almacenamiento de CO₂ a largo plazo no está limitado por las limitaciones de los sumideros de carbono, y se corresponde con un tiempo de residencia de 120 años indicado en la variable “Rate of CO₂ Transfer”. Por último, en tercer lugar, la absorción de carbono es lineal con respecto a las emisiones (a corto plazo) y a las concentraciones atmosféricas (a largo plazo). Algunas de estas características comentadas indican que esta representación del ciclo de carbono es limitada, porque no representa las interacciones complejas que ocurren entre la química del océano y la absorción de carbono.

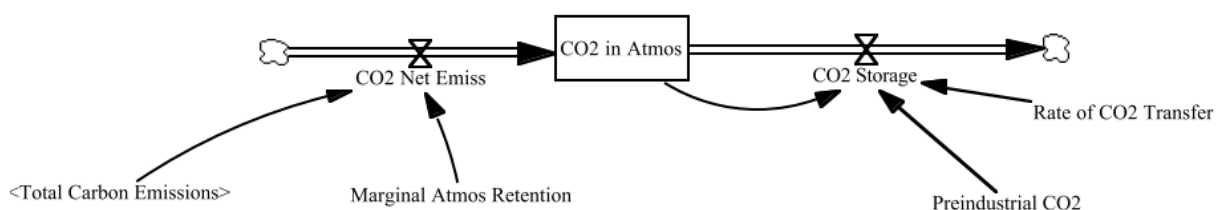


Figura 6.2: El ciclo de carbono en el modelo DICE. Fuente: Fiddaman, 1997 [29]

6.1.2. Submodelo climático.

El climático de DICE se trata de un sistema lineal de segundo orden, con tres bucles de retroalimentación negativa o estabilizantes (Figura 6.3). Dos bucles gobiernan el transporte del calor de la atmósfera y de la superficie del océano, mientras que el tercero representa el calentamiento del océano profundo.

El forzamiento radiativo calienta la atmósfera y la superficie del océano. Una parte de ese calor es devuelto (lazo B1), mientras que el calor restante se transfiere lentamente al océano profundo (bucles B2 y B3). El calentamiento profundo del océano es un proceso lento, debido a que este tiene una gran inercia térmica. Si la temperatura del océano profundo se mantiene constante, la respuesta de la atmósfera y de la superficie del océano al calentamiento es de primer orden.

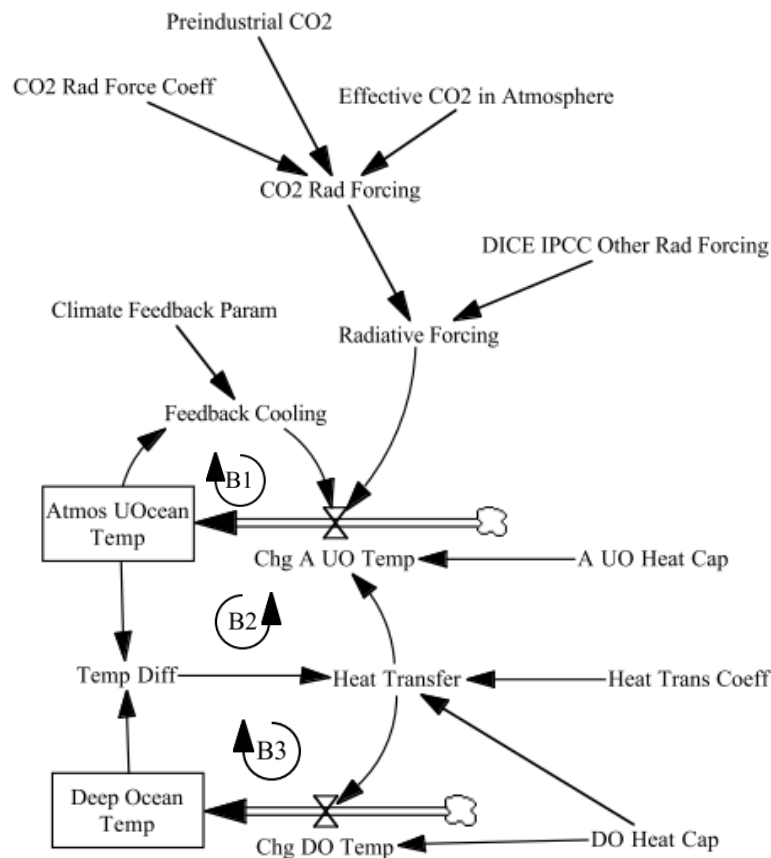


Figura 6.3: Submodelo climático en el modelo DICE. Fuente Fiddaman, 1997 [29]

El forzamiento radiativo del CO₂ se obtiene a partir de la concentración atmosférica de este gas mediante una función logarítmica. El forzamiento radiativo de otros gases de efecto invernadero, aerosoles, ozono y cambios en la superficie de albedo es una variable exógena, es decir, estos datos son externos al modelo. Así, el cambio en el forzamiento radiativo total $F_{Total}(t)$ desde épocas preindustriales (año 1750) se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$F_{Total}(t) = \eta \left\{ \log_2 \left[\frac{C_{AT}(t)}{C_{AT}(1750)} \right] \right\} + F_{EX}(t) \tag{Ec. 5.1}$$

Donde el primer sumando corresponde al forzamiento radiativo del CO₂, siendo $C_{AT}(t)$ la concentración de este gas en la atmósfera, η el coeficiente radiativo del CO₂, y $F_{EX}(t)$ el forzamiento radiativo de otros gases que se añade de forma exógena.

DICE trata de esta manera a los gases que no son CO₂, porque su efecto es relativamente pequeño, o porque su control es exógeno (como el caso de los CFC), o porque aún no se conoce detalladamente su dinámica (como es el caso del albedo). La fuente desde donde se obtienen esos datos es de las Escenarios Representativos de Concentración (RCP), del IPCC (Quinto Informe de Evaluación). En concreto se emplea como entrada las estimaciones de RCP 6.0 W/m², debido a que es consistente con la proyección de las tendencias históricas. [3]

La respuesta de la temperatura de equilibrio a un cambio en el forzamiento radiativo se determina mediante el coeficiente de forzamiento radiativo (radiative forcing coefficient), y el parámetro de retroalimentación del clima, (climate feedback parameter) (Figura 6.3).

Un parámetro crítico, que influye en el parámetro de retroalimentación del clima, es la sensibilidad del clima en condiciones de equilibrio (respuesta de la temperatura en °C al doblar la concentración de CO₂), cuya incertidumbre ya se discutió en el *Capítulo 2*. La última estimación para la versión de DICE 2013 [3], obtenida a partir de diferentes fuentes, fija este valor en 2,9 °C.

6.2. Integración del módulo climático de DICE adaptado en MEDEAS

A continuación se describe cómo se encuentra adaptado el ciclo de carbono y el módulo climático de DICE en MEDEAS. Es necesario añadir que este módulo ya se encontraba adaptado en la realización del presente trabajo. [7]

Debido a que la versión del modelo MEDEAS empleado en este trabajo contiene para la comparación los dos módulos climáticos adaptados (DICE y C-ROADS), el nombre de las variables o parámetros que se repiten en los dos modelos, pero que necesitan ser diferenciados debido a que su valor o su origen no es el mismo (por ejemplo variables de salida), se identifican con el sufijo “CROADS” o “DICE”, según pertenezcan al módulo adaptado del modelo C-ROADS o del DICE respectivamente.

Por otro lado, los datos que son utilizados en MEDEAS se importan desde un archivo Excel denominado “inputs”. Para poder observar y comparar los parámetros y valores de variables que se emplean en los módulos del ciclo de carbono y el clima del modelo DICE y en el modelo C-ROADS, se añade una pestaña “Climate” al archivo Excel existente. Aquí se recogerán todas las constantes, parámetros, variables, etc., permitiendo también su variación por el usuario en caso necesario.

Por último, también hay que conocer que la simulación de Medeas comienza en el año 1995. Por tanto, se ha necesitado ajustar todas las variables para que se inicialicen con el valor correspondiente a ese año.

6.2.1. Ciclo de Carbono

Primero, lo más importante a la hora de integrar el módulo climático, es añadir la entrada de emisiones de CO₂ que es calculada en MEDEAS. Esta variable se denomina “Total CO2 emissions GTCO2[scenarios]”, y se trata de un vector que contiene valores para cada escenario (posee el subíndice o “Subscripts” nombrado como “scenarios”). (Figura 6.4).

De esta manera y siguiendo la estructura de DICE (Figura 6.2), el ciclo de carbono se encuentra adaptado en MEDEAS de la siguiente forma (Figura 6.4):

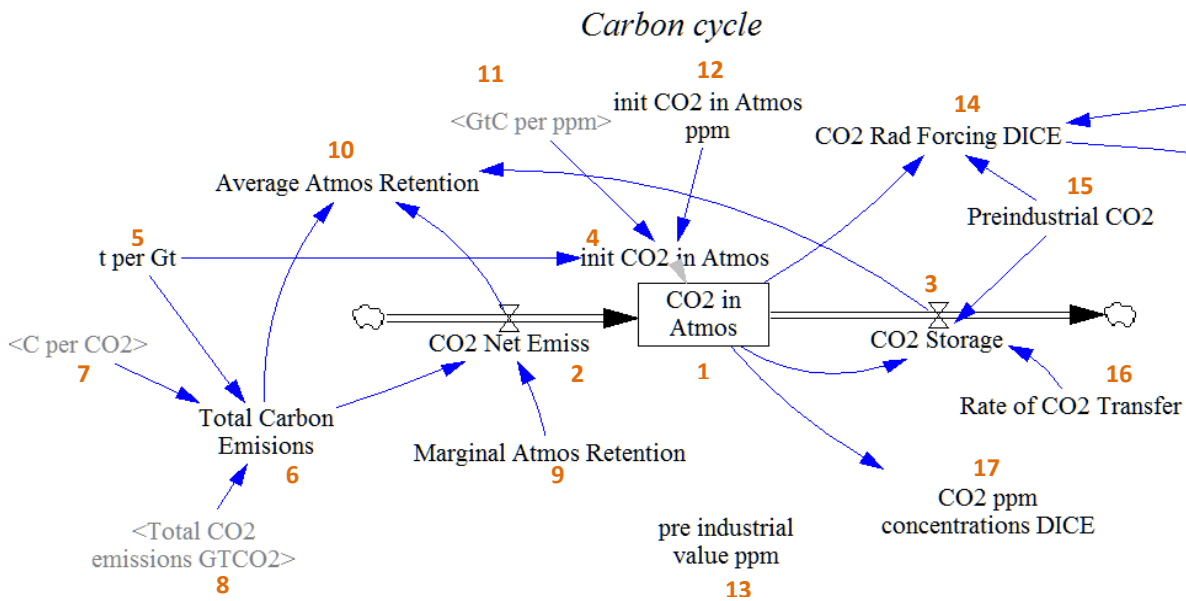


Figura 6.4: Ciclo de carbono del modelo DICE adaptado en Medeas. La descripción de las variables, con su correspondiente número como referencia, se puede consultar en el ANEXO 2.

6.2.2. Submodelo climático

Esta segunda parte que se integra en MEDEAS del modelo de DICE sigue la estructura presentada anteriormente en la *Figura 6.3*. Así, la estructura del clima adaptada en Medeas se presenta en la siguiente *Figura 6.5*:

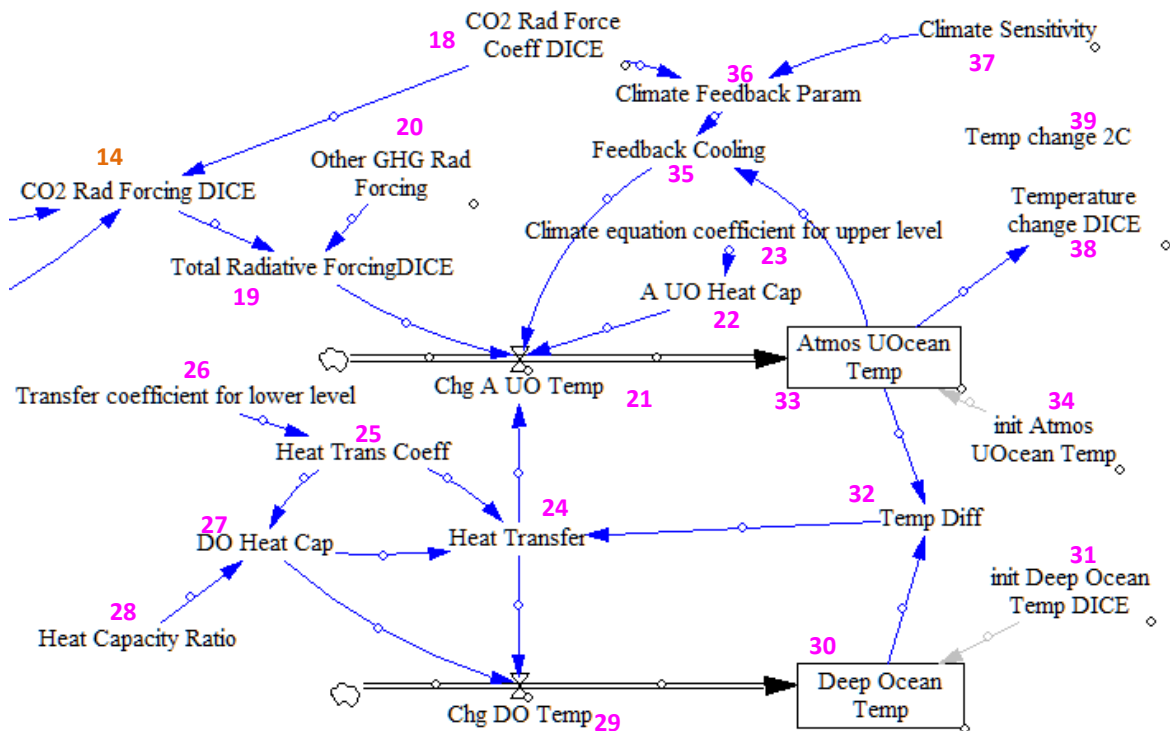


Figura 6.5: Submodelo climático del modelo DICE adaptado en Medeas. La descripción de las variables, con su correspondiente número como referencia, se puede consultar en el ANEXO 2.

La integración en el modelo y la relación con el ciclo de carbono se realiza mediante la variable “CO2 Rad Forcing DICE[scenarios]” que se refiere al forzamiento radiativo del CO₂, siendo esta precisamente la salida del ciclo de carbono que afecta y modifica el clima.

6.3. Resultados

Se presentan aquí los resultados del módulo climático de DICE integrado en el modelo MEDEAS. En concreto las variables de salida son la concentración en la atmósfera de CO₂ (“CO2 ppm concentrations DICE[scenarios]”) y la variación de temperatura desde niveles preindustriales (“Temperature change DICE[scenarios]”).

Como se puede apreciar, las dos variables contienen el vector o “subscript” denominado “scenarios”, que hace referencia a los cinco escenarios que están implementados en el modelo MEDEAS y que ya han sido explicados en detalle en el *Capítulo 5*:

- ESCENARIO 1: Optimismo económico con cierta reforma del mercado (Economic optimism with some market reforming).
- ESCENARIO 2: Desarrollo global sostenible (Global Sustainable Development).
- ESCENARIO 3: Competición regional (Regional competition/regional markets).
- ESCENARIO 4: Desarrollo regional sostenible (Regional Sustainable Development).
- ESCENARIO BAU (Business-As-Usual).

Es necesario apuntar que para las simulaciones en este trabajo se desactivan tres hipótesis del modelo MEDEAS. En concreto, las restricciones de disponibilidad de energías fósiles, la retroalimentación en la demanda de energía final de la tasa de retorno energético (EROI, Energy Return On Investment), que captura la energía necesaria para invertir en nuevas infraestructuras energéticas, y la retroalimentación de los impactos del cambio climático. Es decir, el modelo MEDEAS se corre asumiendo que no existe ninguna limitación al crecimiento exógeno del PIB (GDP, Gross Domestic Product).

Se lleva a cabo de esta forma para poder comparar los modelos C-ROADS y DICE en su forma original. Primero, el modelo C-ROADS no incluye ninguna de esas opciones, y por otro lado, el modelo DICE considera recursos fósiles muy abundantes (que no suponen ninguna restricción práctica durante el siglo 21) y unos impactos climáticos muy pequeños comparados con los considerados en MEDEAS. [43]

A continuación se presentan los resultados de la simulación del modelo MEDEAS con el módulo climático de DICE integrado:

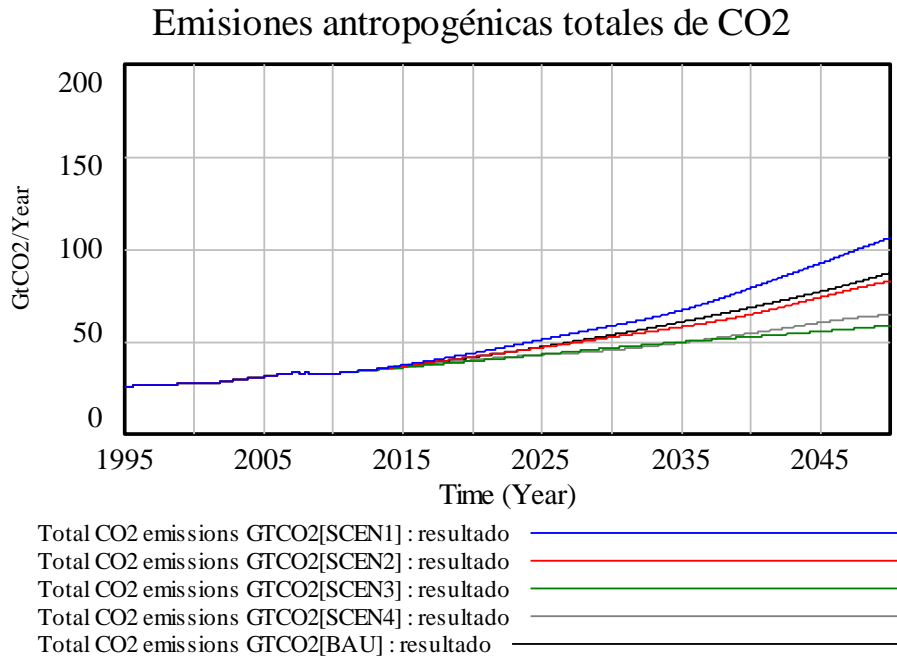


Figura 6.6: Emisiones totales de CO₂ de origen antropogénico. Variable de entrada en el módulo climático de DICE incluido en MEDEAS.

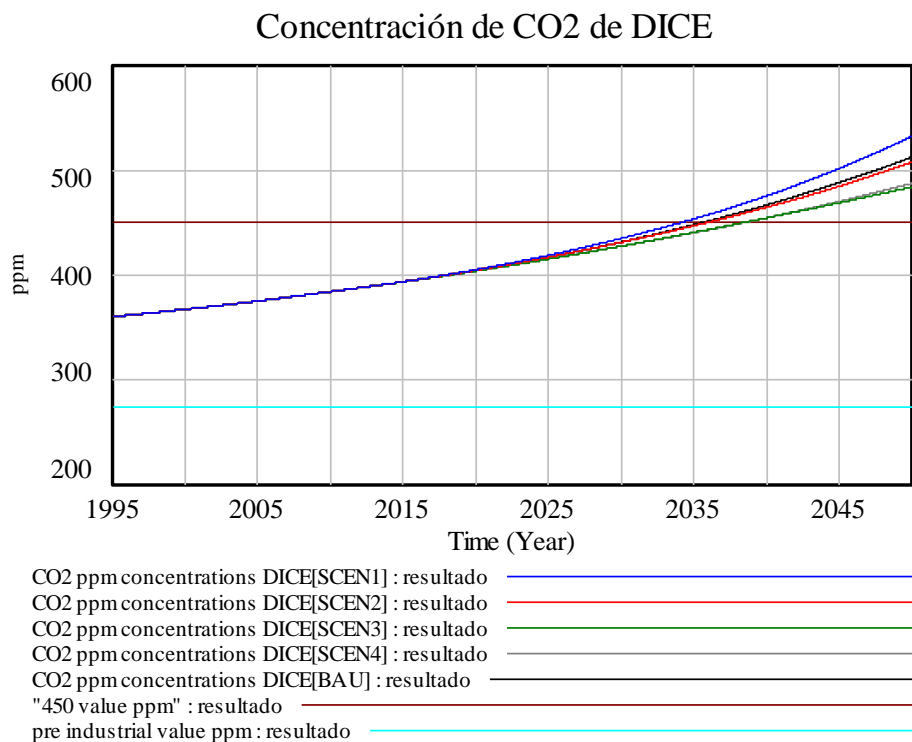


Figura 6.7: Concentración de CO₂ (ppm). Salida del módulo climático de DICE incluido en MEDEAS.

Como se puede observar, las emisiones de CO₂ () que entran en el ciclo de carbono tienen relación directa con la concentración atmosférica de CO₂ (Figura 6.7) con un cierto retardo (“lag”), compartiendo las dos gráficas las mismas tendencias. En esta última gráfica se añade una recta en el valor de 450 ppm, debido a que es un límite que se suele considerar como “seguro”, ya que se estima que por debajo de esa concentración es probable que se consiga mantener el calentamiento por debajo de los 2°C de

variación de temperatura en el siglo XXI.[13]

De los cinco escenarios simulados, el de mayores emisiones es el escenario 1 (optimismo económico) llegando a una concentración de más de 530 ppm en 2050, seguido por el escenario BAU y el escenario 2 con aproximadamente 513 y 508 ppm respectivamente.

En el escenario 2 de desarrollo sostenible global también aumentan las emisiones de CO₂ alejándose poco del escenario BAU. Esto se debe al mayor crecimiento económico considerado en el escenario 2 respecto del BAU, y a que las políticas de transición energética implementadas no logran evitar que sigan aumentando las emisiones de CO₂. Los otros dos escenarios (3 y 4), de menor crecimiento económico y más regionalización, son los de menores emisiones.

Por otro lado, en la *Figura 6.8* siguiente se representa la variación de temperatura (respecto a niveles preindustriales, 1850-1900). En DICE como ya se explicó, la entrada del forzamiento radiativo de otros gases de efecto invernadero distintos al CO₂ es exógena, y común a los cinco escenarios. Por ello la posición relativa de estos en las gráficas (*Figura 6.6* y *6.7*) anteriores se mantiene en esta.

La mayor variación de temperatura se obtiene para el escenario 1, con un valor en torno a los 1,6°C para 2050, sin llegar a los 2°C.

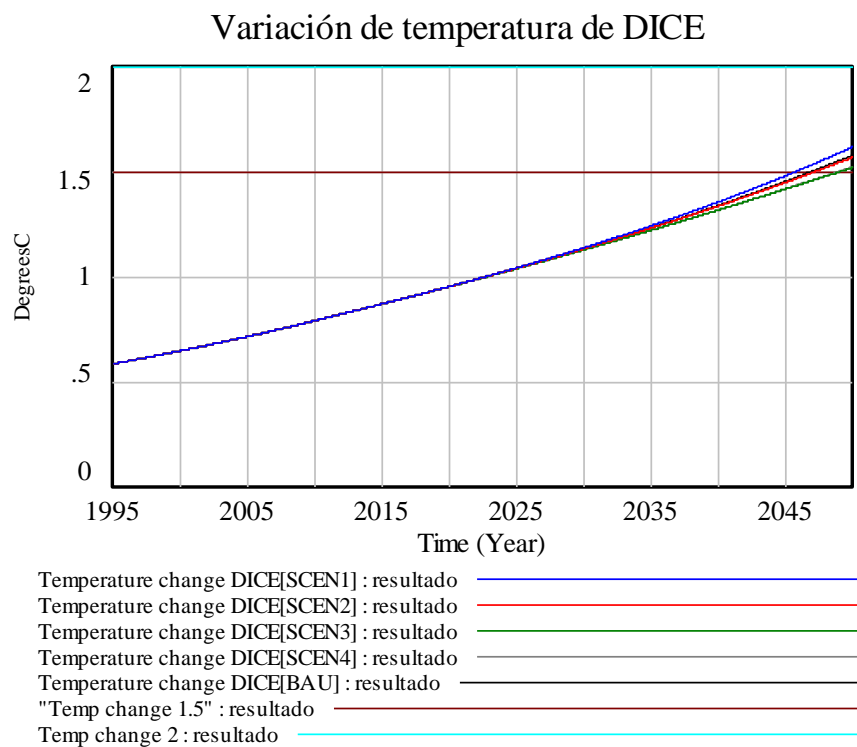


Figura 6.8: Variación de temperatura en °C respecto a niveles preindustriales. Salida del módulo climático de DICE incluido en MEDEAS.

Estos resultados son algo bajos en comparación con la literatura, puesto que habitualmente los modelos de evaluación integrada en escenarios BAU alcanzan las inmediaciones de los 2°C de incremento de temperatura hacia 2050 (ver *Figura 2.6* incluida en el *Capítulo 2*, del IPCC AR5 [13]).

7. ADAPTACIÓN DEL MÓDULO DE C-ROADS PARA SU INTEGRACIÓN EN MEDEAS.

En este capítulo se introducen en el primer apartado las características principales del modelo C-ROADS. A continuación, en el *apartado 7.2* se explican los fundamentos de su módulo climático, para finalmente explicar en el *apartado 7.3* la metodología seguida en la adaptación de dicho módulo para su integración en MEDEAS. Se describen en detalle los pasos que he seguido para llevar a cabo esa adaptación. Por último, en el *apartado 7.4* se presentan los resultados que se obtienen con el modelo ya adaptado.

7.1. Introducción. Modelo C-ROADS

C-ROADS (*Climate Rapid Overview And Decision-support Simulator*) [44] es un simulador que constituye una herramienta de ayuda en la toma de decisiones, incluyendo el conocimiento de los modelos más complejos. Fue desarrollado por *Ventana Systems, Sustainability Institute* y *MIT System Dynamics Group*, formando parte estos del equipo *Climate Interactive*.

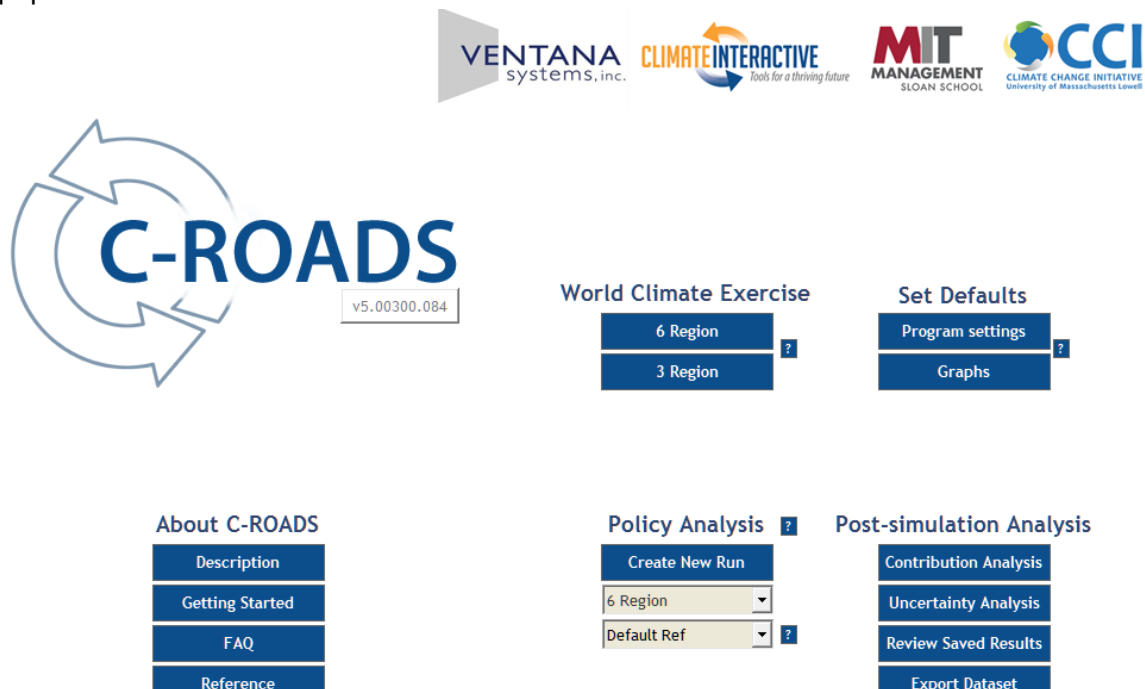


Figura 7.1: Simulador C-ROADS. Ventana interactiva del modelo.

En concreto, ayuda en la comprensión de las respuestas del planeta a los cambios en las emisiones de los GEI, incluyendo el CO₂ que proviene del uso de combustibles fósiles, las emisiones del cambio en el uso de la tierra y las de otros gases de efecto invernadero.

C-ROADS se ha utilizado en sesiones de planificación estratégica entre los encargados de tomar las decisiones en el gobierno, en las empresas y en la sociedad civil. Actualmente se está desarrollando una versión en línea para su uso general.

En resumen, C-ROADS proporciona una base consistente para el análisis y la comparación de las opciones de política, fundamentada en la ciencia. Al transmitir visual y numéricamente el impacto proyectado de los compromisos que incluyen las reducciones de emisiones de GEI, el modelo permite a los usuarios ver y entender la

brecha entre los compromisos políticos acordados y las acciones necesarias para estabilizar las concentraciones de GEI y limitar los riesgos de "interferencia humana" en el clima. De esta manera, C-ROADS ofrece a los responsables de la toma de decisiones una manera de determinar si están en el camino correcto hacia sus objetivos, y descubrir, en el caso en el que no lo estén, qué medidas adicionales serían suficientes para alcanzar esos objetivos.

CARACTERÍSTICAS DEL SIMULADOR

Para la construcción de C-ROADS se ha empleado la dinámica de sistemas. La simulación se puede hacer a nivel nacional o regional, y comienza en el año 1850 terminando en el año 2100. El nivel de agregación regional puede ser elegido por el usuario según su propósito (puede introducir entradas de emisiones para uno, tres, seis o quince bloques diferentes de países), y los resultados están disponibles también para cualquiera de esos niveles de agregación.

El modelo de C-ROADS se basa en la literatura y bibliografía científica existente empleada en modelos complejos, aunque este modelo sigue siendo lo suficientemente simple como para poder emplearse en un ordenador individual. Por lo tanto, no es un sustituto de los modelos más detallados y complejos como los GCM (Modelos de Circulación General), sino que está diseñado para capturar las ideas clave de estos y ponerlos a disposición del usuario de forma rápida.

El modelo utiliza datos históricos, incluyendo el PIB y la población de cada país, las emisiones de CO₂ de los combustibles fósiles (FF) y los cambios en el uso de la tierra y otros gases de efecto invernadero bien mezclados (CH₄, N₂O, SF₆, PFC y HFC). Con todo ello, calcula la trayectoria del CO₂ atmosférico y otras concentraciones de GEI, la temperatura media global de la superficie, el aumento del nivel del mar y los cambios en el pH del océano. La estructura básica de C-ROADS se muestra a continuación en la siguiente *Figura 7.2*:

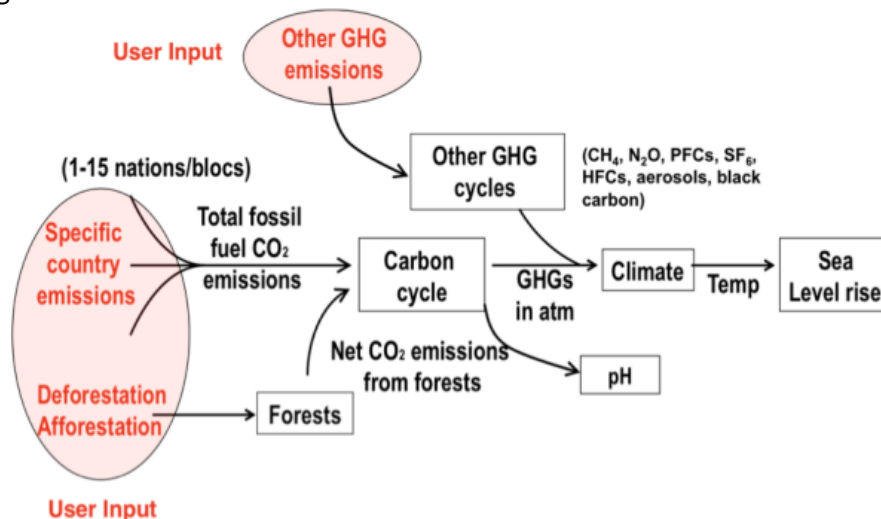


Figura 7.2: Esquema de la estructura general de C-ROADS. Fuente: C-ROADS Guide. [44]

ESCENARIOS DE C-ROADS

C-ROADS posee escenarios para proyectar en el futuro. Las proyecciones del PIB y las emisiones se calibran respecto a los escenarios del informe AR5 del IPCC. Las proyecciones de la población se basan en las predicciones de "United Nations' World Population".

El modelo también permite a los usuarios probar una amplia gama de propuestas de políticas de futuras emisiones. Los usuarios pueden especificar las reducciones de emisiones a una tasa anual elegida, un objetivo para emisiones, intensidad de emisiones o emisiones per cápita como fracción de un año base especificado. También pueden seleccionar los años en los que las políticas entrarían en vigor y el año objetivo.

La elección de los escenarios se realiza con la variable “Choose RS” (Figura 7.3), que tiene un rango de valores desde -5 a +1. Esta variable determina el escenario de referencia (RS) para las emisiones de CO₂ de los combustibles fósiles (FF), así como para todos los restantes gases de efecto invernadero (GEI) y otros forzamientos.

En el caso de darle el valor por defecto de 0 a “Choose RS”, las proyecciones de población son determinadas por proyecciones de la ONU, las proyecciones del PIB derivan de la población y el PIB per cápita, y las emisiones se generan por el PIB y las emisiones por PIB. Los parámetros se establecen de manera que las proyecciones del PIB sean consistentes con los Escenarios Socioeconómicos Compartidos (SSP, Shared Socioeconomic Pathways) del IPCC introducidos en el Capítulo 3, en particular el escenario SSP4; y las emisiones sean consistentes con las proyecciones del AR5 (Representative Concentration Pathway), en concreto RCP 8.5.

Si la variable “Choose RS” toma el valor 1, el usuario puede especificar las emisiones de referencia para cada país/grupo de países en una hoja de cálculo de Excel.

Por último, se añaden cinco escenarios más (“Choose RS” toma los valores de -1 a -5) para las pruebas de calibración con el RCP y la Tercera evaluación del IPCC (TAR) con los escenarios SRES, Special Report on Emissions Scenarios (Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones).

Parameter	Definition	Range	Default Values	Units	Source
Choose RS	Specifies Reference Scenario (RS)	-5-1	0	Dmnl	
	1 = User Input in Excel - reference for each country specified by user, defaulted to be equivalent to the default reference, i.e., <i>Choose RS</i> =0 consistent with RCP8.5				
	0 = Calculated according to UN population and assumptions about rates of GDP per capita, and emissions per GDP, consistent with AR5 RCP8.5 but updated to reflect trends of GDP per capita and CO ₂ per GDP over the last decade. If Use BAU = 1, then those updates are ignored.				
	-1 = RCP2.6				
	-2 = RCP4.5				
	-3 = RCP6.0				
	-4 = RCP8.5				
	-5 = SRES markers				

Figura 7.3: Tabla de los Escenarios de Rerefencia en C-ROADS. Fuente: C-ROADS Guide. [44]

7.2. Módulo climático de C-ROADS

La esencia del ciclo del carbono y el submodelo climático del modelo se basan en la tesis del Dr. Tom Fiddaman del MIT en 1997 [29]. Se explican a continuación los dos por separado.

7.2.1. Ciclo de carbono.

El módulo del ciclo del carbono se adapta del modelo FREE de Fiddaman introducido

ya en el *Capítulo 3*. En el ciclo de carbono de DICE explicado en el anterior capítulo, se empleaba un modelo lineal sencillo, que no obstante no captura las no linealidades (por ejemplo, la saturación de sumideros).

El ciclo de carbono adaptado del modelo FREE (*Figura 7.4*) es un modelo de difusión turbulenta “eddy diffusion” con reservas de carbono en la atmósfera, biosfera, capa oceánica de mezcla y cuatro capas oceánicas profundas. El modelo empareja las interacciones atmósfera-capas de mezcla del océano y la producción primaria neta con la difusión turbulenta (“eddy diffusion”) entre capas del océano y una biosfera con dos cajas (variables “stock”).

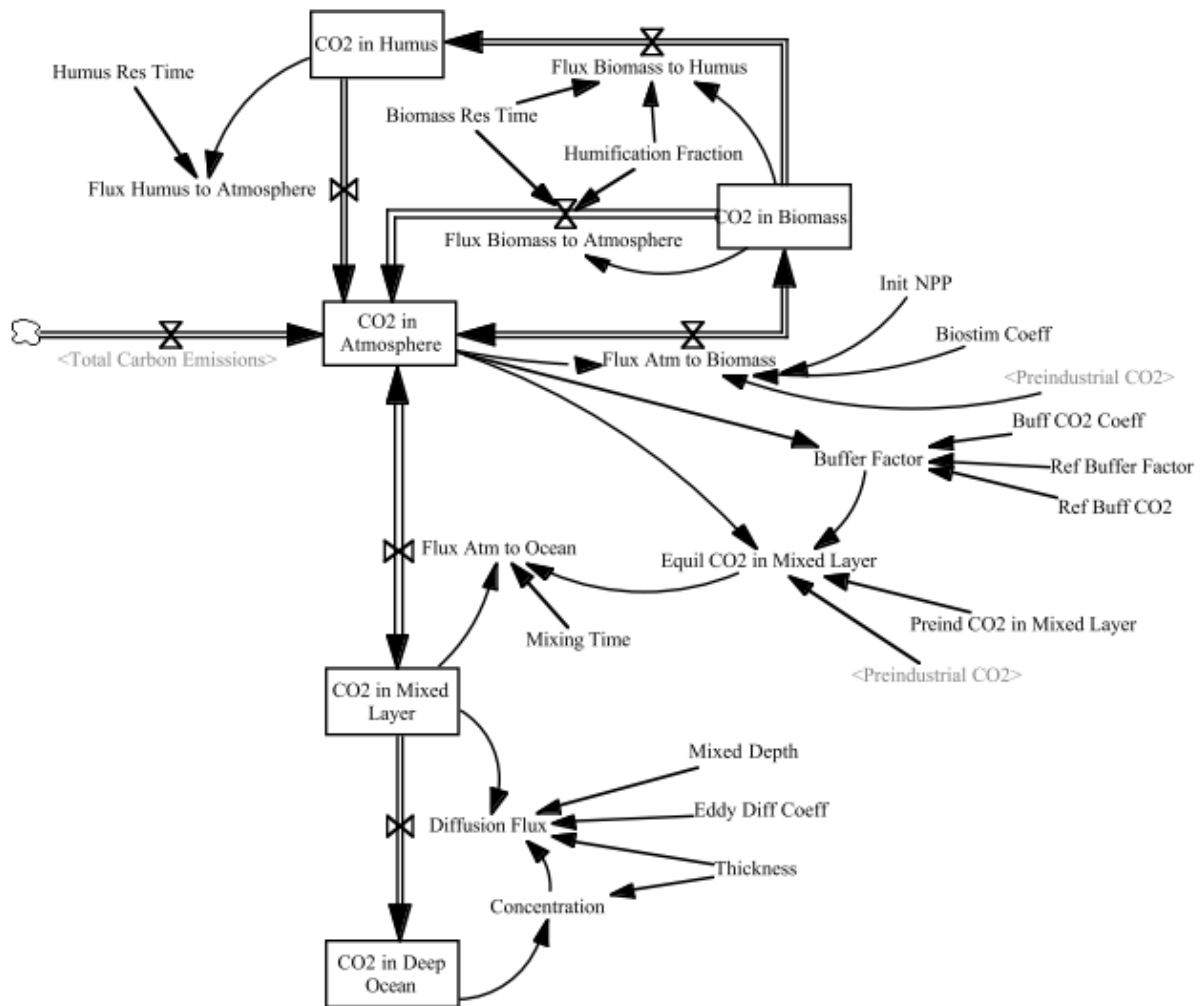


Figura 7.4: Ciclo de carbono del modelo FREE. Fuente: Fiddaman. [29]

En el modelo FREE, todas las emisiones se acumulan inicialmente en la atmósfera. A medida que aumenta la concentración atmosférica de carbono, también lo hace la absorción de carbono por el océano y la biosfera, donde el carbono se almacena gradualmente.

El flujo atmosférico a la **biosfera** consiste en la producción primaria neta (NPP), que crece logarítmicamente a medida que aumenta la concentración atmosférica de carbono siguiendo la *Ecuación 7.1*:

$$NPP = NPP_0 \left[1 + \beta_b * \ln \left(\frac{C_a}{C_{a,0}} \right) \right]$$

(Ec. 7.1)

Siendo NPP_0 la producción primaria neta de referencia, β_b el coeficiente de bioestimulación, C_a la concentración de carbono (C) en la atmósfera, y $C_{a,0}$ la concentración de C en la atmósfera.

Debido a que la relación es logarítmica, la absorción de C por la biosfera es menor que proporcional al aumento de la concentración de C en la atmósfera. En la ecuación no se tienen en cuenta las reservas de biomasa actuales y las perturbaciones humanas. El flujo de C que absorbe la biomasa disminuye al aumentar la temperatura. Se asume una relación lineal, cuyo parámetro de sensibilidad se estima por defecto en 1.

Vale la pena señalar que esta formulación, aunque se usa a menudo, no es válida para grandes desviaciones en la concentración atmosférica de C. Por ejemplo, si la concentración atmosférica de C se aproximara a cero, la producción primaria neta se aproximaría a menos el infinito, siendo esto imposible dado el stock positivo finito de biomasa. Por otro lado, a medida que la concentración de C se vuelve muy alta, la producción primaria neta puede crecer arbitrariamente, lo que tampoco es posible en la realidad. Sin embargo, ninguna de estas restricciones es un problema para los escenarios de emisiones esperados en las próximas décadas.

Los modelos en los que se basa C-ROADS tienen biosferas detalladas, divididas en hojas, ramas, tallos, raíces, hojarasca, humus y carbón vegetal. Para simplificar el modelo, estas categorías se agrupan en dos "stocks": uno de biomasa (hojas, ramas, tallos, raíces) y otro de humus (hojarasca, humus). El carbón vegetal no se tiene en cuenta debido a su larga vida útil. Así, las fórmulas para cada "stock" de la biosfera son las siguientes:

$$C_b(t) = \int NPP(t) - \frac{C_b(t)}{\tau_b} dt \quad (\text{Ec. 7.2})$$

Donde C_b se refiere al carbono en la biomasa, y τ_b es el tiempo de residencia de la biomasa.

$$C_h(t) = \int \frac{\emptyset * C_b(t)}{\tau_b} - \frac{C_h(t)}{\tau_h} dt \quad (\text{Ec. 7.3})$$

Donde C_h es en este caso el carbono en el humus, \emptyset se refiere a la fracción de humidificación, y τ_h es el tiempo de residencia del humus.

La interacción entre la **atmósfera y la capa de mezcla del océano** implica un cambio en el equilibrio químico. Así, el CO_2 reacciona en el océano convirtiéndose en HCO_3^- (anión bicarbonato) y CO_3^{2-} (anión carbonato). La ecuación que corresponde al estado de equilibrio es la siguiente:

$$C_m = C_{m,0} \left(\frac{C_a}{C_{a,0}} \right)^{\frac{1}{\zeta}} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Donde C_m es la concentración de carbono (C) en la capa de mezcla del océano, C_a es la concentración de C en la atmósfera, $C_{m,0}$ y $C_{a,0}$ son las concentraciones de referencia en la capa de mezcla y en la atmósfera respectivamente, y ζ el factor de amortiguamiento.

La atmósfera y la capa de mezcla del océano se ajustan a este equilibrio con una constante de tiempo de 1 año. El valor del amortiguamiento o factor de Revelle, ζ , es aproximadamente de 10. Al aumentar este valor el agua es más ácida y se absorbe menos CO_2 , por lo que la capacidad que tiene el océano para absorber CO_2 es

inversamente proporcional al factor de Revelle. Es decir, este factor mide la resistencia del CO₂ atmosférico a ser absorbido por la capa superficial del océano.

El factor de amortiguamiento aumenta con la concentración atmosférica de CO₂ (Ecuación 7.5) y la temperatura. Esto significa que la capacidad oceánica de absorber CO₂ disminuye a medida que aumenta la concentración atmosférica. Este efecto de la temperatura es otro de los mecanismos de retroalimentación entre el clima y el ciclo del carbono. También se reduce la solubilidad del CO₂ en el océano con el aumento de las temperaturas (al aumentar la temperatura la solubilidad de los gases en líquidos disminuye). Del mismo modo que para el caso de la retroalimentación de la temperatura en el flujo de C que absorbe la biomasa, se asume una relación lineal para el efecto de la temperatura sobre el flujo de C hacia el océano (aproximación suficiente para una escala de tiempo hasta el año 2100). Para ambos efectos, la sensibilidad predeterminada es de 1. La fórmula que determina la variación del factor de Revelle aparece a continuación:

$$\zeta = \zeta_0 + \delta_b \ln\left(\frac{C_a}{C_{a,0}}\right) \tag{Ec. 7.5}$$

Donde ζ es el factor de amortiguamiento, ζ_0 es el factor de amortiguamiento de referencia, δ_b es el coeficiente de amortiguamiento del CO₂, C_a es la concentración de C en la atmósfera, y $C_{a,0}$ es la concentración de C de referencia en la atmósfera.

El **océano profundo** está representado por una estructura simple de difusión turbulenta (“eddy diffusion”). Dentro del océano, el transporte de carbono entre las capas oceánicas se realiza de forma lineal. El flujo de carbono entre dos capas de espesor idéntico se expresa mediante la siguiente Ecuación 7.6:

$$F_{m,n} = \frac{(C_m - C_n)e}{d^2} \tag{Ec. 7.6}$$

Donde $F_{m,n}$ es el flujo de carbono entre la capas oceánica m y la capa n , C_m y C_n es la concentración de carbono en la capa oceánica m y n respectivamente, e es el coeficiente de difusión de Eddy, y d es el espesor de las capas.

La constante de tiempo para esta interacción varía con d . Para tener en cuenta el espesor de cada capa debido a que no son iguales, para la determinación de la constante de tiempo se utiliza el grosor medio de dos capas adyacentes. En la *Tabla 7.1* se resumen las constantes de tiempo utilizadas en C-ROADS que definen la interacción entre las capas. En el modelo se emplea una capa de mezcla de 100 metros y cuatro capas oceánicas profundas de 300, 300, 1300 y 1800 metros, en orden de menos a más profundidad.

Espesor de la capa	Constante de tiempo
100 metros	1 año
300 metros	14 años
300 metros	20 años
1300 metros	236 años
1800 metros	634 años

Tabla 7.1: Constantes de tiempo de la interacción entre capas oceánicas en C-ROADS. Fuente: C-ROADS Reference Guide [44].

7.2.2. Otros GEI (Gases de Efecto Invernadero)

C-ROADS, en contraste con el submodelo climático del DICE, modela explícitamente los ciclos de otros gases de efecto invernadero, como el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los gases fluorados (PFC, SF₆ y HFC). Los PFC (perfluorocarbonos) se representan como equivalentes del CF₄ (tetrafluoruro de carbono) debido a los tiempos de vida comparativamente largos de los diversos tipos de gases PFC. Los HFC (hidrofluorocarburos), por otro lado, se representan como una matriz de los nueve tipos de HFC primarios, cada uno con sus propios parámetros.

La estructura del ciclo de cada GEI refleja una dinámica de primer orden, de modo que el gas se emite a una velocidad determinada y se absorbe de la atmósfera de acuerdo con su concentración y su constante de tiempo. La masa que permanece en la atmósfera se convierte, de acuerdo con su peso molecular, a la concentración de ese gas. Mediante la multiplicación de la concentración de cada gas por el coeficiente de radiación del gas, se obtiene el forzamiento radiativo instantáneo (RF). La suma de todos los RF determina el RF total del sistema.

Las constantes de tiempo y los coeficientes de forzamiento radiativo se toman del del Quinto Informe de evaluación del IPCC (AR5) (*Grupo de trabajo 1, Capítulo 8, Tabla 8.A.1. Lifetimes, Radiative Efficiencies and Metric Values GWPs relative to CO2*).

Además de las emisiones antropogénicas consideradas, los gases CH₄, N₂O y PFC, como el carbono, también tienen un componente natural. Mediante el flujo de carbono que proviene del CH₄ del humus y de la biomasa en el ciclo del carbono, convertido a unidades de CH₄, se obtienen las emisiones naturales de CH₄. Estas son consistentes con las calculadas por MAGICC. Las emisiones naturales de N₂O provienen de las emisiones que se mantienen en el escenario de "emisiones cero" de MAGICC. Por otro lado, las emisiones de PFC naturales globales se calculan dividiendo la masa preindustrial del gas CF₄ por la constante de tiempo para el CF₄. Esas emisiones naturales de PFC provienen de las rocas. La *Figura 7.5* ilustra el ciclo general de cada GEI:

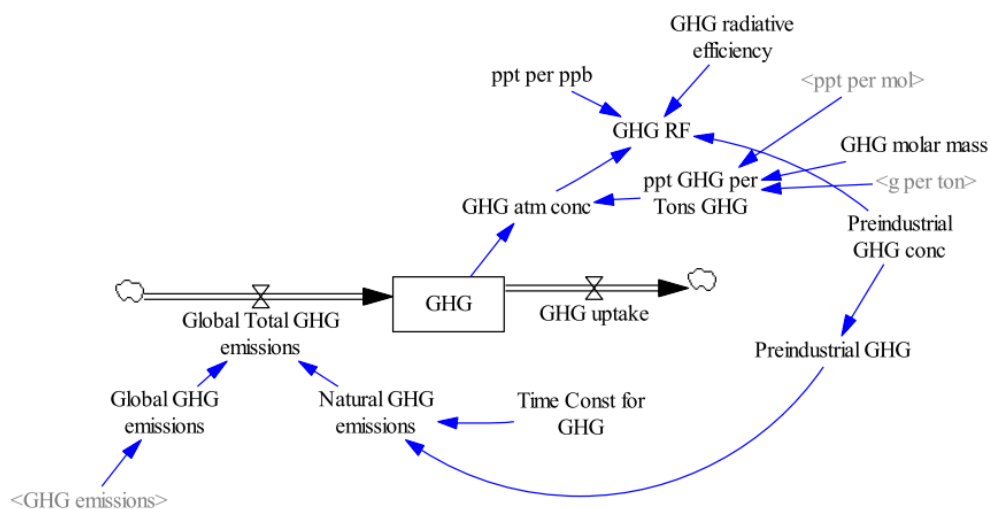


Figura 7.5: Ciclo de otros GEI en C-ROADS. Fuente: C-ROADS Reference Guide. [44]

Para el CH₄, la temperatura puede afectar la tasa de emisiones mediante dos mecanismos de retroalimentación. La primera retroalimentación refleja el aumento de las emisiones naturales de metano de la biosfera al aumentar la temperatura. Este parámetro de sensibilidad, "Sensitivity of Methane Emissions to Temperature", afecta a los flujos de carbono del humus y de la biomasa en el submodelo del ciclo del carbono. El

modelo también incluye la liberación de CH₄ de los depósitos de este gas en el permafrost (capa de suelo congelado) y el clatrato (estructura cristalina formada por moléculas de agua en el que el metano es aprisionado).

7.2.3. Forzamiento radiativo.

El **forzamiento radiativo (RF)** del CO₂ es una función logarítmica de la concentración de CO₂ (C_a) en la atmósfera al igual que en el modelo DICE. La respuesta de la temperatura de equilibrio (T_{equil}) a un cambio en el forzamiento radiativo está determinada por el coeficiente de forzamiento radiativo, κ , y el parámetro de realimentación del clima, λ , mediante la siguiente Ecuación 7.7:

$$T_{equil} = \frac{\kappa \ln\left(\frac{C_a}{C_{a,0}}\right)}{\lambda \ln(2)} \tag{Ec. 7.7}$$

Donde $C_{a,0}$ es la concentración de CO₂ preindustrial.

Por otro lado, el forzamiento del CH₄ (metano) y del N₂O (óxido de nitrógeno) es menor que la suma de RF de cada uno individualmente debido a las interacciones entre ambos gases. Por ello, hay que añadir un ajuste en la suma del forzamiento radiativo del NO₂ y el CH₄. Una tabla resumen de las fórmulas del forzamiento radiativo para los gases CO₂, NO₂ y el CH₄ se presenta a continuación:

Gas	RF (W/m ²)	Constante (α)
CO ₂	$\Delta F = \alpha \ln(C/C_0)$	5,35
CH ₄	$\Delta F = \alpha(\sqrt{M} - \sqrt{M_0}) - (f(M, N_0) - f(M_0, N_0))$	0,036
NO ₂	$\Delta F = \alpha(\sqrt{N} - \sqrt{N_0}) - (f(M_0, N) - f(M_0, N_0))$	0,12

Tabla 7.2: Fórmulas para el RF del CO₂, N₂O y el CH₄. Fuente: IPCC. AR5 [45]

El forzamiento de cada gas fluorado (F) es el producto de su concentración y su coeficiente de forzamiento radiativo; el forzamiento total de los gases F es la suma de estos productos, al igual que en el caso de los forzamientos de los gases MP (Protocolo de Montreal).

La suma de otros forzamientos tiene un valor por defecto exógeno y variable en el tiempo. Estos forzamientos (“Other Forcings”) se clasifican en:

- 1) Forzamientos solares y de albedo.
- 2) Forzamientos de los precursores del ozono.
- 3) Forzamientos del carbón orgánico, carbón negro y aerosoles biológicos.

El usuario puede optar por introducir datos en cada una de estas categorías mediante una tabla en Vensim (“lookup table”), pero de forma predeterminada, los valores por defecto se obtienen de MAGICC (escenario A1FI).

Por último cabe añadir, que los forzamientos minerales y terrestres, que equivalen a los forzamientos solares y de albedo, y que se obtienen de MAGICC A1FI desde el año 2010 hasta el año 2100, representan un valor constante de -0.3 vatios/m². Estos no están incluidos en los valores de forzamiento radiativo de las “RCP”; en consecuencia, se añaden a las trayectorias de “Otros forzamientos” de las RCP, obteniendo así la variable “Otros forzamientos ajustados (Adjusted Other Forcings)”. Esta última variable es la que se añade al forzamiento radiativo total.

Finalmente, en el modelo de C-ROADS es posible también realizar simulaciones de calibración con datos exógenos de otros modelos, como por ejemplo MAGICC.

7.2.4. Submodelo climático.

El submodelo climático se toma del submodelo climático de DICE, explicado ya en el Capítulo 6 anterior. [44] La única diferencia es que el modelo FREE en su adaptación a C-ROADS ha pasado a estar en términos de stocks y flujos de calor, en lugar de temperatura, con el fin de que el proceso físico de acumulación sea más fácil de comprender para los usuarios del modelo. Sin embargo, el modelo actual es analíticamente equivalente a las versiones FREE y DICE.

Otra diferencia importante con las otras versiones que añadían de forma exógena el forzamiento radiativo de otros GEI distintos al CO₂, es que C-ROADS en su lugar emplea forzamientos calculados de forma endógena a partir de las emisiones de cada gas.

El submodelo climático en C-ROADS es un sistema lineal de quinto orden, con tres bucles de retroalimentación negativos (Figura 7.6). Dos de esos lazos gobiernan el transporte de calor de la atmósfera y la superficie del océano, mientras que el tercero representa el calentamiento del océano profundo. Éste último se trata de un proceso lento, porque el océano tiene una capacidad de calor muy grande. Si la temperatura del océano profundo se mantuviera constante, la respuesta de la atmósfera y el océano superficial al calentamiento sería de primer orden.

El cambio de temperatura depende del forzamiento radiativo (RF) de los gases de efecto invernadero, del enfriamiento (“feedback cooling”, pérdida de calor del sistema atmósfera/superficie del océano, por ejemplo por la radiación), y de la transferencia de calor de la atmósfera y la superficie del océano a las capa oceánicas más profundas. Estas relaciones se reflejan en las Ecuaciones 7.8, 7.9 y 7.10.

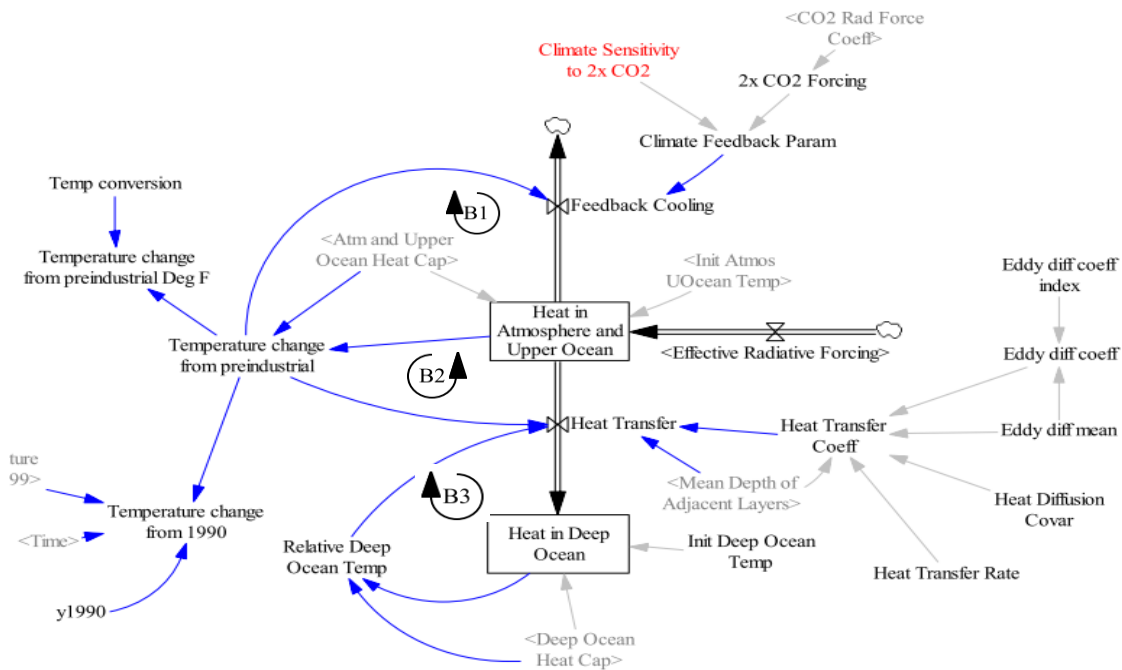


Figura 7.6: Submodelo climático en C-ROADS. Fuente: C-ROADS Reference Guide. [44]

$$T_{surf} = Q_{surf} / R_{surf} \quad \therefore \quad T_{deep} = Q_{deep} / R_{deep} \tag{Ec. 7.8}$$

$$Q_{surf} = \int (RF(t) - F_{out}(t) - F_{deep}(t)) dt + Q_{surf} \quad \therefore \quad Q_{deep} = \int F_{deep}(t) dt + Q_{deep}(0) \tag{Ec. 7.9}$$

$$F_{out}(t) = \vartheta T_{surf} \quad \therefore \quad F_{deep}(t) = R_{deep} * (T_{surf} - T_{deep}) / \tau \tag{Ec. 7.10}$$

Donde T se refiere a la superficie de la superficie o del fondo del océano, Q es el contenido de calor, R es la capacidad de calor, F_{deep} es el flujo de calor hacia el océano profundo, RF es el forzamiento radiativo, F_{out} es el flujo de calor devuelto (enfriamiento), ϑ es el parámetro de retroalimentación del clima (“climate feedback parameter”), y τ es la constante de tiempo de la transferencia de calor.

7.3. Adaptación de C-ROADS para su implementación en MEDEAS

En este apartado se describe cómo se llevó a cabo la adaptación del ciclo de carbono y el submódulo climático del modelo C-ROADS en MEDEAS.

7.3.1. Metodología.

Primero, es necesario indicar que en esta adaptación no se han incluido todos los elementos de C-ROADS, sino que sólo se han elegido aquellos procesos y variables principales necesarias para representar la evolución de las variables climáticas de diferentes escenarios de emisiones de GEI.

Por otro lado, como ya expliqué en el anterior *Capítulo 6*, debido a que la versión del modelo MEDEAS de Vensim empleado en este trabajo, contiene para la comparación los dos módulos climáticos adaptados (DICE y C-ROADS), el nombre de las variables o parámetros que se repiten en los dos modelos pero que necesitan ser diferenciados se identifican con el sufijo “CROADS” o “DICE”, según pertenezcan al módulo adaptado del modelo de C-ROADS o al de DICE respectivamente.

Por otro lado, los datos que son utilizados en MEDEAS se importan desde un archivo Excel denominado “inputs”, en cuya hoja “Climate” se incluyen los parámetros y valores de variables que se emplean en los módulos del ciclo de carbono y el clima de los modelos DICE y C-ROADS. Así, es posible tener claro qué valores comparten y en cuales se diferencian. Los parámetros/variables que es necesario que se compartan en los módulos climáticos de C-ROADS y DICE son los siguientes (*Figura 7.7*):

- *Sensibilidad climática (“Climate Sensitivity”)*. La incertidumbre está presente actualmente en este parámetro explicado en el *Capítulo 2*, y que se refiere a la variación de temperatura como respuesta a una duplicación en la concentración de CO₂. En el modelo de C-ROADS están definidos tres escenarios relativos a la sensibilidad climática: “Deterministic”, “1.5C” y “4.5C”. Esto se incluye en la variable “Climate Sensitivity to 2x CO₂” de la ventana de Vensims “Climate” en el modelo de C-ROADS.

En esta adaptación sustituyo esos escenarios por las cifra empleada para cada escenario en el modelo Medeas para la variable “Climate Sensitivity” (actualizado de DICE-2013R con el valor 2,9 °C) [3]. Esto permite la comparación del comportamiento de las salidas de las dos estructuras, y de su uso a la hora de analizar políticas, que es el fin de este trabajo y en cuyo objetivo no afecta la incertidumbre de ese valor.

- *Valores iniciales (1995)* :
 - CO₂ inicial en la atmósfera (ppm) (“init CO₂ in Atmos ppm”).
 - Concentración de CO₂ preindustrial (“pre industrial value ppm”).
 - Temperatura inicial de la atmósfera y la superficie oceánica (“init Atmos UOcean Temp”)

Climate and carbon cycle parameters (shared)		
init CO ₂ in Atmos ppm	ppm	360,3
pre industrial value ppm	ppm	275
Climate Sensitivity	DegreesC	2,9
init Atmos UOcean Temp	DegreesC	0,585

Figura 7.7: Variables compartidas en DICE y C-ROADS. Imagen del Excel “inputs”.

Hay que tener también en cuenta en esta adaptación que el año de comienzo de simulación en el modelo de C-ROADS (1850) es distinto que en el de MEDEAS (1995). Esto significa que habrá que inicializar ciertas variables “stock” del módulo climático a los valores de la simulación de C-ROADS para 1995, así como introducir nuevos datos exógenos para ese mismo año en otras variables que en C-ROADS son preindustriales.

Por último, para incluir todas las nuevas variables en el modelo, es necesario tener presente que las variables que sean vectores, por ejemplo las que contengan el “Subscript” denominado “Escenarios” (almacenarán un valor para cada escenario de Medeas). Así, todas las variables que dependan de esta también serán un vector, y por lo tanto habrá que añadirles también el mismo subíndice que corresponda. Además, estas variables modificadas también obligarán a modificar las siguientes que dependan de ellas.

7.3.2. Ciclo de Carbono

Para empezar es necesario tener en cuenta que la variable “Total CO2 emissions GTCO2[scenarios]” que engloba las emisiones de origen antropogénico, será una entrada del modelo Medeas para la estructura del ciclo del carbono, al igual que ocurría en el modelo DICE. Además, esta variable es un vector que contiene valores para cada escenario (“subíndice”), y sus unidades son de GtCO₂/Año.

Tal como se ha realizado la descripción de la ventana del ciclo de carbono en C-ROADS, la adaptación también se llevará a cabo por partes, cuyo orden se indica en el siguiente esquema de la estructura del ciclo de carbono de C-ROADS (Figura 7.8).

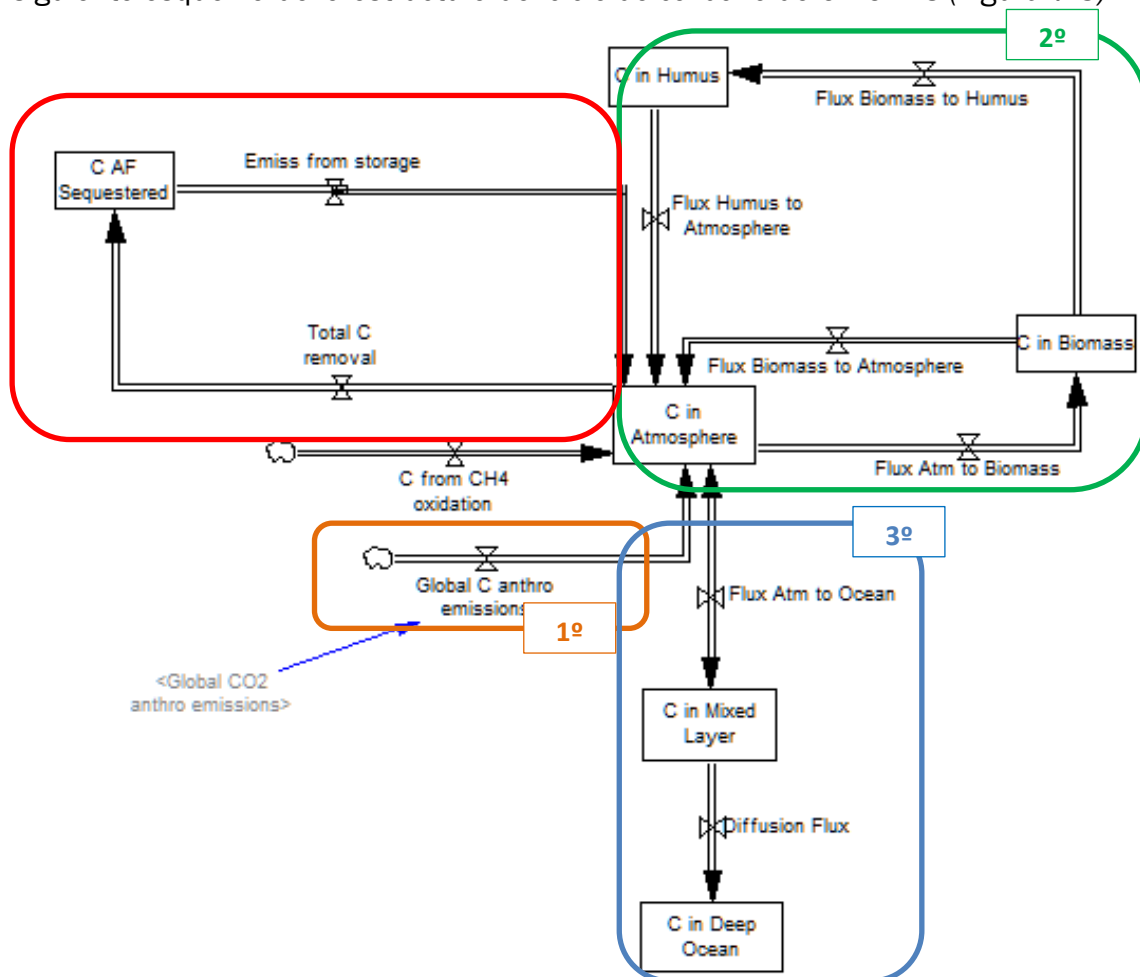


Figura 7.8: Estructura del ciclo de carbono en C-ROADS. En rojo el secuestro de CO₂, en naranja las emisiones de origen antropogénico, en verde la biosfera, y en azul el océano.

En el ciclo de carbono de C-ROADS aparece la influencia del secuestro y almacenamiento de carbono. En el proyecto Medeas se indica que se implementa la aforestación como la única política de secuestro de CO₂, mientras que otras tecnologías como la CCS (captura y almacenamiento de carbono) no se consideran en el estudio debido a su desarrollo incierto y sus beneficios. [7]

Por ello, esta parte del ciclo de carbono de C-ROADS, no es añadida en esta adaptación, considerando que el secuestro de CO₂ está incluido en la variable “Afforestation program 2020 GtCO₂[scenarios]” que aparece restando en la entrada de emisiones de CO₂.

7.3.2.1. Emisiones de origen antropogénico

En esta parte se introducen en el ciclo de carbono las emisiones de carbono de origen antropogénico, que se corresponde a la variable de entrada del modelo Medeas “Total CO₂ emissions GtCO₂”. Las unidades de esta variable son GtCO₂/Año.

En esta adaptación es necesario realizar los cambios de unidades necesarios para lograr obtener finalmente la variable principal de tipo Level “C in Atmosphere” en GtC (gigatoneladas de carbono). Además, se debe indicar un valor inicial de dicha variable. Para que esta cifra sea acorde al tiempo inicial de simulación (1995), se emplea el mismo valor que en el modelo DICE de Medeas, que corresponde al dado por el histórico de Mauna Loa de 1995 de 360.3 ppm.

Por último, se añade la variable de salida al modelo “CO₂ ppm concentrations CROADS”. Sus unidades son de ppm. Esta parte ya adaptada se puede ver en la siguiente Figura 7.9:

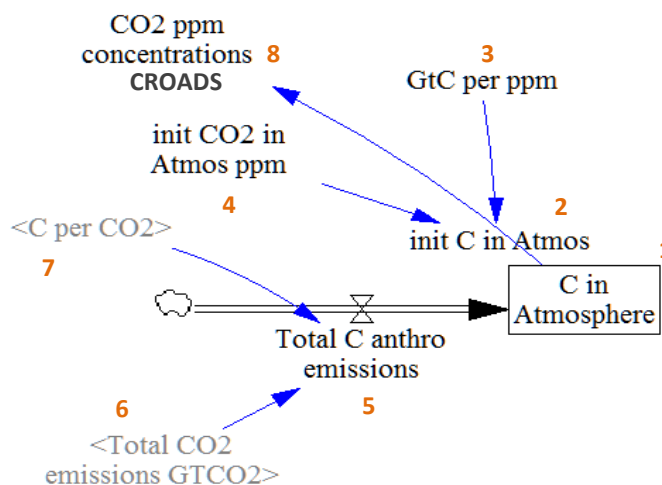


Figura 7.9: Emisiones antropogénicas. (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS). La descripción de las variables, con su correspondiente número como referencia, se puede consultar en el ANEXO 3 (Apartado A3.1.1).

7.3.2.2. BIOSFERA

En segundo lugar se realiza la adaptación de las corrientes referentes a la biosfera. Tal como se explicó en el anterior apartado, la biosfera se simplifica en dos categorías: biomasa y humus. También hay que tener en cuenta que el flujo de carbono de la atmósfera a la biosfera disminuye con el aumento de temperaturas.

En la adaptación de la biosfera, primero comencé incluyendo lo relativo al **humus**, que proviene de la descomposición de los restos orgánicos por organismos y microorganismos (como hongos y bacterias). En segundo lugar introduce los flujos de

biomasa (hojas, ramas, tallos, raíces...).

La estructura de la biosfera adaptada aparece en la siguiente *Figura 7.10*:

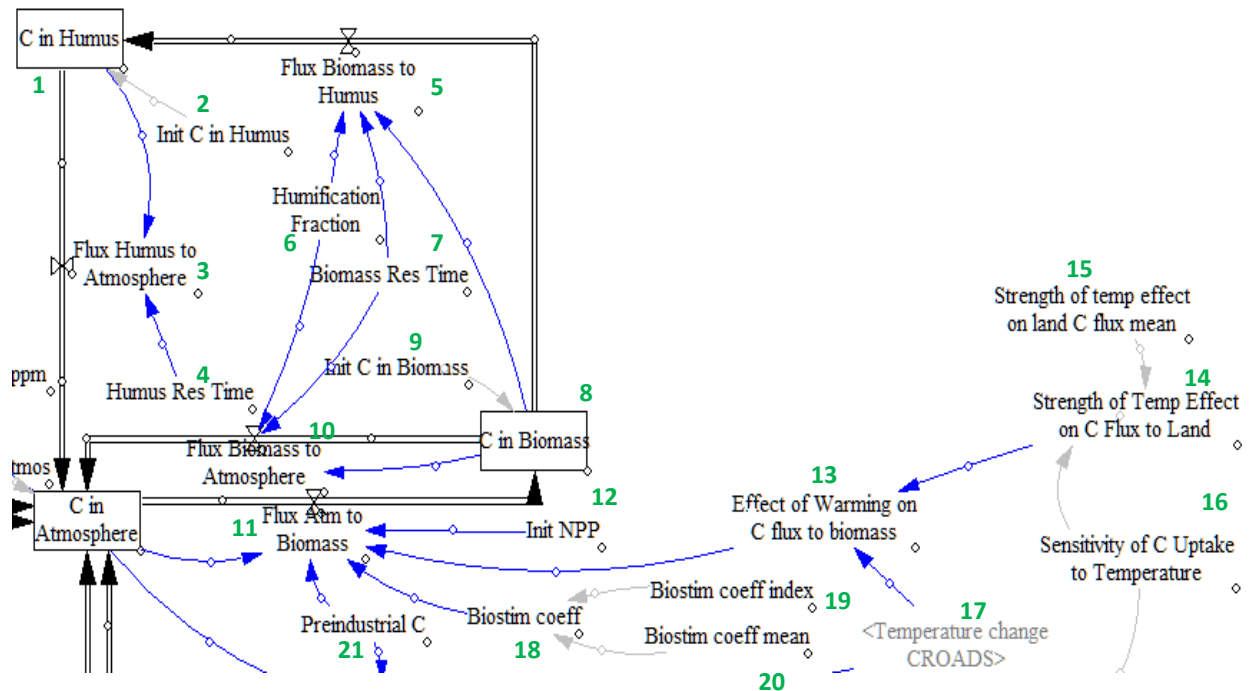


Figura 7.10: Biosfera del ciclo de carbono. (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS). La descripción de las variables, con su correspondiente número como referencia, se puede consultar en el ANEXO 3 (Apartado A3.1.2).

7.3.2.3. OCEANO

En esta tercera parte se adaptó la interacción entre la atmósfera y el océano en el ciclo de carbono. Como ya se vio en el anterior apartado donde se explicaba la base teórica de C-ROADS, estas relaciones se dividen en dos partes: la primera representa la interacción entre la atmósfera y la superficie del océano, y la segunda describe la difusión del carbono en el océano profundo.

Para la segunda parte se tiene en cuenta una capa de mezcla de 100 metros y cuatro capas oceánicas profundas de 300, 300, 1300 y 1800 metros, secuencialmente más profundas. Por ello, es necesario construir un nuevo subíndice que se denomina "Layers" y que permite dotar a las variables a las que se le asigne dicho subíndice del vector siguiente: [Layer1, Layer2, Layer3, Layer 4]. Así, se podrán ir almacenando los datos correspondientes a cada una de las cuatro capas oceánicas de menor (Layer1) a mayor profundidad (hasta Layer4) en las variables intermedias que sean necesarias.

Para crear algunas variables de la estructura del océano, en las que se incluye el subíndice "Layer", es necesario añadir tres "Subranges" o "subintervalos" a dicho subíndice, tal como aparece en el modelo de C-ROADS. De esta manera al definir las ecuaciones en las variables, se podrá hacer referencia a una cierta capa del océano o a un determinado conjunto de capas definidas en su respectivo "Subrange".

Esto es útil sobre todo al definir varias ecuaciones en cada variable, ya que interesará que en cada ecuación se haga referencia a un cierto conjunto de capas "Layers" distintas.

En este caso se añaden los "subintervalos" siguientes (*Figura 7.11*):

- “Bottom”: hace referencia a la última capa “Layer4”.
- “Lower”: llama a las tres últimas capas en el vector: [Layer2, Layer3 y Layer 4].
- “Upper”: se refiere a las tres primeras capas: [Layer1, Layer 2, Layer 3].

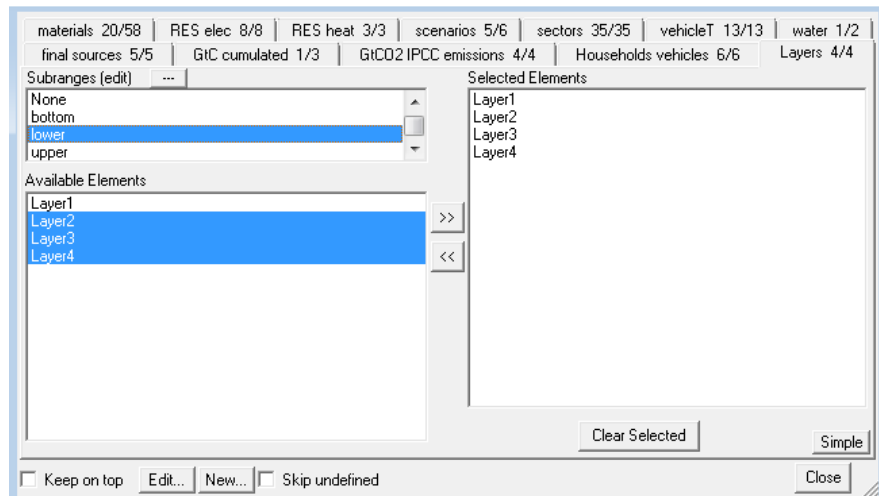


Figura 7.11 : “Subintervalos” del subíndice Layers creados en Vensim.

A continuación se incluye una variable ejemplo (referencia n°17 Figura 7.12) donde se aplican los subintervalos explicados.

- Mean Depth of Adjacent Layers[layer1]= INITIAL((Mixed Depth+Layer Depth[layer1])/2)
 Mean Depth of Adjacent Layers[lower]= INITIAL((Layer Depth[upper]+ LayerDepth[lower])/2)
 Units: meter
The mean depth of adjacent ocean layers.// La profundidad media de las capas oceánicas adyacentes.

En concreto para esta variable hay definidas dos ecuaciones. En la primera ecuación se define el valor de dicha variable para la capa oceánica 1 (Layer1), de esta manera será la media entre la profundidad de la capa de mezcla y la de la propia capa 1 (Layer1).

En la segunda ecuación, se define en cambio el valor para las tres capas restantes utilizando el subrange “lower”: [Layer2, Layer3 y Layer 4]. La ecuación en este caso define cada valor como la media entre la capa inmediatamente superior (empleando el vector definido en “upper: [Layer1, Layer 2 ,Layer 3]) y la capa a la cual estamos llamando en esta variable mediante el subrange “lower”.

El esquema correspondiente aparece en la siguiente Figura 7.12:

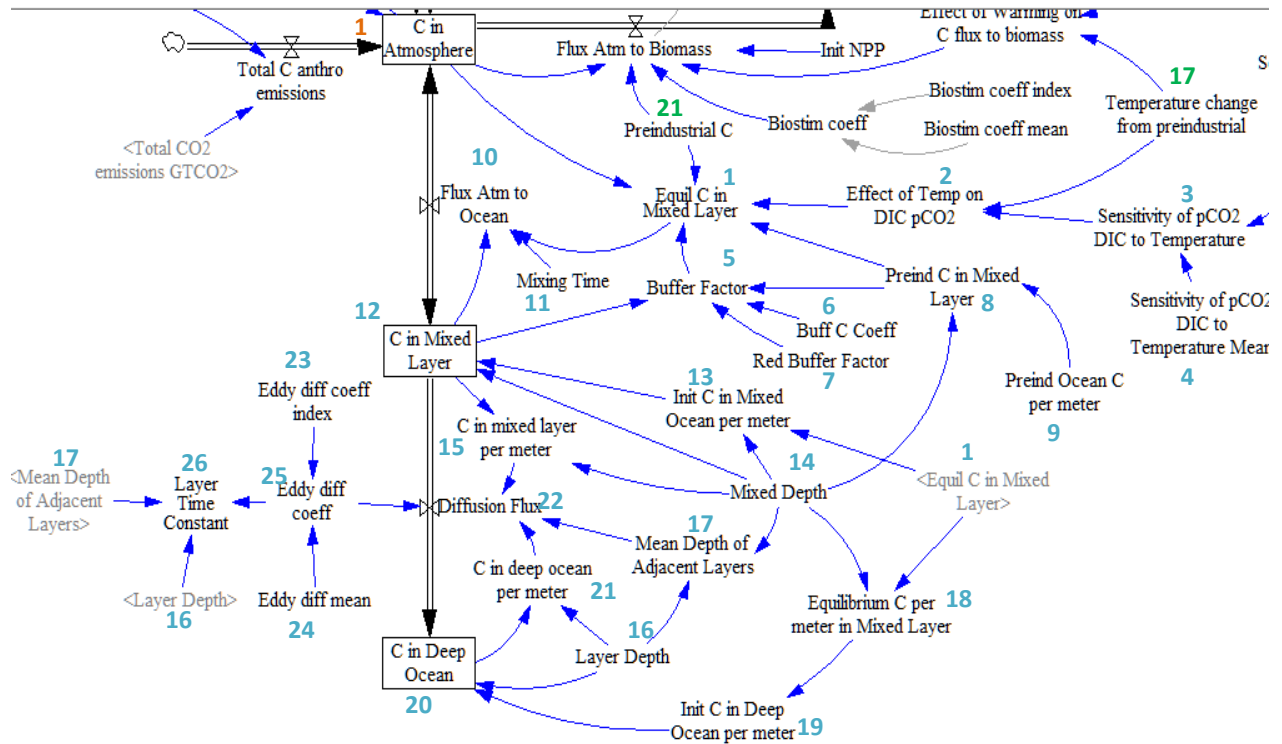


Figura 7.12: Estructura del océano en el ciclo de carbono. (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS). La descripción de las variables, con su correspondiente número como referencia, se puede consultar en el ANEXO 3 (Apartado A3.1.3).

7.3.2.4. FLUJO DE METANO DEL HUMUS Y DE LA BIOSFERA

Se añaden también las emisiones naturales de metano que provienen de la biosfera y del humus. La estructura se presenta en la siguiente Figura 7.13:

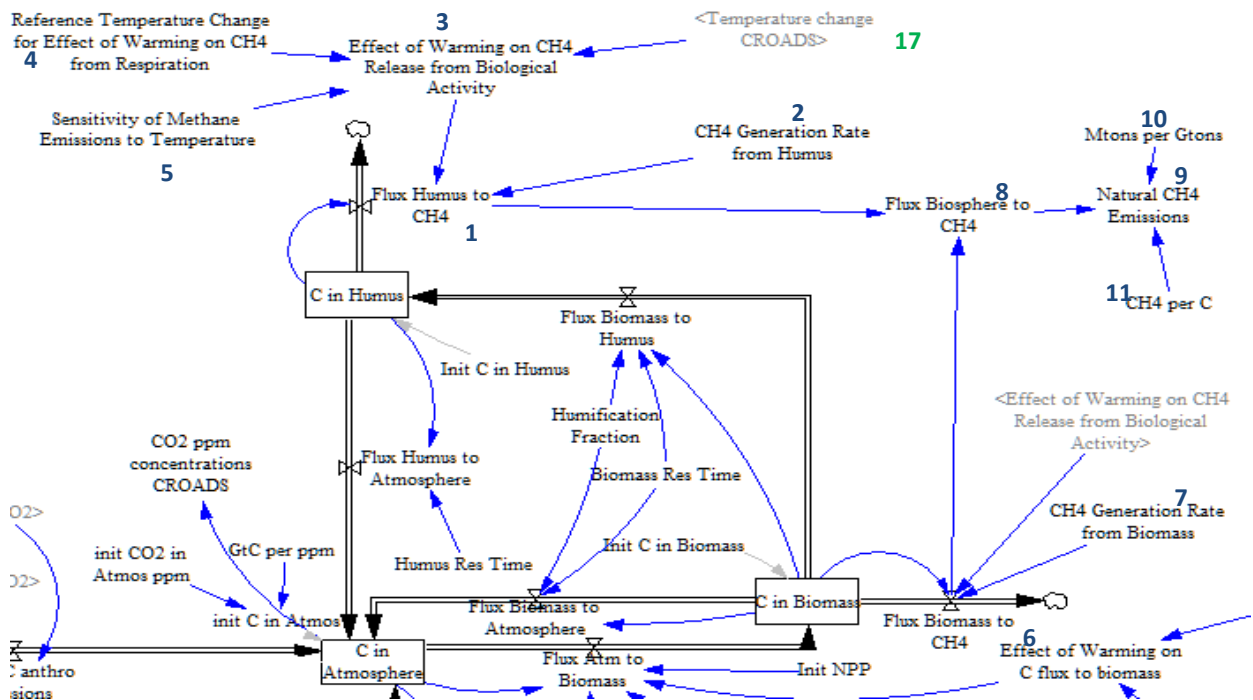


Figura 7.13: Flujo de metano del humus y de la biosfera. (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS). La descripción de las variables, con su correspondiente número como referencia, se puede consultar en el ANEXO 3 (Apartado A3.1.4).

7.3.3. Otros GEI (Gases de Efecto Invernadero)

C-ROADS modela explícitamente otros gases de efecto invernadero. En estos gases se incluyen el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los gases fluorados (PFC, SF₆ y HFC). La estructura general para el ciclo de cada gas aparece en la siguiente *Figura 7.14* (ya presentado en el apartado de teoría) [44]:

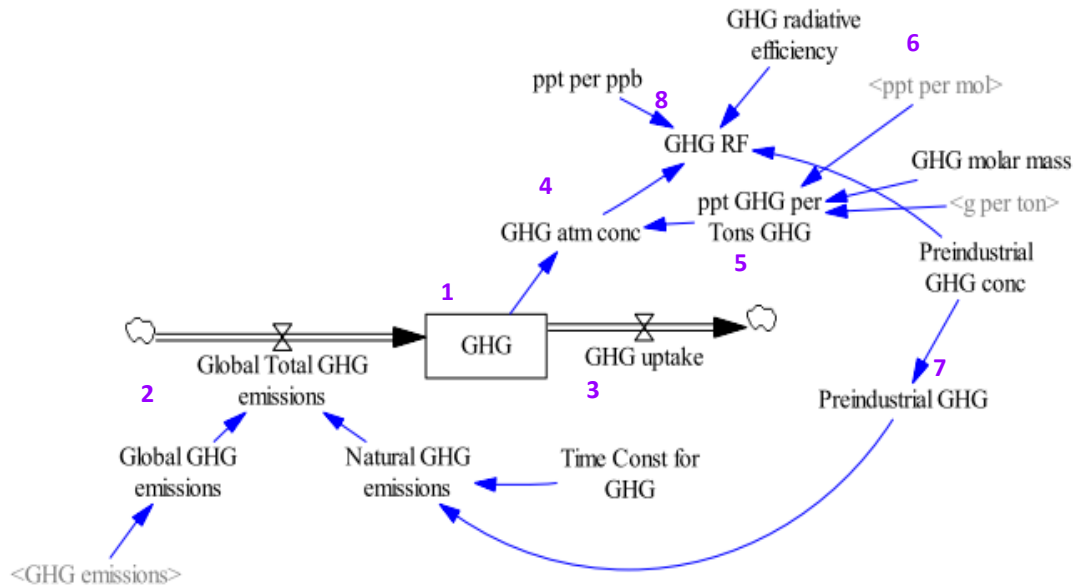


Figura 7.14: Estructura general de los otros GEI en C-ROADS. La descripción de las variables, con su correspondiente número como referencia, se puede consultar en el ANEXO 3 (Apartado A3.2).

Respecto a la masa inicial de cada gas, cabe indicar que en la bibliografía de C-ROADS [44] se indica esta variable como “preindustrial GHG mass”. Dicha variable se refiere al año de inicio de simulación en C-ROADS (1850). En el propio modelo esta variable ya es renombrada como “Initial GHG”. Por ello, para mayor claridad se incluye esta nomenclatura en el presente trabajo debido además a que el año en el que comienza la simulación en MEDEAS es 1995.

Estas concentraciones iniciales para el año 1995 son obtenidas a partir de datos históricos de la NASA (GISS, Goddard Institute for Space Studies) [10].

METANO (CH₄)

Con el fin de completar el ciclo de carbono, se adapta en primer lugar el ciclo del gas metano. Para realizar esta parte de la adaptación es necesario introducir las emisiones antropogénicas globales de CH₄. En C-ROADS viene definido de la siguiente manera:

Global CH₄ anthro emissions=IF THEN ELSE(Test RCP for nonCO₂ GHGs :AND: Time> Last year of CH₄ per GDP data, Selected RCP CH₄ emissions[World], SUM(CH₄ anthro emissions[COP!]))

De esta forma, en función del año indicado y mediante un interruptor, los datos de emisiones de metano antropogénicos tendrán diferente origen. Así, una de las opciones que incluye C-ROADS es que las entradas provengan de la suma de emisiones para cada región (COP). En este caso C-ROADS da la posibilidad de introducir diferentes entradas según el escenario de referencia (RS) (*Figura 7.3*) que se escoja.

Por otro lado, cuando la variable interruptor “Test RCP for nonCO₂ GHGs” lo indique y se supere el tiempo introducido en “Last year of CH₄ per GDP data”, las emisiones provendrán de la variable “Selected RCP CH₄ emissions”, con datos de los escenarios RCP del Quinto Informe del IPCC (AR5). [34]

Como en este trabajo el objetivo es la comparación entre el modelo Medeas basado en el ciclo de carbono simple DICE y el complejo de C-ROADS, y no la observación del comportamiento entre diferentes fuentes de datos, se introducirán en esta variable datos de una sola fuente. Esta fuente de la que se obtendrán los datos de emisiones de los gases de efecto invernadero (excepto el CO₂) son las RCP (Representative Concentration Pathways) [34].

Con el fin de incluir las cuatro trayectorias que contienen las RCP (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5), se añade un interruptor denominado “Choose RCP”. Con esta variable se puede escoger una de las cuatro trayectorias para cada escenario del modelo. Esto permite introducir las emisiones de los otros gases que intervienen en el cálculo del forzamiento radiativo. De esta forma, se incluye en el modelo para cada escenario (llamando a su hoja correspondiente en el Excel) la siguiente ecuación:

Choose RCP=GET XLS CONSTANTS ('inputs.xlsx', 'SCEN1', 'H37')

Units: Dmnl

Choose RCP (Representative Concentration Pathways) 1. RCP 2.6 2. RCP 4.5 3. RCP 6.0 4. RCP 8.5.

Además, se añade un vector a la variable que contiene las emisiones de cada gas. Así cada término del vector hará referencia a una determinada RCP, dentro del cual se escogerá la posición que se indique en la variable “Choose RCP”. Este “Subscripts” o subíndice se denomina “RCP Scenario”.

Por último, hay que añadir, que de forma excepcional, en el caso del gas metano se han incluido los datos de las RCP, pero restando la parte que corresponde a la categoría de “plantas de energía, conversión de energía, extracción y distribución”. Esto se realiza así porque esta parte de las emisiones del metano ya se calcula de forma endógena en el modelo MEDEAS, por lo que la variable que representa esta parte en MEDEAS denominada “Total CH₄ emissions fossil fuels” es sumada a los datos exógenos de RCP.

Así el ciclo de este gas completo se representa en la siguiente *Figura 7.15*:

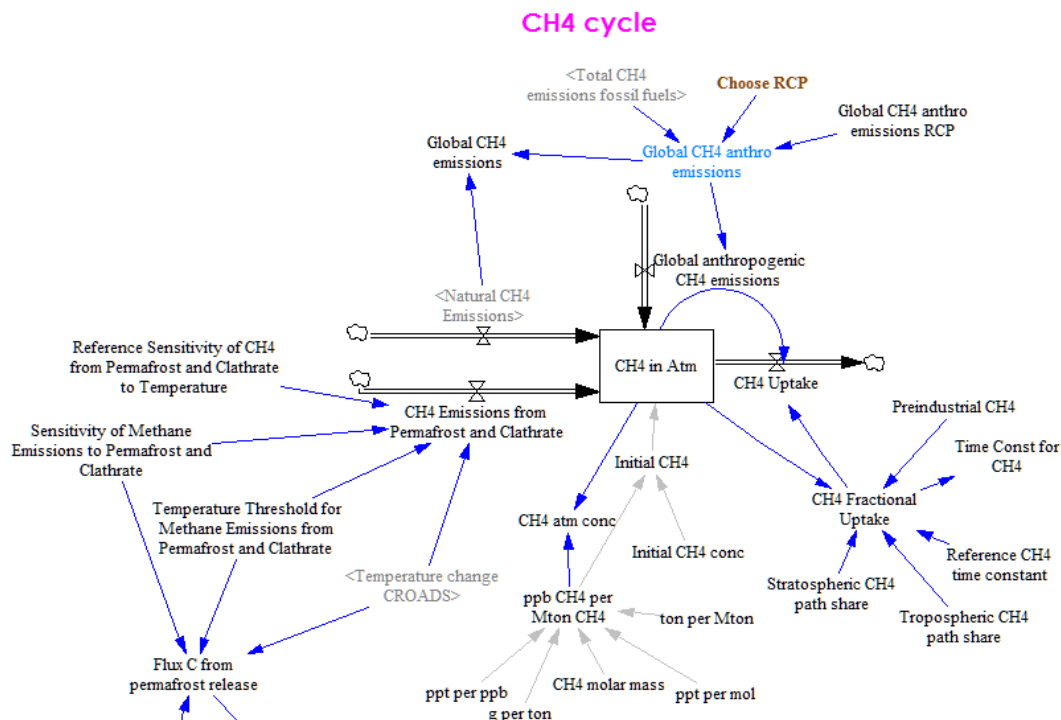


Figura 7.15: Ciclo del metano, CH₄. (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS).

Donde la variable que contiene las emisiones de metano según la trayectoria RCP

escogida tiene la siguiente forma:

```
Global CH4 anthro emissions[scenarios]=Total CH4 emissions fossil fuels[scenarios]+IF THEN
ELSE(Choose RCP[scenarios]=1, Global CH4 anthro emissions RCP[RCP26], IF THEN
ELSE(Choose RCP[scenarios]=2, Global CH4 anthro emissions RCP[RCP45],IF THEN
ELSE(Choose RCP[scenarios]=3, Global CH4 anthro emissions RCP[RCP60], Global CH4 anthro
emissions RCP[RCP85]))
```

Units: Mton/Year

Por otro lado, también había que tener en cuenta que en la fórmula que emplea C-ROADS para la absorción de metano se utiliza la concentración inicial de referencia del metano para su simulación, es decir, el preindustrial. Por ello, aunque el “stock” de metano se inicializa con su valor para 1995 con la variable “Initial CH4”, es necesario añadir su correspondiente preindustrial en la variable “CH4 Fractional Uptake”.

Una vez añadido por completo el flujo de metano (CH4), se introducen finalmente los flujos que faltaban para completar el ciclo de carbono de C-ROADS, es decir, el flujo de C liberado del permafrost, y el flujo de carbono que proviene de la oxidación del metano. (Figura 7.16):

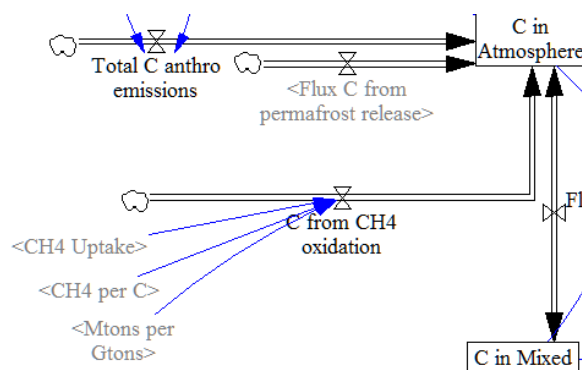


Figura 7.16: Flujo de C liberado del permafrost y flujo de C que proviene de la oxidación del metano. (Adaptado en la ventana “Ciclo de carbono”).

Se basa el proceso de la oxidación del metano en la siguiente fórmula: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$, ya que hay que tener en cuenta que alrededor del 90% del CO que existe en la atmósfera se forma de manera natural en la oxidación del metano (CH4) en reacciones fotoquímicas, y este a su vez se va eliminando por su oxidación a CO2. Este es precisamente el modo de eliminación del metano de la atmósfera:

- $C\ from\ CH_4\ oxidation[scenarios]=CH_4\ Uptake[scenarios]/CH_4\ per\ C/Mtons\ per\ Gtons$
Units: GtonsC/Year

Por otro lado, el permafrost es una capa de la superficie terrestre que se encuentra permanentemente congelada, y bajo la cual se acumulan toneladas de compuestos que pueden potenciar el aumento de temperatura. Dos de los principales gases que pueden liberarse son precisamente el CO2 y el CH4. Por ello, es importante añadir su posible impacto en el ciclo de carbono. Su estructura adaptada aparece en la Figura 7.17

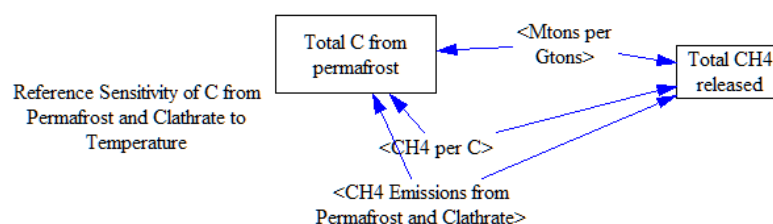


Figura 7.17: Estructura del flujo de C liberado del permafrost. (Adaptación de C-ROADS en MEDEAS).

- *Flux C from permafrost release[scenarios]=Sensitivity of Methane Emissions to Permafrost and Clathrate*Reference Sensitivity of C from Permafrost and Clathrate to Temperature*MAX(0, Temperature change from preindustrial[scenarios]-Temperature Threshold for Methane Emissions from Permafrost and Clathrate)*
Units: GtonsC/Year

Es necesario añadir aquí que este “feedback” del permafrost se encuentra desactivado en la versión estándar de C-ROADS (la variable *Sensitivity of Methane Emissions to Permafrost and Clathrate* posee el valor 0). Debido a ello, en esta adaptación, y por tanto en las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo, también está desactivado.

ÓXIDO NITROSO (N₂O)

Se introduce ahora el ciclo del gas de efecto invernadero N₂O, con el fin de obtener su forzamiento radiativo. Para ello se adapta el de C-ROADS que se basa en el esquema general ya explicado antes (Figura 7.14).

En este caso, al igual que ocurría con el metano, es necesario introducir las emisiones antropogénicas globales de N₂O. En C-ROADS viene definido de la siguiente forma:

Global N2O Anthro Emissions=IF THEN ELSE(Test RCP for nonCO2 GHGs :AND: Time> Last year of N2O per GDP data, Selected RCP N2O emissions[World], SUM(N2O anthro emissions[COP!]))-IF THEN ELSE(Time>Last year of N2O per GDP data :AND: Choose RS<0 :AND: Choose RS>-5 :AND: :NOT: Input Mode for each group=4, Selected RCP Net reduction for natural accounting[World], 0))

De esta forma, los datos de emisiones de óxido de nitrógeno antropogénicos tendrán diferente origen según los escenarios escogidos (RS) y el valor de los interruptores incluidos en su definición. Así, las entradas también pueden provenir de la suma de emisiones para cada región (COP).

Siguiendo la explicación dada al introducir las emisiones de metano, no es el objetivo de este trabajo el mantener los escenarios de referencia de C-ROADS, sino los escenarios que corresponden a MEDEAS, con el fin de la comparación de los dos módulos climáticos (el de DICE y el de C-ROADS). Por ello, en esta variable se introducirán datos exógenos directamente desde el Excel “inputs”, eliminando los escenarios y opciones de C-ROADS.

De esta forma, se introducen los datos en la variable “Global N2O Anthro Emissions” empleando de nuevo la fuente de las RCP (Representative Concentration Pathways) [34]. Hay que tener en cuenta que estos datos antes de introducirlos en el Excel, hace falta que sean adaptados, ya que sus unidades inicialmente son de Mtons de N₂O, y en el modelo los flujos son de Mtons de N. Con la masa molar de cada compuesto/elemento la conversión se realiza fácilmente:

$$Mton N_2O/año * \frac{28 \text{ (peso molecular del N en el } N_2O)}{44 \text{ (peso molecular del } N_2O)} = Mton N/año$$

También aquí se utiliza de nuevo el interruptor ya creado “Choose RCP” y el subíndice “RCP Scenario”, con el fin de coger los datos para cada escenario en función de la trayectoria escogida.

El ciclo para el óxido de nitrógeno (N₂O) se presenta a continuación en la siguiente Figura 7.18:

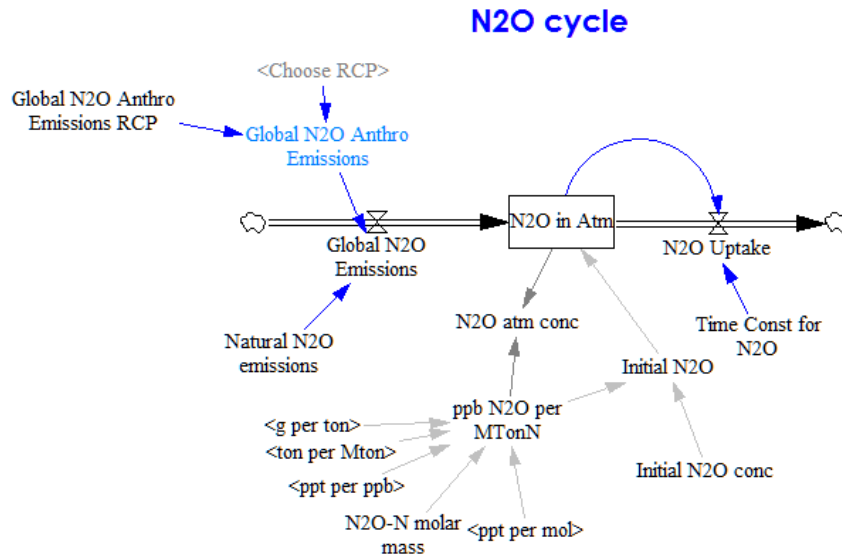


Figura 7.18: Ciclo del óxido de nitrógeno, N₂O. (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS).

PERFLUOROCARBONOS (PFC)

Se adapta ahora el ciclo de los PFC (perfluorocarbonos). Se realiza de forma similar a la del metano y el óxido de nitrógeno.

Respecto a la variable que incluye las emisiones de estos gases, también en este caso los datos se pueden obtener en C-ROADS de diversas fuentes:

- $Global\ PFC\ emissions = IF\ THEN\ ELSE(Test\ RCP\ for\ nonCO2\ GHGs :AND: Time > Last\ year\ of\ F\ gas\ per\ GDP\ data,\ Selected\ RCP\ PFC\ emissions[World] * tons\ per\ kton, SUM(PFC\ emissions[COP!]))$
Units: tons/Year

Se introducen los datos de emisiones de nuevo empleando la fuente de las RCP (Representative Concentration Pathways) [34]. Hay que tener en cuenta que en la bibliografía de C-ROADS [44], se apunta que los PFC se introducen como equivalentes del CF₄ debido a los tiempos de vida largos de los diversos tipos de PFC. Por ello, se cogerán datos de emisiones del gas CF₄.

Además, hay que inicializar la variable stock “PFC in Atm” a su valor para 1995, ya que en C-ROADS el año de comienzo de la simulación es distinto. Para ello se añade al modelo la variable “Init PFC in Atm”, cuyo valor se obtiene a partir de datos históricos de la NASA (GISS, Goddard Institute for Space Studies) [10].

En este ciclo se incluye además el forzamiento radiativo (RF), que como ya se expuso en teoría, se calcula multiplicando cada concentración de gas por el coeficiente radiativo del gas. En esta fórmula se emplean datos preindustriales ya que el forzamiento radiativo se refiere a la variación, en W/m², del flujo radiativo respecto a 1750 (época preindustrial).

- $PFC\ RF = (PFC\ atm\ conc - Preindustrial\ PFC\ conc) * PFC\ radiative\ efficiency / ppt\ per\ ppb$
Units: watt/(meter*meter)

Finalmente, el ciclo del PFC completo adaptado aparece en la siguiente Figura 7.19:

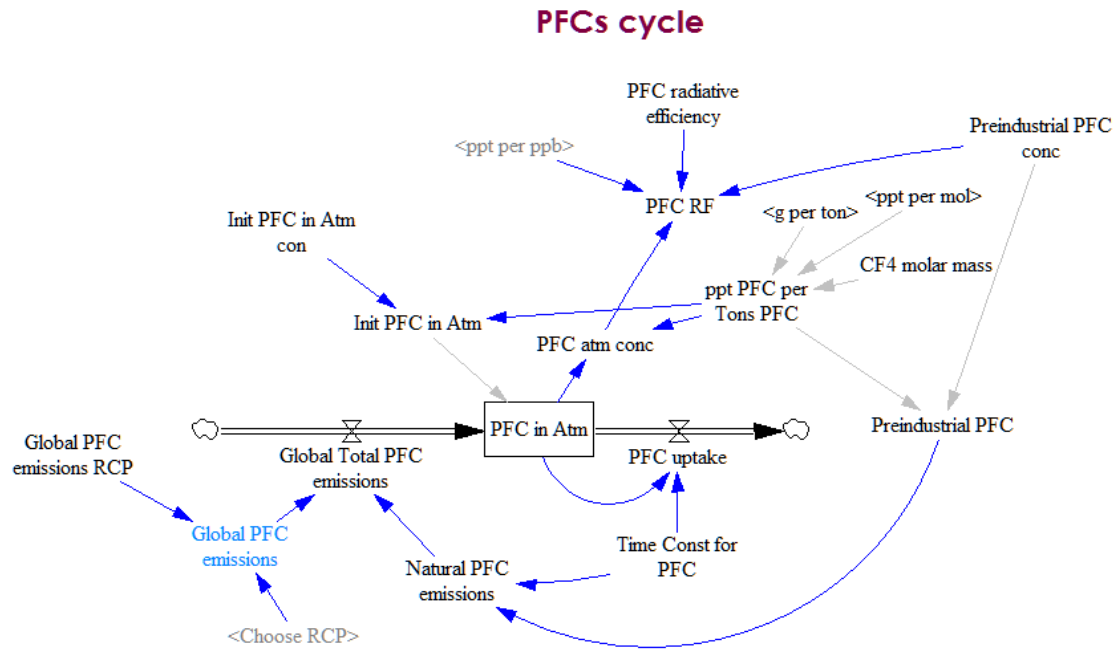


Figura 7.19: Ciclo de los PFC (perfluorocarbonos). (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS).

HEXAFLUORURO DE AZUFRE (SF₆)

Se procede a la adaptación del ciclo del gas SF₆ (hexafluoruro de azufre). Respecto a las emisiones se procede de manera similar a los casos anteriores, incluyendo datos exógenos del de las RCP (Representative Concentration Pathways) [34].

Por último, al igual que ocurría con el ciclo de los PFC, es necesario inicializar la variable stock "SF₆ in Atm" a su valor para 1995. Para ello se añade al modelo la variable "Initial SF₆ con", cuyo valor también se obtiene a partir de datos históricos de la NASA (GISS, Goddard Institute for Space Studies) [10].

El ciclo adaptado por completo aparece en la siguiente Figura 7.20:

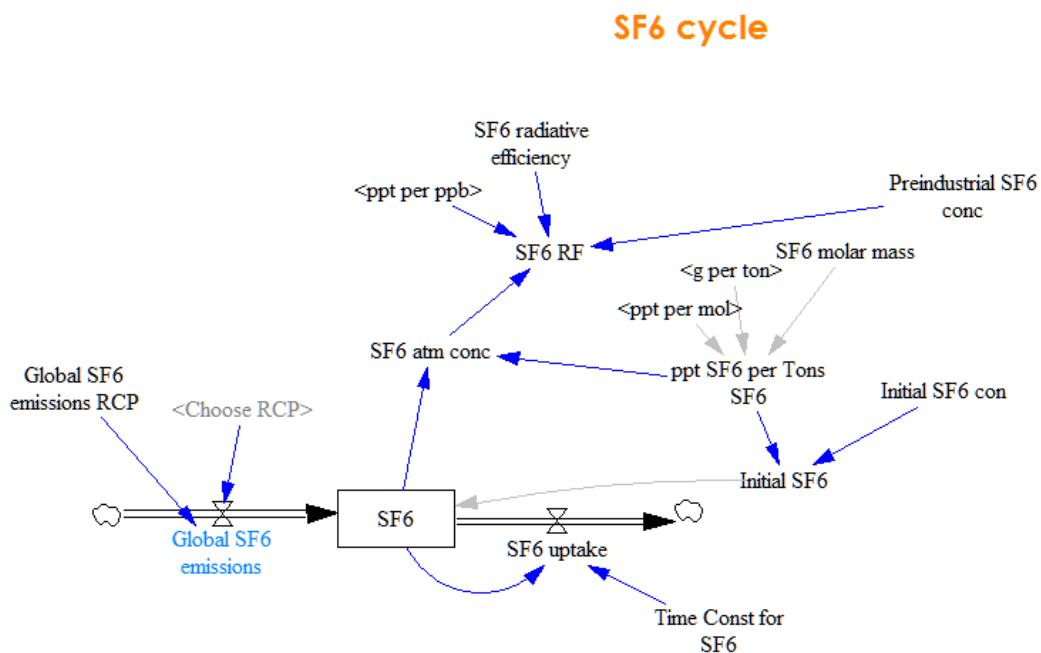


Figura 7.20: Ciclo del SF₆ (hexafluoruro de azufre). (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS).

HIDROFLUOROCARBONOS (HFC)

Por último se adapta el ciclo de los HFC (hidrofluorocarbonos), el grupo más común de gases fluorados. En este caso se incluyen nueve tipos de HFCs con sus correspondientes ciclos independientes cada uno (HFC134a, HFC23, HFC32, HFC125, HFC143a, HFC152a, HFC227ea, HFC245ca, HFC4310mee). Por ello, se añade un nuevo subíndice denominado “HFC type”. Por tanto, su correspondiente forzamiento radiativo (HFC RF) es la suma de los RF de cada tipo de HFC.

Al igual que ocurría con los ciclos de los otros gases, las emisiones en C-ROADS pueden provenir de diferentes fuentes y siguiendo distintos escenarios según la elección del usuario. Por ello, se introducirán estas emisiones de forma exógena y de una sola fuente. Así se procede de la misma forma que en los casos anteriores, incluyendo datos exógenos del de las RCP (Representative Concentration Pathways) [34].

En dicha fuente de datos no se incluyen dos gases (HFC152a y HFC4310mee). Los datos históricos de estos gases se añadirán de la propia simulación de C-Roads. Para estos dos gases, en consecuencia, sólo habrá datos históricos hasta 2014, ya que en las proyecciones de las RCP no están incluidos.

También en este caso es necesario inicializar la variable stock “HFC in Atm” a su valor para 1995. Para ello se añade al modelo la variable “Initial HFC con”, cuyo valor también se obtiene a partir de datos históricos de la NASA (GISS, Goddard Institute for Space Studies) [10].

Así finalmente el ciclo para los gases HFC se representa adaptado en la siguiente Figura 7.21:

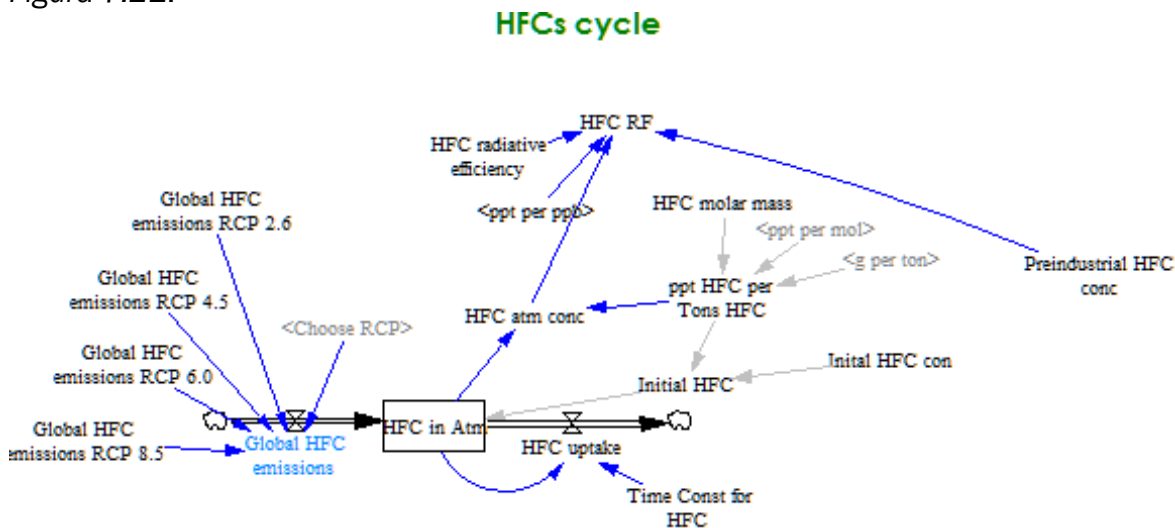


Figura 7.21: Ciclo de los HFC (hidrofluorocarbonos). (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS).

7.3.4. Forzamiento Radiativo

En esta parte de la adaptación se lleva a cabo la introducción de los forzamientos radiativos que se emplean después en la parte del clima mediante la variable “Effective Radiative Forcing”. Para ello se crea una nueva ventana en el modelo denominada “IMPACTS - Radiative forcing C-ROADS”.

A la hora de adaptar esta ventana que proviene de C-ROADS se eliminan algunas partes que no son necesarias en el modelo MEDEAS. Por ejemplo, la variable “Effective Radiative Forcing” incluye la opción de introducir en ella como entradas datos de calibración de forzamiento radiativo de MAGICC 5.3. En este caso se elimina esa parte dejando como única opción a introducir en la variable “Effective Radiative Forcing”, el forzamiento radiativo total (“Total Radiative Forcing”).

Se retira también el interruptor en C-ROADS que permitía al usuario calcular el forzamiento radiativo con datos exógenos de concentración en carbono atmosférico, ya que para el presente trabajo interesa la comparación entre los dos ciclos (DICE y C-ROADS), por lo que sólo es necesario emplear la concentración obtenida a través del ciclo de carbono.

Es necesario recordar que el forzamiento radiativo del CO₂, como ya se explicó en la teoría de C-ROADS, es función logarítmica de la concentración atmosférica de ese gas. Por otro lado, hay también que tener en cuenta los forzamientos radiativos del CH₄, el N₂O, los gases fluorados (PFC, SF₆ y HFC) y de los gases del Protocolo de Montreal (MP). La multiplicación de cada concentración de gas por el coeficiente radiativo del gas produce su forzamiento radiativo instantáneo (RF). Este RF se incluye en la suma de todos los RF para determinar la RF total en el sistema.

Algunos de estos datos son necesarios obtenerlos de fuera. Se trata del forzamiento radiativo de los gases del Protocolo de Montreal (MP). Los otros gases de efecto invernadero son calculados de forma endógena en el modelo a partir de los ciclos antes explicados. Las fuentes de las que proceden los datos para el forzamiento radiativo de los gases MP son las siguientes:

- Datos de concentraciones (unidades: ppt): se obtienen de la página de la NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration), del capítulo 8 de la evaluación científica del agotamiento del ozono (año 2006). [46]
- Eficiencias radiativas (o coeficientes radiativos): proceden de la misma fuente que las concentraciones, en concreto de la Tabla 8-2. [46]

Al multiplicar la concentración de cada gas por sus respectivas eficiencias radiativas se calcula el forzamiento radiativo. Sumando todos los RF de cada gas se obtiene el RF total. La lista de los 16 gases que se incluyen en estos cálculos es la siguiente: CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, CFC-115, CCl₄, CH₃CCl₃, HCFC-22, HCFC-141b, HCFC-142b, Halon-1211, Halon-1202, Halon-1301, Halon-2402, CH₃Br, CH₃Cl.

En esta parte, hay que añadir también un ajuste para la suma del forzamiento radiativo del N₂O y el CH₄. El objetivo es que este RF total sea menor que la suma individual del RF de cada uno, con el fin de tener en cuenta las interacciones entre ambos gases [45]. Las fórmulas empleadas en el ajuste ya se explicaron en este mismo capítulo en la teoría de C-ROADS (Tabla 7.2). El esquema que se añade al modelo se puede ver en la Figura 7.22:

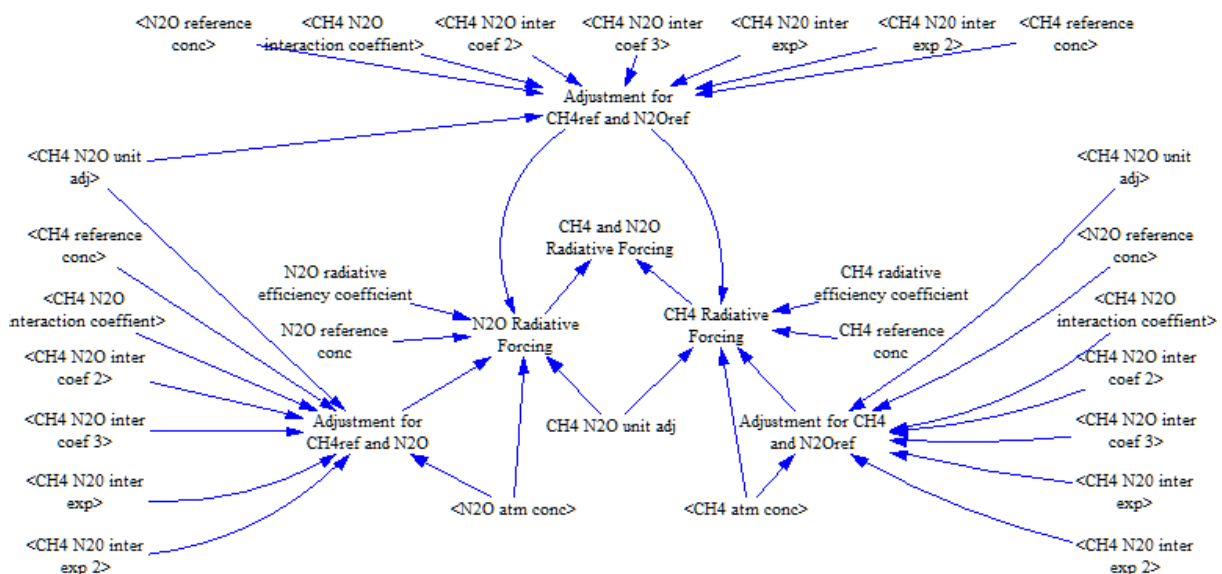


Figura 7.22: Ajuste suma de RF del N₂O y el CH₄. (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS)

Finalmente es necesario añadir el forzamiento radiativo provocado por los gases distintos a los nombrados anteriormente. En C-ROADS se permite escoger entre diversas fuentes de datos: MAGICC, datos modificables por el usuario, o bien datos históricos de GISS [10] hasta 2010 (“Last historical RF year”), uniéndolos con proyecciones RCP.

En el presente trabajo, como ya se ha explicado anteriormente, empleo una sola entrada de datos definida en el Excel “inputs”. En este caso y para que sea acorde a los datos y proyecciones introducidos para los demás gases, la fuente escogida será la de GISS [10] para datos históricos, y la proyecciones RCP [34] para los datos restantes hasta 2050.

Por otro lado, también es necesario añadir los forzamientos solar y de albedo que no están incluidos en las proyecciones RCP a partir del año 2010. Así se obtiene finalmente la variable “Adjusted Other Forcings”.

El esquema adaptado en Medeas de la ventana “Radiative Forcings” de C-Roads aparece a continuación (Figura 7.23):

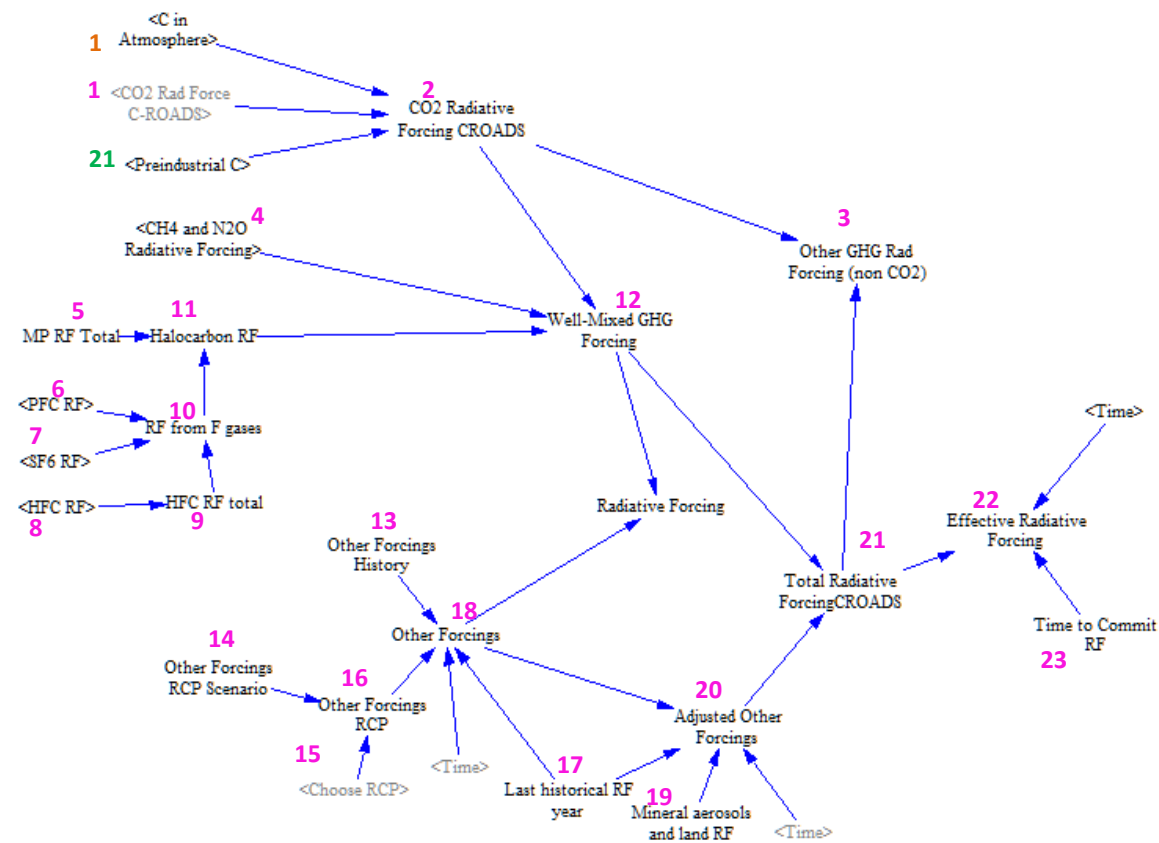


Figura 7.23: Cálculo del forzamiento radiativo. (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS). La descripción de las variables, con su correspondiente número como referencia, se puede consultar en el ANEXO 3 (Apartado A3.3).

7.3.5. Clima

En la adaptación de esta parte del modelo, se crea una nueva ventana “View” en el modelo Medeas que se denomina “IMPACTS – Climate C-Roads”. El submodelo del clima está adaptado del propio modelo DICE [29]. Pero, la estructura de C-ROADS añade además forzamientos explícitos de otros gases (no sólo de CO2).

Es necesario apuntar que el valor de las variables iniciales tiene que corresponder con datos del año de inicialización de la simulación, por lo tanto se cogerán los mismos valores que los de la propia simulación de C-ROADS para el año 1995 para la variable

“Init Deep Ocean Temp”, que contiene cuatro valores (uno para cada capa del océno).

Por otro lado la variable “Init Atmos UOcean Temp” será compartida en los dos modelos, ya que es común en los dos y representa la temperatura de la superficie de la Tierra para el año 1995. Este dato inicial se obtiene de la NASA Goddard Institute for Space (The GISTEMP team), al sumarle el ajuste correspondiente de 0,225 °C para poder tener referencias preindustriales (1850-1900). [47]

Respecto a la variable “Climate Sensitivity” es necesario recordar que los valores corresponderán también con los del modelo “DICE” para cada escenario, con el fin de no añadir más escenarios innecesarios en este trabajo, como ya se explicó anteriormente. En cambio para la variable “CO2 Rad Force Coeff” se utiliza el valor propio del modelo C-ROADS (3,7), a diferencia de DICE que es de 3,8, ya que esto lo he considerado como parte de la propia estructura de C-ROADS e interesante para la propia comparación.

Una vez tenido en cuenta todo lo anterior, hay que saber que la salida que interesa en esta parte del modelo es el cambio de temperatura desde niveles preindustriales. En esta adaptación corresponde esto a “Temperature change C-ROADS”. Dicha variable es representada en una gráfica.

Por otro lado, se han eliminado algunas variables de la versión de C-ROADS que no eran necesarias en esta adaptación, como por ejemplo las que intervenían en la conversión de grados centígrados a grados Fahrenheit.

Respecto a las diferencias claras entre DICE y C-ROADS en este módulo climático, en la versión de C-ROADS hay que recordar que la transferencia de calor desde la superficie hasta la profundidad oceánica se realiza entre capas oceánicas por medio del subíndice “Layers”.

Además, cabe destacar que el modelo de C-ROADS ha reformulado la estructura basada en FREE y DICE convirtiendo las variables que estaban en términos de temperatura (unidades de grados centígrados), a variables basadas en flujos (unidades en “vatios*año/(metros2)”, tal como ya se explicó en apartados anteriores en la teoría. Por ello, se añade en esta estructura dos variables que permiten realizar la conversión de unidades, que son las capacidades de calor volumétricas (tanto para la superficie oceánica como para el océano profundo): “Atm and Upper Ocean Heat Cap” y “Deep Ocean Heat Cap”.

El cálculo de estas variables se ilustra en la siguiente *Figura 7.24*, la cual se basa en S. Schneider & S. Thompson (1981) [48].

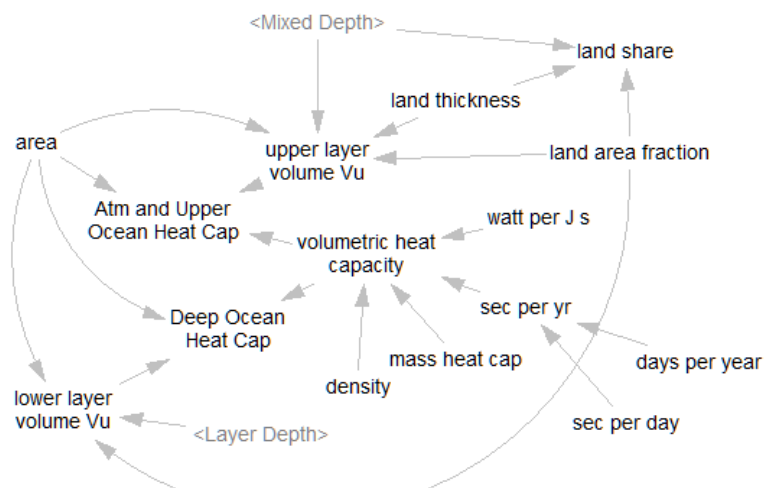


Figura 7.24: Cálculo de las variables “Atm and Upper Ocean Heat Cap” y “Deep Ocean Heat Cap”.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se adapta la ventana de “Climate” de C-ROADS a la ventana “IMPACTS – Climate C-Roads” de Medeas de la siguiente forma (Figura 7.25):

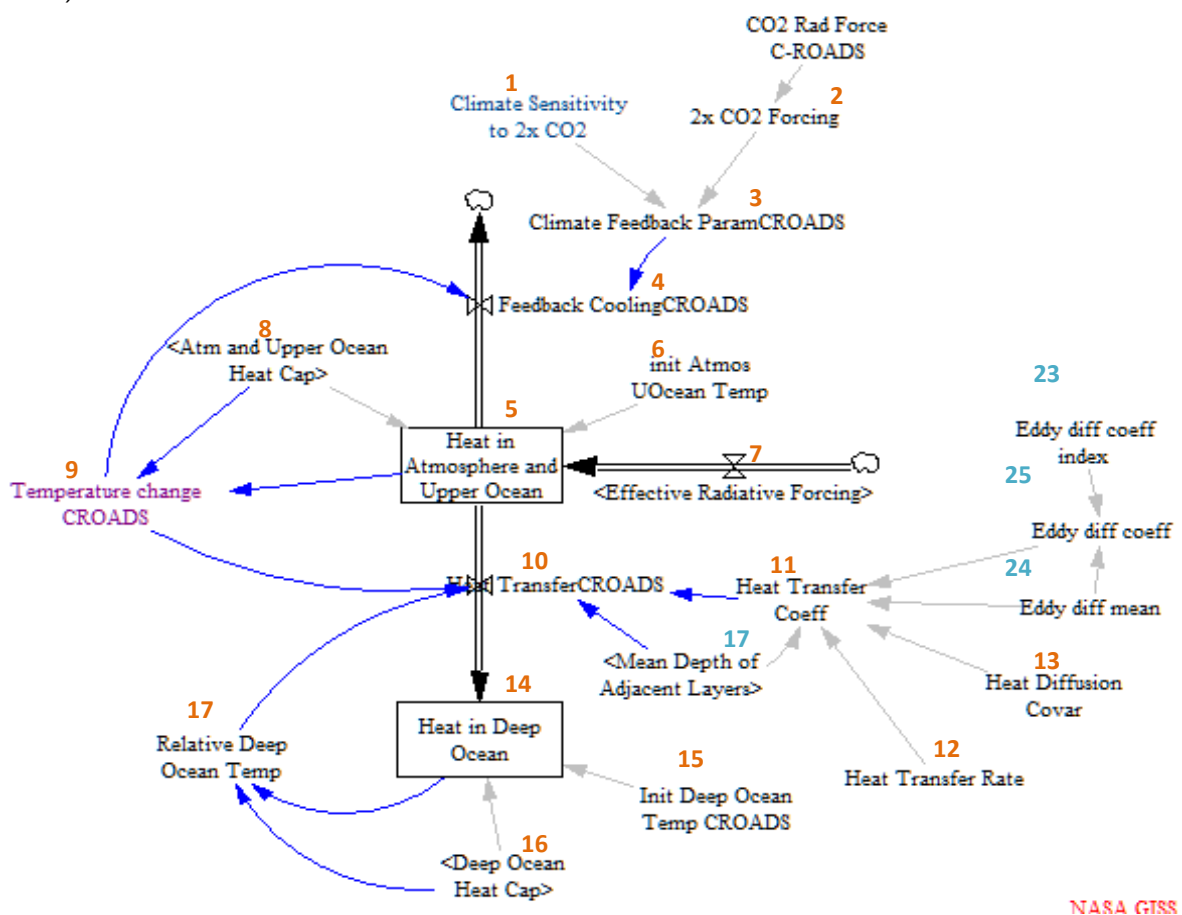


Figura 7.25: Submodelo climático. (Estructura adaptada de C-ROADS en MEDEAS). La descripción de las variables, con su correspondiente número como referencia, se puede consultar en el ANEXO 3 (Apartado A3.4).

7.4. Validación

Con el fin de validar el modelo, a lo largo de la adaptación (mediante gráficas y tablas en Vensim) se va comprobando en todo momento que las variables poseen un comportamiento similar y valores cercanos a los alcanzados en la simulación con el propio modelo de C-ROADS (teniendo siempre en cuenta que las emisiones antropogénicas de CO₂ y CH₄ de los modelos MEDEAS y C-ROADS no coinciden). El modelo C-ROADS se ha construido siguiendo multitud de pruebas de calibración y comparando con otros modelos como MAGICC, por lo que es importante esta comprobación.

Para ello a la hora de simular, se escogen en C-ROADS los escenarios de referencia (RS, Figura 7.3) que corresponden a las trayectorias RCP. Precisamente, es este uno de los motivos por el que la adaptación se realiza por partes.

Como prueba final, se realiza una vez completada la adaptación la comparación de las variables de salida (concentración de CO₂ y temperatura) con sus respectivos datos históricos observados.

Así, la concentración de CO₂ (en ppm) del módulo climático de C-ROADS adaptado en MEDEAS se compara con los datos históricos del observatorio de Mauna Loa [49]:

Validación Concentración CO2

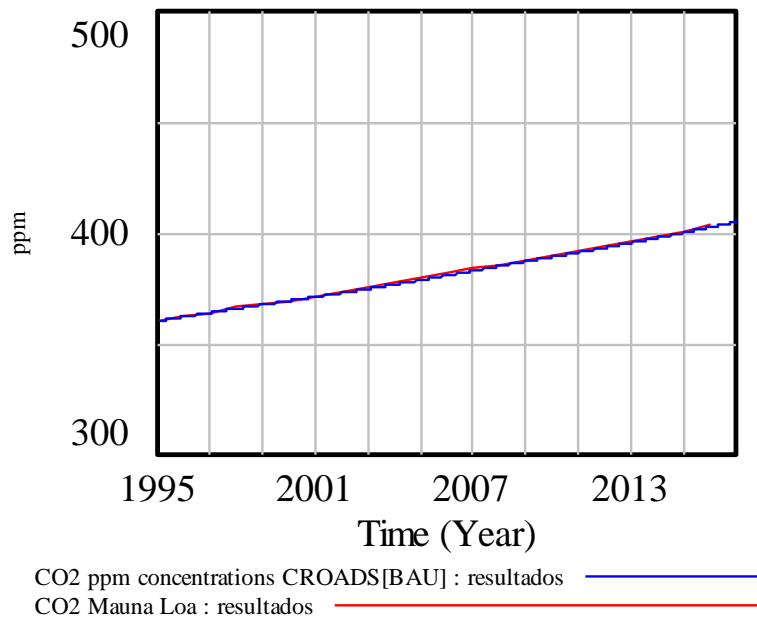


Figura 7.26: Comparación concentración de CO₂ en el modelo adaptado frente a datos históricos.

Como se puede apreciar las dos variables apenas se diferencian, pudiéndose considerar por tanto, un modelo bien calibrado que es capaz de reflejar de forma adecuada la concentración de CO₂ histórica.

Por otro lado, la temperatura de la superficie del modelo adaptado se compara en este caso, al igual que lo hace C-ROADS, con dos fuentes de datos históricos, siendo estas ajustadas también a la referencia preindustrial (1850-1900):

1. NASA (GISS Surface Temperature Analysis). Con un ajuste de +0,225 °C. [50]
2. HadCRUT4 Data (Hadley Centre observations). Con un ajuste de +0,31 °C. [51]

Validación temperatura

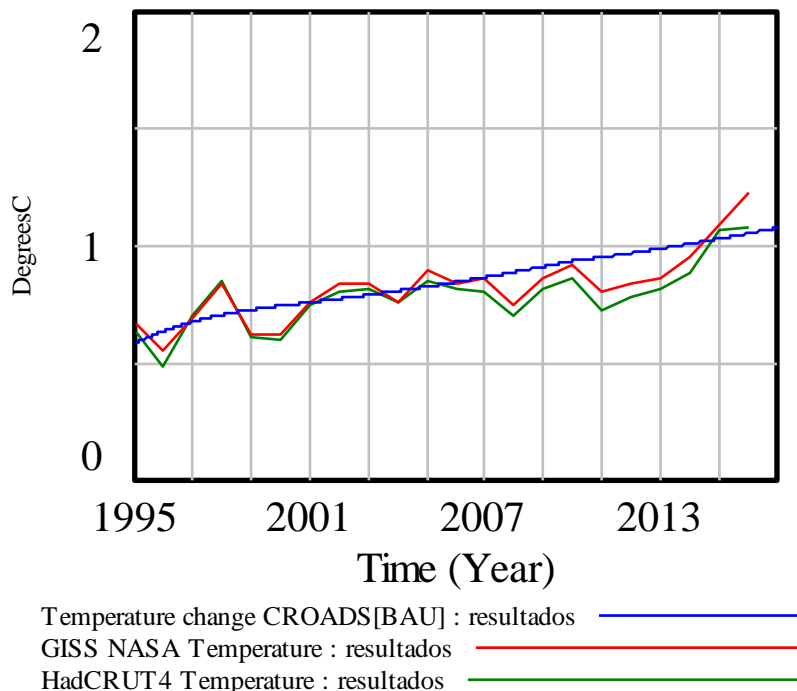


Figura 7.27: Comparación variación de temperatura en el modelo adaptado frente a datos históricos.

Como se puede apreciar la temperatura también se ajusta razonablemente bien a los datos históricos, aunque no de forma tan exacta como lo hacía la concentración de CO₂, ya que la temperatura sufre oscilaciones anuales (como se explicó en el *Capítulo 2*), por lo que es necesario fijarse en la tendencia.

7.5. Resultados simulaciones hasta 2050

Se presentan aquí los resultados de la integración adaptada del C-ROADS en el modelo MEDEAS. En concreto las variables de salida representadas son la concentración en la atmósfera de CO₂ (“CO2 ppm concentrations CROADS[scenarios]”) y la variación de temperatura desde niveles preindustriales (“Temperature change CROADS[scenarios]”).

Como se puede apreciar, las dos variables contienen el vector o subíndice “subscript” denominado “scenarios”, que hace referencia a los cinco escenarios que contiene el modelo MEDEAS y que ya fueron explicados en detalle en el *Capítulo 5*:

- ESCENARIO 1: Optimismo económico con cierta reforma del mercado (Economic optimism with some market reforming): globalización y rápido crecimiento económico.
- ESCENARIO 2: Desarrollo global sostenible (Global Sustainable Development): protección del medio ambiente y reducción de la desigualdad.
- ESCENARIO 3: Competición regional (Regional competition/regional markets): regiones se centran en su autosuficiencia y seguridad, con poca atención en bienes comunes.
- ESCENARIO 4: Desarrollo regional sostenible (Regional Sustainable Development): búsqueda de soluciones regionales para problemas ambientales y sociales actuales.
- ESCENARIO BAU (Business-As-Usual): continuación de las tendencias históricas.

Por ello, los resultados variarán según el escenario, ya que la entrada de emisiones de CO₂ y de CH₄ es distinta para cada uno de estos escenarios, y también la entrada de emisiones de otros GEI, que procede de las trayectorias RCP, en concreto para cada escenario la RCP que se aplica es la siguiente:

- Escenario 1: Se le aplica la ruta RCP 8.5, debido a su alto crecimiento económico y globalización.
- Escenario 2: En este caso se añade una alta mitigación (RCP 2.6), debido a la protección proactiva del medio ambiente presente en este escenario.
- Escenario 3: Para este escenario se usa la RCP 6.0, debido a su menor crecimiento económico y mayor regionalización respecto al escenario 1.
- Escenario 4: En este caso se aplica al igual que en el escenario 2, la ruta RCP 2.6, debido a la protección proactiva del medio ambiente (escenario sostenible).
- Escenario BAU: Siguiendo las recomendaciones del propio C-ROADS, en el que la RCP empleada por defecto es la 8.5. (*Figura 7.3*).

Es necesario apuntar también en este capítulo que para las simulaciones en el presente trabajo se desactivan las restricciones de disponibilidad de energías fósiles, la tasa de retorno energético y los impactos del cambio climático que incluye el modelo MEDEAS [7], con el fin de poder comparar los modelos C-ROADS y DICE en su forma original, como ya se explicó en el capítulo anterior.

Así, las gráficas de las emisiones de CO₂, la concentración de CO₂ en la atmósfera y la variación de la temperatura del modelo adaptado se presentan a continuación. La simulación se corre hasta el año 2050.

Como se puede observar en la siguiente gráfica de las emisiones de CO₂ (Figura 7.28), las emisiones aumentan en todos los escenarios, debido al crecimiento económico común en todos ellos, siendo los de menor crecimiento los escenarios que asumen que la tendencia a profundizar la globalización se revertirá resultando en economías más aisladas en las próximas décadas (escenarios 3 y 4).

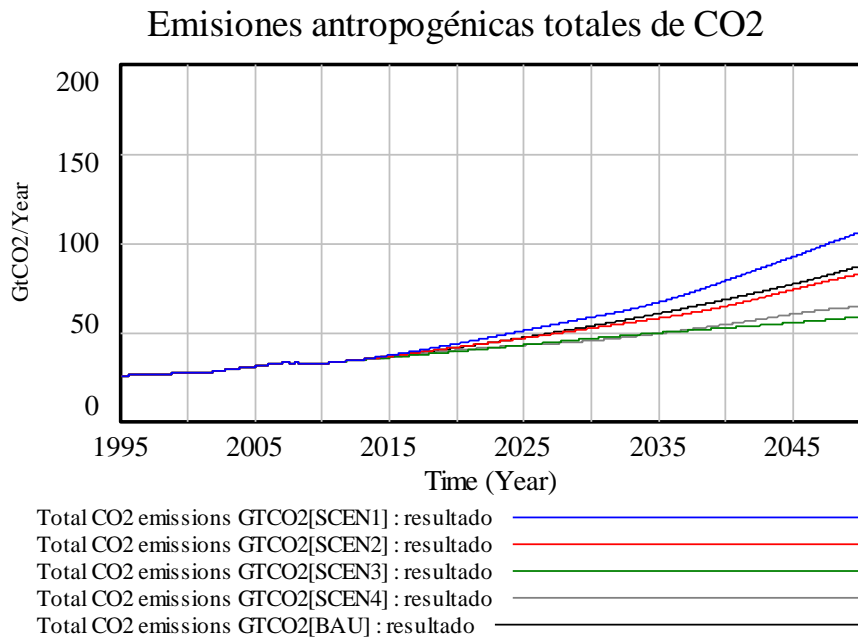


Figura 7.28: Emisiones totales de CO₂ de origen antropogénico. Variable de entrada en el módulo climático de C-ROADS adaptado en MEDEAS.

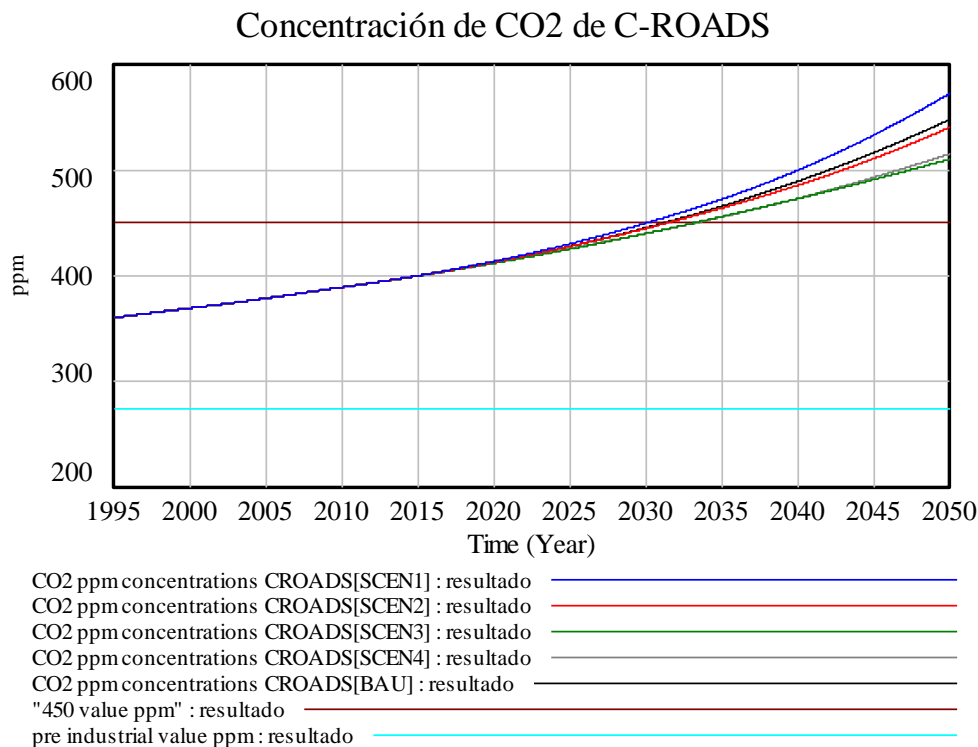


Figura 7.29: Concentración de CO₂ (ppm). Salida del módulo climático de C-ROADS adaptado en MEDEAS.

Por otro lado, la concentración de CO₂ que se obtiene de esta adaptación del módulo climático de C-ROADS, se relaciona claramente con la entrada de emisiones de los distintos escenarios que incluye MEDEAS. La mayor concentración se obtiene lógicamente para el escenario 1 de optimismo económico con un valor de aproximadamente 572 ppm.

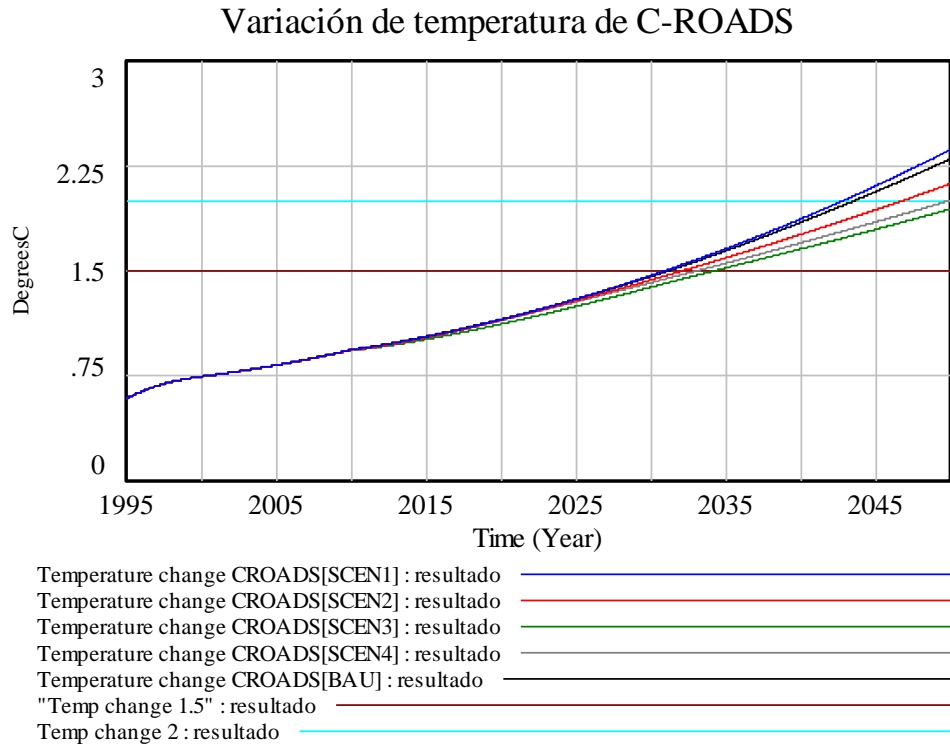


Figura 7.30 Variación de temperatura en °C respecto a niveles preindustriales. Salida del módulo climático de C-ROADS incluido en MEDEAS.

Por otro lado, la temperatura (Figura 7.30) cambia en relación a las tendencias de los escenarios en las emisiones y en la concentración de CO₂. Así se puede ver que el escenario BAU se aproxima más al escenario 1, alejándose del escenario 2. Esto se debe a la influencia del forzamiento radiativo de los otros gases de efecto invernadero, ya que las emisiones de estos gases se obtienen de forma exógena de las trayectorias RCP. En el caso del escenario 2, se aplica una alta mitigación (RCP 2.6), en cambio, se le aplica a los escenarios 1 y BAU la RCP con mayores emisiones (RCP 8.5).

La mayor temperatura que se alcanza en el MEDEAS con el módulo climático de C-ROADS adaptado, es para el escenario 1, y es de aproximadamente 2,4 °C para el año 2050. Por otro lado, se supera el límite de temperatura de 2 °C ya en el año 2042 para el escenario 1. Ese límite es superado en casi todos los escenarios antes del año 2050, exceptuando el escenario 3, que por poco no alcanza los 2 °C (1,9 °C).

Estos resultados son consistentes también con los escenarios BAU de otros modelos IAM existentes en la literatura, que proyectan un rango de emisiones en ese año de 75-100 GtCO₂ y 1,5-2,25 de incremento de temperatura en el año 2050 (ver Figura 2.6 incluida en el Capítulo 2, procedente del IPCC AR5 [13]).

8. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DICE Y C-ROADS

En este capítulo se comparan los resultados que se obtienen en MEDEAS con cada uno de los dos módulos climáticos. Es necesario recordar que la simulación en el modelo MEDEAS comienza en el año 1995, y que se desactivan las restricciones de disponibilidad de energías fósiles, la tasa de retorno energético y los impactos del cambio climático que incluye el modelo MEDEAS, con el fin de poder comparar los modelos C-ROADS y DICE en su forma original, como ya se explicó anteriormente en los dos capítulos anteriores.

En este Capítulo, por simplicidad nos concentramos en dos siguientes escenarios:

- Escenario 2: Desarrollo global sostenible (Global Sustainable Development): protección del medio ambiente y reducción de la desigualdad.
- Escenario BAU: (Business-As-Usual): continuación de las tendencias históricas.

8.1. Comparación con los datos históricos

Se compara en la siguiente gráfica los resultados de la simulación del módulo climático en DICE y en C-ROADS, con datos históricos de la concentración de CO₂ atmosférica (datos del observatorio de Mauna Loa [49]):

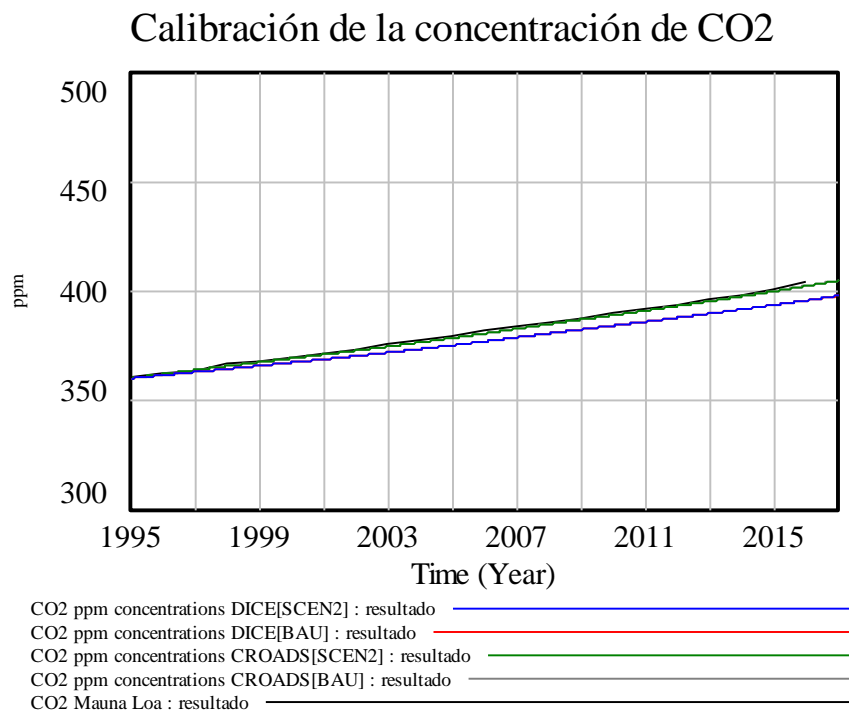


Figura 8.1: Comparación de la concentración de CO₂ en los dos modelos de DICE y C-ROADS frente a datos históricos.

Como se puede comprobar en la *Figura 8.1*, los datos históricos (línea negra) se aproximan mucho a la concentración calculada por el módulo de C-ROADS (línea verde). En cambio, en el que corresponde al modelo DICE quedan sus valores por debajo, siendo peor su calibración.

Cabe añadir que en los dos casos, a pesar de representar dos escenarios, aparece a primera vista sólo un color para cada modelo (verde y azul). Esto se debe a que son datos históricos, por tanto en este intervalo de tiempo los escenarios futuros aún no

influyen en la tendencia.

Por otro lado, los datos históricos correspondientes a la variación de temperatura respecto niveles preindustriales (1850-1900) se presentan en la siguiente *Figura 8.2*. Como ya se explicó en el anterior capítulo las fuentes de los datos históricos son las dos siguientes:

1. NASA (GISS Surface Temperature Analysis). [50]
2. HadCRUT4 Data (Hadley Centre observations). [51]

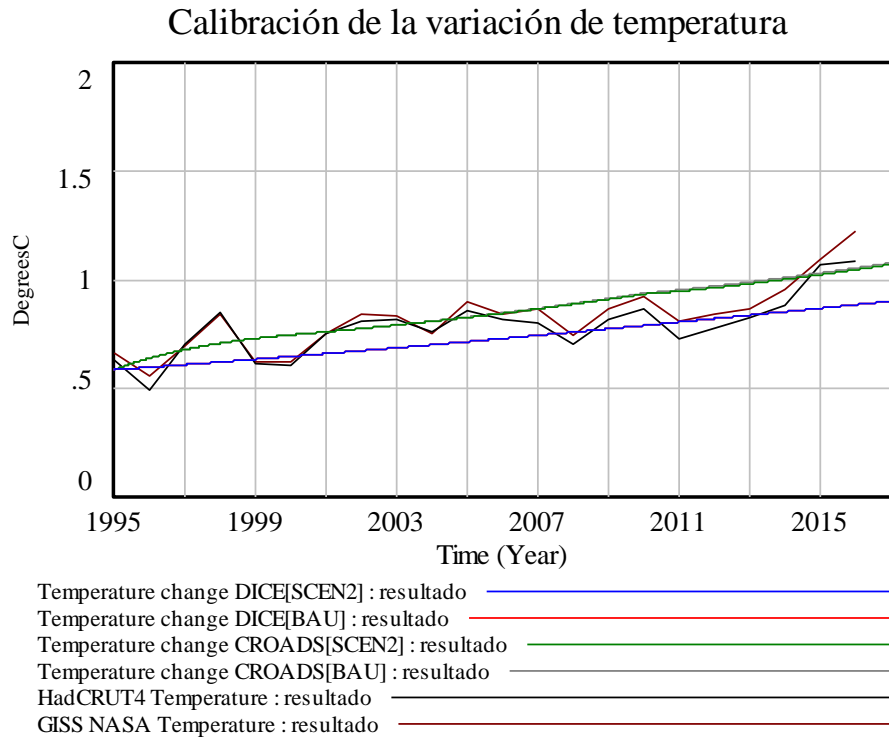


Figura 8.2: Comparación de la variación de temperatura respecto niveles preindustriales en los dos modelos de DICE y C-ROADS frente a datos históricos.

En este caso, debido a las oscilaciones de la temperatura cada año es más difícil averiguar cuál de los dos modelos es capaz de simular mejor la tendencia pasada de variación de temperatura. Parece a simple vista que el modelo de C-ROADS (línea verde) se aproxima a los valores “más tiempo”, incluyendo el crecimiento de los últimos tres años. En cambio hay un periodo desde el 2008 al 2012, en el que la temperatura se aproxima más a DICE (son valores más bajos).

Para poder obtener una mejor comparación se ha calculado para cada año la suma de las diferencias (en valor absoluto) de DICE y de C-ROADS respecto a las dos fuentes históricas, obteniendo como resultado que C-ROADS se aproxima mejor a las dos fuentes de datos, ya que la suma de las diferencias es menor:

		Suma total diferencias absolutas (°C)
GISS NASA	C-ROADS	1,6541
	DICE	2,3106
HadCRUT4	C-ROADS	1,9561
	DICE	1,9608

Tabla 8.1: Suma total de las diferencias absolutas entre los modelos DICE y C-ROADS respecto datos históricos.

Para mayor claridad se añade una línea de tendencia para cada serie de datos históricos mediante EXCEL en la *Figura 8.3*, viendo que efectivamente C-ROADS resulta en una mejor aproximación respecto a los datos históricos de GISS NASA. En cuanto a la calibración respecto a los datos de HAdCRUT4 la diferencia entre DICE y C-ROADS es apenas apreciable.

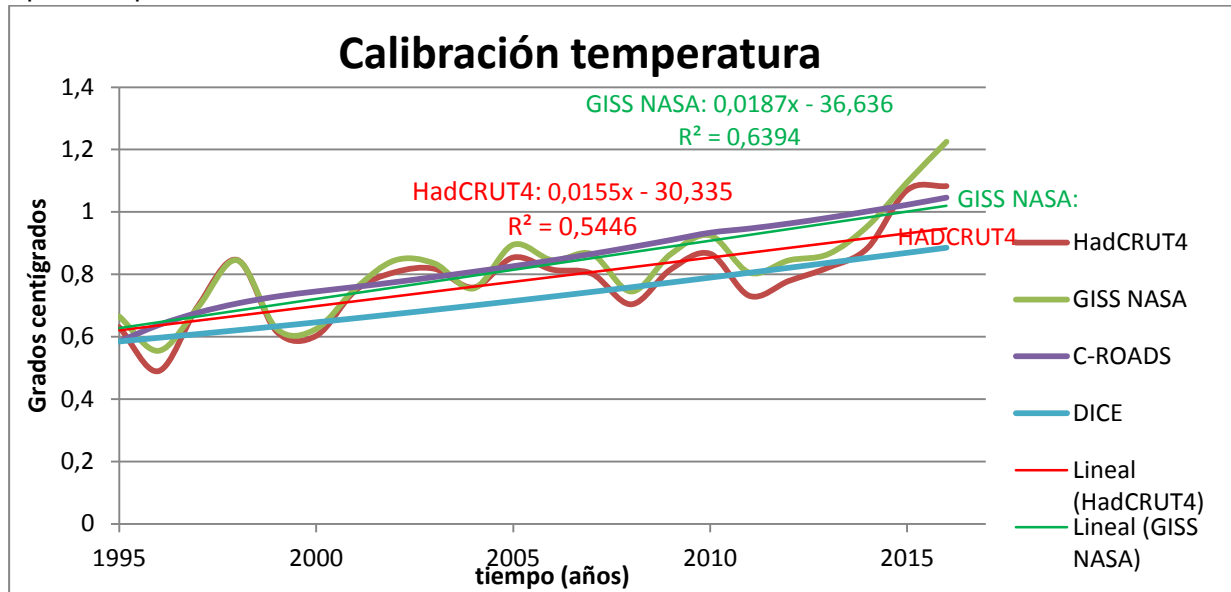


Figura 8.3: Comparación de la variación de temperatura en los dos modelos de DICE y C-ROADS frente a datos históricos. Se añaden líneas de tendencia para los datos históricos.

8.2. Comparación concentración de CO₂

En este apartado se comparan los resultados de concentración de CO₂ para cada uno de los modelos. La gráfica correspondiente se puede ver en la siguiente *Figura 8.4*:

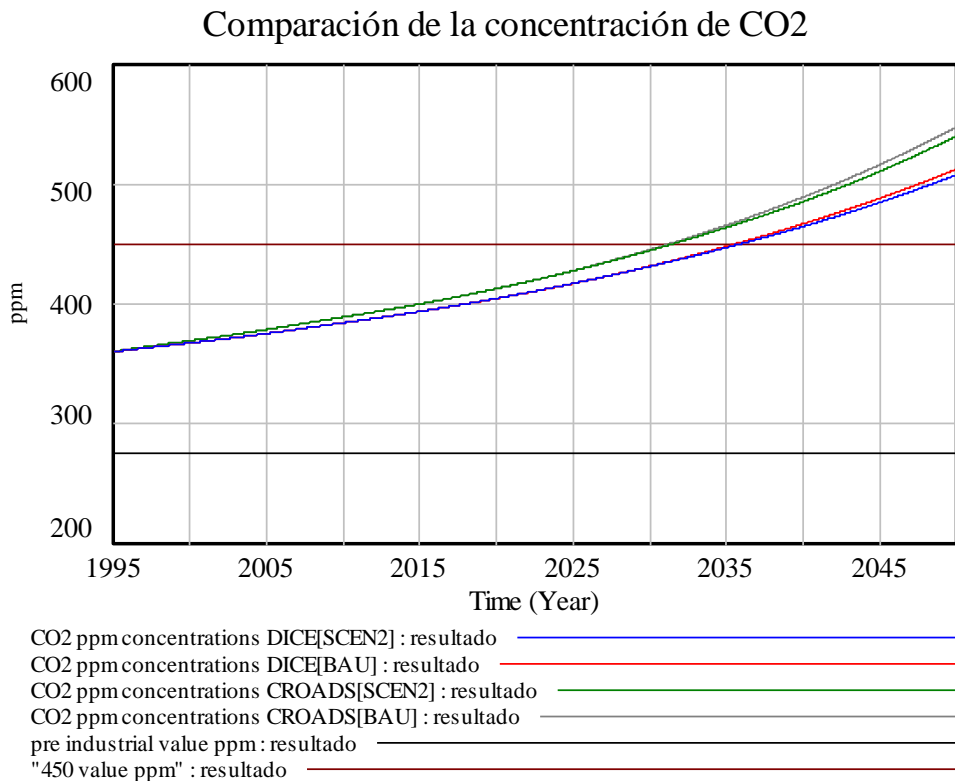


Figura 8.4: Gráfica de comparación entre DICE y C-ROADS de la concentración de CO₂ atmosférica

En este caso se pueden observar claramente las diferencias que ya se encontraban en la *Figura 8.1* de calibración. C-ROADS sitúa los valores de concentración atmosférica de CO₂ por encima de DICE, llegando en 2050 a aproximadamente 540 ppm (540 ppm en el escenario BAU y 548 ppm en el escenario 2).

Por otro lado, DICE apenas supera las 510 ppm en 2050 (en concreto 508 ppm en el escenario BAU y 513 ppm en el escenario 2). Esto quiere decir que el almacenamiento o absorción de CO₂ por los sumideros en el ciclo de carbono del modelo DICE es mayor. En cambio, en C-ROADS la concentración de CO₂ en la atmósfera aumenta, absorbiendo los sumideros un menor porcentaje de las emisiones de este gas.

Otra de las diferencias, es que, a pesar de que comparten las mismas emisiones de CO₂ los dos modelos, y por tanto también lo hacen los dos escenarios representados, la distancia en la gráfica entre los escenarios es algo mayor en C-ROADS (aproximadamente un 1,4% de diferencia en C-ROADS y en cambio un 0,9% en DICE).

Esto se debe a la diferencia en el forzamiento radiativo de otros gases de efecto invernadero, debido a que en C-ROADS para cada escenario se ha incluido una trayectoria RCP distinta. Hay que apuntar también que el forzamiento radiativo de otros gases que no sean el CO₂, solo afecta en C-ROADS, ya que este incluye “feedbacks” de la temperatura en el ciclo de carbono (al aumentar la temperatura la absorción de CO₂ por la biomasa y el océano disminuye).

8.3. Comparación forzamiento radiativo total

A continuación se comparan los resultados de forzamiento radiativo para cada uno de los dos modelos DICE y C-ROADS implementados en MEDEAS (*Figura 8.5*).

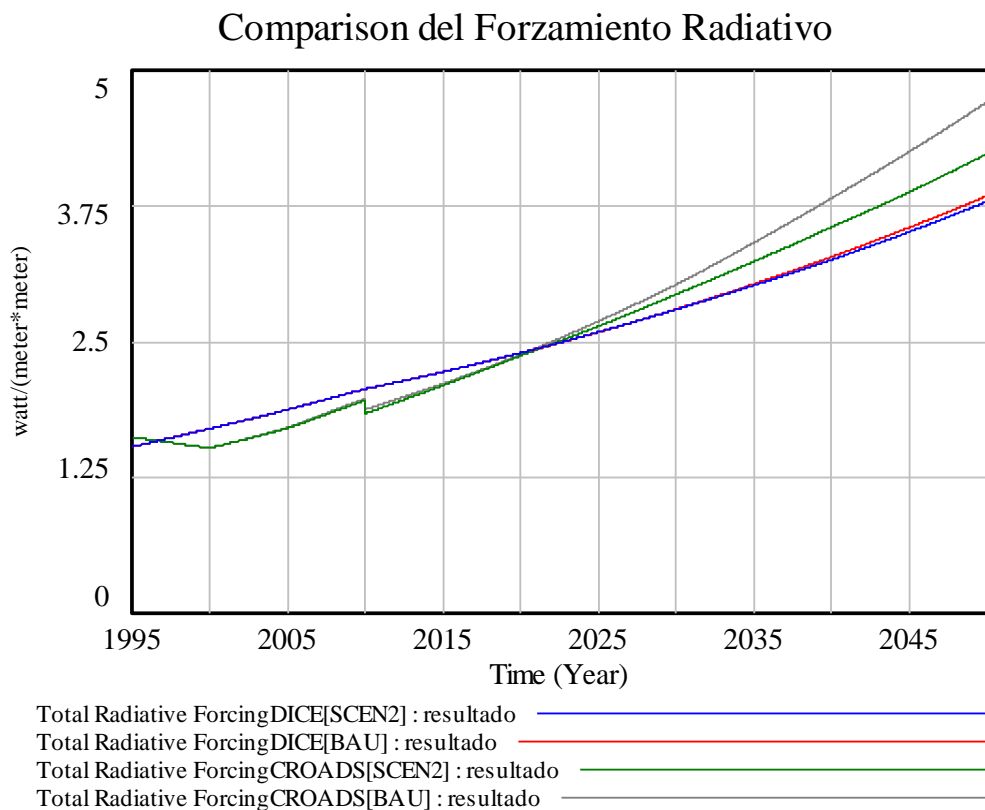


Figura 8.5: Grafica de comparación del forzamiento radiativo entre DICE y C-ROADS.

Como ya se apuntaba en la comparación de la concentración de CO₂, la distancia entre los dos escenarios simulados en el modelo C-ROADS es mayor que en DICE, viéndose esta diferencia más clara en esta gráfica.

Esto se debe a los datos exógenos de emisiones de otros gases de efecto invernadero distintos al CO₂ que se incluyen en el modelo C-ROADS y que proceden de las trayectorias RCP del Quinto Informe del IPCC (AR5). Al contrario que en DICE, que incorpora una sola ruta RCP, en concreto la RCP 6.0, C-ROADS permite escoger entre las distintas rutas para cualquiera de los cinco escenarios, ya que tiene incorporadas todas.

Es necesario recordar también, que en el caso de DICE la entrada de forzamiento radiativo es exógena, mientras que en C-ROADS los datos exógenos son las emisiones de otros GEI, ya que los ciclos de estos gases están incluidos en el modelo, calculándose de forma endógena el forzamiento radiativo total de otros GEI.

Así, en esta simulación y por las características de cada uno de los dos escenarios, se les aplican en C-ROADS las siguientes RCP:

- Escenario 2 → RCP2.6. En este caso se añade una alta mitigación (RCP 2.6), debido a la protección proactiva del medio ambiente presente en este escenario.
- Escenario BAU → RCP 8.5. Se sigue las recomendaciones del propio programa C-ROADS, en el que la RCP empleada por defecto es la 8.5 (la trayectoria de menor mitigación).

Debido a que justamente son dos escenarios en los que se aplican las RCP más extremas, el forzamiento radiativo total evoluciona de forma claramente diferente. A pesar de que el CO₂ es el gas que más aporta al forzamiento radiativo, se ve claramente que la influencia de los otros gases está presente y se refleja en la *Figura 8.5*.

En el modelo DICE, en el que todos los escenarios poseen la misma entrada de forzamiento radiativo para los otros GEI, la pequeña distancia entre los dos escenarios se debe exclusivamente al forzamiento radiativo del CO₂, trasladándose, por tanto, la tendencia de la *Figura 8.4*.

Los valores que se alcanzan en el modelo para 2050 en C-ROADS son de aproximadamente 4,2 w/m² para el escenario 2 y de 4,7 w/m² en el caso del escenario BAU. Por otro lado en DICE se alcanzan valores menores a partir del año 2022 (en consonancia con la concentración de CO₂). En concreto el valor es de aproximadamente 3,8 w/m² para los dos escenarios en 2050 (la diferencia es sólo de centésimas).

8.4. Comparación temperatura

En este último apartado se comparan los resultados de variación de temperatura respecto niveles preindustriales (1850-1900) para cada uno de los dos modelos. El resultado se presenta en la siguiente *Figura 8.6* :

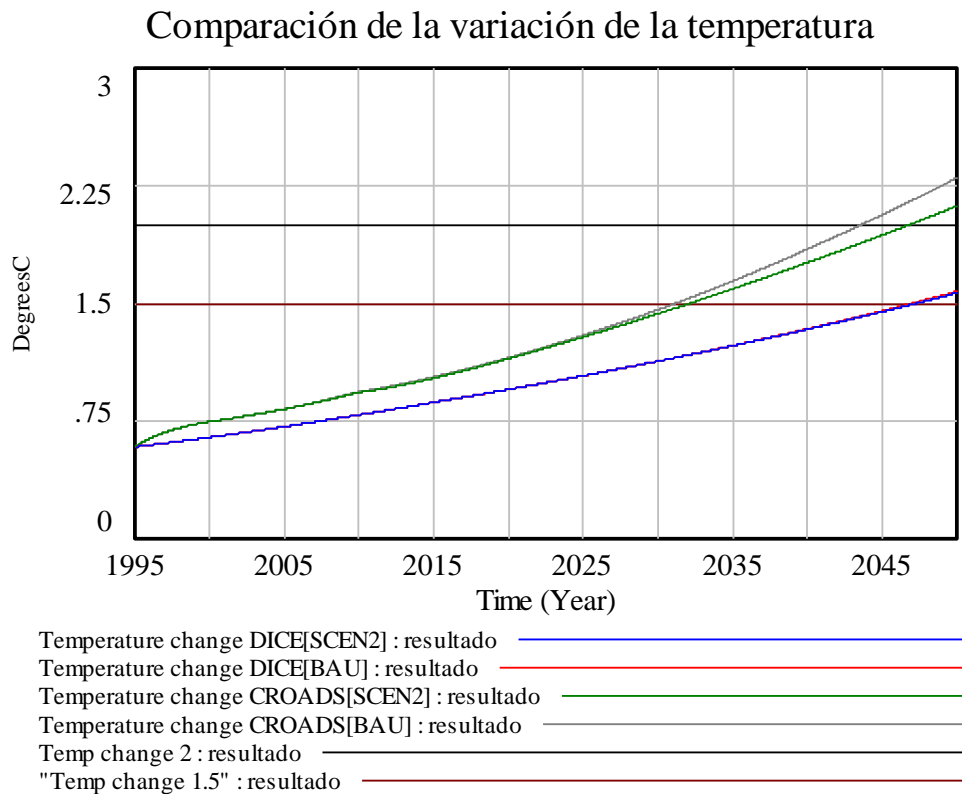


Figura 8.6: Gráfica de comparación de la variación de temperatura entre DICE y C-ROADS.

Se aprecia claramente que la evolución de la temperatura depende del forzamiento radiativo de los GEI. Al igual que en la *Figura 8.5*, se alcanza una mayor variación de temperatura en el modelo C-ROADS (tendencia que ya se reflejaba en los datos históricos). Esta diferencia es bastante grande cuando se corre la simulación hasta 2050. Así en C-ROADS los valores son de más de 2 °C de variación de temperatura, en concreto en el escenario 2 el valor es de 2,1 °C, y en el escenario BAU es de 2,2 °C. Se superan los 2 °C en el año 2046 para el escenario 2, y tres años antes (2043) en el escenario BAU.

En cambio en DICE, aunque sí se sobrepasan los 1,5 °C, con un valor en torno a los 1,6 °C para los dos escenarios, sin alcanzar en ninguno de los dos casos los 2 °C.

Por otro lado, debido a que en el modelo DICE el forzamiento radiativo es muy similar en los dos escenarios, también se refleja esto en la temperatura siendo apenas apreciable en la gráfica la diferencia. En cambio en C-ROADS los dos escenarios se alejan, alcanzando una mayor temperatura en el BAU.

Por último, como ya se apuntó en el anterior capítulo, los resultados de C-ROADS son consistentes también con otros escenarios BAU existentes en la literatura, en los que se proyecta un rango de incremento de temperatura en el año 2050 de 1,5-2,25 °C. En cambio los resultados de DICE estarían en el rango bajo de la literatura.

Las conclusiones finales que se derivan de los resultados comentados se presentan en el siguiente *Capítulo 9*.

9. CONCLUSIONES

9.1. Resumen del trabajo realizado

En este trabajo se ha llevado a cabo la comparación de los resultados que se obtienen de dos módulos climáticos distintos pertenecientes cada uno a un modelo: DICE y C-ROADS. Debido a que este trabajo es una aportación al proyecto MEDEAS, para llevar a cabo ese análisis se ha incluido cada módulo climático en el modelo MEDEAS-World.

En este apartado se explican de forma breve los pasos que se han seguido. Cabe añadir que previamente antes de comenzar el trabajo, se diseñó un índice preliminar del proyecto a modo de guía siguiendo los objetivos del mismo, y teniendo en cuenta futuras modificaciones.

Se comenzó la elaboración de este TFM con la búsqueda de información y lectura de bibliografía relacionada con las materias y cuestiones que aparecen en el trabajo. Primero, en la redacción del *Capítulo 2*, me centré en los aspectos teóricos que se integran en el módulo climático, que incluyen el ciclo de carbono, la influencia de otros gases de efecto invernadero (GEI), y el efecto final en la temperatura. También se describieron los resultados de algunos escenarios proyectados de los que se deduce la necesidad de mitigación, y las principales negociaciones internacionales que surgen como respuesta al problema del cambio climático.

Seguidamente, se llevó a cabo una presentación de los principales modelos que se emplean en la investigación de soluciones al cambio climático. Se describieron más en detalle los “modelos de evaluación integrados” (IAM) debido al empleo en este trabajo de este tipo de modelos que integran diferentes disciplinas como módulos, y entre los que se incluye el modelo DICE, el modelo FREE (incorporado en el submodelo climático de C-ROADS), y el propio modelo MEDEAS-World con el que se simula y se obtienen resultados. A continuación se describen los escenarios del IPCC que son ampliamente utilizados en los modelos. Todos estos aspectos se incluyeron en el *Capítulo 3*.

Posteriormente, debido a que la herramienta empleada para el análisis y la modificación de los modelos es la Dinámica de Sistemas, en el *Capítulo 4* se presentó un resumen de esta disciplina. A continuación, aprendí a manejar el programa de ordenador Vensim utilizado en este trabajo. Las características principales de este software se introducen brevemente al final del capítulo.

Después, se llevó a cabo la redacción del *Capítulo 5*, en el que se describieron en detalle los cinco escenarios futuros que utiliza el modelo MEDEAS, ya que son con los que se proyecta en las simulaciones de este trabajo hasta el año 2050.

A continuación, se estudiaron y analizaron los módulos climáticos de los dos modelos DICE y C-ROADS que se incluyen en el modelo MEDEAS. Así, en el *Capítulo 6*, se describió el ciclo de carbono y el sector del clima del modelo DICE, y cómo se encuentra adaptado en MEDEAS. Por otro lado, se introdujo en el *Capítulo 7* el modelo C-ROADS antes de presentar en detalle su módulo climático. A continuación se describió paso a paso cómo se llevó a cabo la integración de este módulo en el modelo MEDEAS, ya que en este caso no estaba incluido previamente. Debido a esto, este *Capítulo 7* es el más extenso de todos. Cabe añadir que al final de los dos capítulos se presentaron resultados utilizando los cinco escenarios descritos en el *Capítulo 5*.

Por último, en el *Capítulo 8*, se llevó a cabo la comparación entre los dos módulos climáticos integrados en MEDEAS, utilizando para la simulación por simplicidad

únicamente los escenarios BAU y el escenario 2 de desarrollo sostenible. De esta manera, compartiendo los dos módulos la misma entrada de emisiones de CO₂ de origen antropogénico, se presentaron gráficas de las dos variables de salida del submodelo climático, que son la concentración de CO₂ y la temperatura, frente a datos históricos. De la misma forma se comparó en la simulación hasta 2050 la evolución de la concentración de CO₂, el forzamiento radiativo de los GEI, y la variación de temperatura de cada uno de los dos modelos, viendo así las principales diferencias en su comportamiento.

Finalmente, es necesario apuntar que durante la redacción, debido a la cantidad de abreviaturas que iban apareciendo, se añadió un capítulo adicional (*Capítulo 11*) que incluye la definición de cada término. De la misma forma, el proceso de escritura no fue puramente secuencial, ya que se fueron añadiendo nuevas ideas y modificaciones que iban apareciendo durante la realización del TFM.

Las conclusiones que se extraen del presente trabajo se exponen a continuación en los siguientes apartados.

9.2. Resumen de los resultados técnicos

En este apartado se comentan los principales resultados obtenidos y conclusiones que se extraen del presente trabajo.

Primero, gracias a la bibliografía estudiada y a la lectura de diversas fuentes, se puede deducir la importancia y complejidad del ciclo de carbono y de otros gases que gobiernan el clima y sus impactos, siendo los datos observados históricos de la evolución de la temperatura una prueba clara de la existencia del cambio climático, el cual no es posible explicar sin la influencia del hombre. La repercusión del problema se refleja en la presente necesidad de negociaciones internacionales, reuniéndose por ejemplo periódicamente en las Conferencias de las Partes (COP) los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

En este aspecto, los modelos que surgen también como resultado de la creciente preocupación por el tema son una herramienta muy útil, ayudando a informar de los posibles impactos a los encargados de tomar las decisiones, así como de valorar las posibilidades y consecuencias de la adaptación y/o mitigación. La parte climática de estos modelos es fundamental para valorar los impactos de las decisiones en el clima. El estudio en profundidad y comparación de dos módulos climáticos distintos muestra la necesidad, a la hora de construir modelos, de revisión, mejora y recalibraciones con el tiempo.

En resumen, el módulo climático de DICE es más simple que el de C-ROADS, incluyendo este último un ciclo de carbono más complejo que contiene de manera más detallada la absorción del CO₂ por la biosfera y por el océano, además de realimentaciones de la temperatura en el ciclo (al aumentar la temperatura la absorción de CO₂ por la biomasa y el océano disminuye). Además, C-ROADS permite el cálculo de forma endógena del forzamiento radiativo de otros GEI a partir de datos externos de las emisiones de estos gases.

Respecto a los resultados que se obtienen con cada módulo, es necesario recordar que la simulación del modelo MEDEAS comienza en el año 1995, y que la entrada de emisiones antropogénicas de CO₂ es compartida en los dos módulos. Primero, en la comparación que se hacía de la salida de concentración de CO₂ de los dos módulos climáticos de DICE y de C-ROADS respecto a datos observados históricos del observatorio

de Mauna Loa [49], se deduce que C-ROADS posee mejor calibración que el módulo de DICE, debido a que los valores de salida del primero prácticamente coinciden con los históricos.

En cuanto a la salida de variación de temperatura, debido a las oscilaciones que poseen los datos históricos de esta variable es más complicada la comparación. Aun así, calculando las diferencias absolutas entre valores de salida de los dos módulos y los datos históricos, y mediante la representación del ajuste lineal de cada una de las dos fuentes de datos históricos (GISS NASA [50] y HadCRUT4 [51]) se pudo llegar a la conclusión de que C-ROADS también simula mejor la temperatura respecto a valores históricos. Sin embargo, es necesario añadir también que en la comparación con la segunda fuente de datos (HadCRUT4) la diferencia entre un módulo u otro es muy pequeña.

En conclusión, consideramos que el módulo climático que mejor representa los datos históricos y que por tanto se encuentra mejor calibrado, es el que pertenece al modelo C-ROADS.

Por otro lado, respecto a la simulación hasta el año 2050 en el que se proyectan el escenario BAU y el escenario 2, se comentan las conclusiones principales para las tres variables de salida siguientes:

- **Concentración de CO₂:** Se alcanzan valores mayores con el módulo climático de C-ROADS, llegando a 540 ppm en el escenario 2 y a 548 ppm en el escenario BAU, frente a DICE cuyo valor se encuentra en torno a los 510 ppm (508 ppm y 513 ppm para el escenario 2 y BAU respectivamente). Esto indica que en el ciclo de carbono de C-ROADS se absorbe un menor porcentaje de las emisiones de CO₂ por el océano y la biosfera, y por tanto, una mayor cantidad de este gas permanece en la atmósfera.
- **Forzamiento radiativo total:** Para esta variable se vuelven a obtener mayores valores en el módulo de C-ROADS, aunque en este caso desde el año 2022. Así, para 2050 en C-ROADS se alcanzan aproximadamente los valores de 4,2 w/m² en el escenario 2 y de 4,7 w/m² en el caso del escenario BAU, en contraste con DICE cuyo valor se encuentra en torno a los 3.8 w/m² en 2050 para los dos escenarios.

La diferencia entre los escenarios de C-ROADS, que contrastan con los valores cercanos en el módulo de DICE, se debe al origen del forzamiento de los otros GEI distintos al CO₂. Esto se debe, a que en el módulo de DICE el forzamiento radiativo de los otros GEI es una variable exógena que procede de la proyección RCP 6.0, mientras que en C-ROADS este forzamiento se calcula de forma endógena a partir de datos de emisiones de estos gases. Además, a la hora de introducir estas emisiones de forma exógena en cada escenario, se puede elegir entre las cuatro rutas RCP disponibles. Así, para el escenario 2 de desarrollo sostenible se aplica la RCP 2.6 de alta mitigación, y el escenario BAU corresponde con la RCP 8.5, la ruta de menor mitigación que propone C-ROADS como escenario de referencia.

- **Temperatura:** En la comparación de la variación de temperatura respecto niveles preindustriales (1850-1900), con el módulo climático de C-ROADS se obtienen también valores mayores lógicamente, ya que esta variable depende fundamentalmente del forzamiento radiativo. Así, para 2050 C-ROADS alcanza en el escenario 2 el valor de 2,1 °C de variación de temperatura, y en el escenario BAU el valor de 2,2 °C aproximadamente, en contraste con DICE, en el que los valores casi alcanzan los 1,6 °C en los dos escenarios.

Cabe destacar, que en el módulo de C-ROADS se superan en los dos escenarios el valor límite de temperatura de 2 °C en 2050. En concreto, en el año 2046 para el

escenario 2 y en 2043 en el escenario BAU. Sin embargo, en el módulo de DICE en la simulación hasta 2050 los resultados no llegan en ningún caso a los 2°C, aunque sí sobrepasan los 1,5°C.

Como conclusión final, el módulo climático de C-ROADS parece ser una mejor alternativa respecto al de DICE, debido a que el primero reproduce mejor las trayectorias históricas, y los resultados de sus proyecciones se aproximan mejor a los que aparecen en la literatura. Además, C-ROADS posee estructuras más realistas tanto del clima como del ciclo de carbono. Para empezar, contiene un ciclo de carbono más detallado que incluye la retroalimentación de la variación de la temperatura, y por otro lado, calcula de forma endógena el forzamiento radiativo de otros GEI a partir de las emisiones de estos gases, dando la posibilidad de introducir escenarios futuros de emisiones de otros gases como es el caso del metano, que son distintos al CO₂ pero que afectan también al clima (por ejemplo en escenarios de mitigación). Por último, el modelo C-ROADS a diferencia del DICE, permite elegir para las emisiones de otros GEI entre las cuatro RCP distintas para cada escenario del modelo, debido a que tiene incorporadas todas las rutas.

9.3. Conclusiones personales sobre el trabajo

Después del estudio de la literatura y bibliografía durante la realización de este trabajo, no hay lugar a duda de que el cambio climático existe y es un problema real. Respecto a este tema hay un consenso generalizado en la comunidad científica.

Aunque el clima siempre ha sufrido variaciones en el pasado, la diferencia actual es el aumento de la velocidad de este cambio climático, que no tiene precedentes y cuyo origen se debe a la gran cantidad de emisiones de GEI adicionales que hemos liberado a la atmósfera como consecuencia de nuestra actividad. Las pruebas son claras: el evidente derretimiento del hielo de los glaciares y los casquetes polares, el aumento de la temperatura global siendo 2016 el año más caliente superando el récord de 2015, la acidificación y el calentamiento de los océanos afectando a la vida marina, y la subida del nivel del mar.

En lo que aún no hay acuerdo, es en los posibles impactos y en la intensidad de estos en el futuro, y por lo tanto, en el tipo de soluciones necesarias y la urgencia a la hora de implementarlas. Además, una de las cuestiones que más preocupa es la de alcanzar puntos críticos o estados de no retorno en el sistema climático, los llamados “tipping points” o “puntos de inflexión”, en los que las alteraciones en el patrón del clima se volverían irreversibles, debido a retroalimentaciones positivas que hacen que un pequeño cambio tenga repercusiones mucho más intensas.

De la necesidad de resolver estas incertidumbres mejorando la comprensión de los mecanismos que intervienen en el clima, y de asesorar a los políticos encargados de tomar las decisiones relativas a este problema, surgen los modelos que investigan el cambio climático. Relacionado con esto, considero que los IAM suponen un gran avance. Dado que las emisiones de GEI son también de origen antropogénico, era inviable profundizar en la cuestión del cambio climático y sus impactos sin considerar la parte social, teniendo en cuenta también las transformaciones y desarrollos que ocurren en la sociedad en lo relativo a las tecnologías, la energía, el crecimiento de la población, la economía, e incluso nuestro estilo de vida y valores morales, que inevitablemente impactan en las variables de entrada de los módulos climáticos. Ni el modelo climático más potente podría dar estimaciones del futuro impacto del cambio climático sin toda esa información.

Es necesario añadir que los modelos no son representaciones perfectas de los sistemas, prueba de ello son las necesarias calibraciones, mejoras y modificaciones a los que son sometidos. Aun así, constituyen un medio de obtener una información que no sería posible conseguir de otra manera. Por ejemplo, todas las decisiones que tomamos son valoradas antes a partir de la unión de modelos o suposiciones que creamos en nuestra cabeza, basadas en nuestro conocimiento o en nuestra propia experiencia. Por otro lado, la construcción de modelos matemáticos nos permiten comprobar si nuestras suposiciones se cumplen o no, y valorar si lo que creíamos viable en nuestra cabeza es también posible en la realidad al incluir no sólo las consecuencias, sino también las retroalimentaciones posibles que pueden derivar de una decisión.

Esto no quiere decir que se trate de una “ciencia adivinatoria”, si no que debemos verlo como un medio que sirve de guía hacia el futuro, que inevitablemente nos es desconocido. En este aspecto además la dinámica de sistemas, que es la disciplina empleada en este trabajo, se define claramente: los modelos que elabora no son modelos de predicción sino de gestión, es decir, se utilizan en la valoración de alternativas. Como apuntaba William Nordhaus (creador del modelo DICE): “nuestro futuro no se encuentra en las estrellas, sino en nuestros modelos”.

Respecto a los resultados obtenidos de variación de temperatura en este trabajo, empleando el módulo de C-ROADS que se ha elegido como mejor alternativa, cabe destacar el hecho de que incluso en el escenario de desarrollo sostenible (escenario 2), la variación de temperatura supera los 2°C en el año 2050. Este dato es fundamental, ya que en la cumbre de París (COP22) se acordó no superar ese límite de temperatura, incluso se mencionó también el umbral de 1,5°C, debido a que como ya se explicó en el Capítulo 2, el límite de 2°C no proporciona seguridad sobre todo para los países más vulnerables, siendo además países en desarrollo que apenas contribuyen a las emisiones de GEI.

Este resultado supone una fuerte crítica, ya que incluso en el escenario en el que se protege el medio ambiente de manera proactiva, los resultados no son muy prometedores. Este hecho prueba que las medidas que incorpora el actual concepto de “desarrollo sostenible” no son suficientes, ya que la reducción de las emisiones de CO₂ a los niveles necesarios es inviable con el crecimiento económico que se promueve en él. Igualmente el crecimiento continuado de población junto con el económico en una sociedad que además relaciona el bienestar social con el consumo, no es factible, ya que el planeta posee recursos que son limitados.

Por otro lado, estos resultados también muestran una urgencia a la hora de aplicar soluciones, que inevitablemente derivan en la necesidad de mitigación de las emisiones de GEI. Al contrario de lo que se supone lógico, la cumbre de París se centra más en la adaptación frente a los impactos que en la mitigación. Pero para conseguir las metas de reducción de emisiones hace falta también un plan.

Incluso en el mejor de los casos, considerando que en el futuro se invente una tecnología maravillosa que solucione todos los problemas, y que a la vez se implemente de inmediato, hasta ese momento ¿sería inteligente por nuestra parte quedarnos mientras inmóviles esperando? Lo más razonable es actuar, pero no sólo desde la suposición de que esa tecnología no aparezca, si no también reuniendo los esfuerzos necesarios para que esta sea inventada. En todo ello aparece una necesaria proactividad desde la prevención, en lugar de enfocar todo en la gestión de los desastres futuros.

Pero los medios necesarios para hacer cumplir esos objetivos de reducción de emisiones, como puede ser el impuesto al carbono, no suelen dar buena publicidad política, ya que es evidente que en este tema, como en muchos otros, hay intereses que

se contraponen y las medidas pueden perjudicar a ciertos grupos. Además, aunque también en los países en desarrollo con alta población es necesario limitar las emisiones, la transición en ellos es más difícil, ya que pedir algo así en países cuyas prioridades en muchos casos son otras (como por ejemplo la reducción de la pobreza o el acceso a la electricidad) es muy osado, si además en los países líderes desarrollados que más emiten y con acceso a todos los servicios no se predica con el ejemplo.

Por otro lado, confiar simplemente en la responsabilidad de las personas sin métodos coercitivos es bastante ilusorio, porque la gente tiene sus propias prioridades y preocupaciones también, y el cambio climático, al igual que ocurre con otros problemas en el mundo, actualmente nos afecta de lejos y no supone hoy un peligro para nuestra seguridad. Además, incluso en cuestiones que sí afectan a nuestra seguridad en el presente, el expresar las consecuencias con probabilidades parece que tranquiliza y evita la acción hasta “que a uno le perjudica directamente”, un claro ejemplo es la necesidad en nuestra sociedad de imponer multas de tráfico ante el incumplimiento de normas como el uso del cinturón o superar el límite de velocidad. No se puede negar, que en la cuestión del cambio climático la mentalidad de que “es probable que a mí no me vaya a perjudicar y de momento no pasa nada que a mí directamente me afecte” está muy arraigada.

Por todo ello es tan importante la transmisión de conocimiento e información científica sobre el tema del cambio climático, es decir, la toma de conciencia de la población. Porque la imagen política depende en última instancia de la propia sociedad, ya que al fin y al cabo es la que elige a sus representantes y la que provoca que las decisiones que se tomen en las COP sean más o menos valientes o aceptadas. De la misma forma, es la sociedad mediante su demanda y valoración la que obliga a las empresas a mejorar su imagen y a considerar su responsabilidad social corporativa.

Es por ello por lo que las personas deben de ser las que hagan la crítica y defiendan sus propios intereses y los de las siguientes generaciones. Es responsabilidad de todos defender nuestro único hogar común del que estamos bastante lejos de ser sus dueños, aunque vivamos en la ilusión de creer que lo somos. Como dijo el secretario de las Naciones Unidas, Ban Ki-moon, en 2015: “no hay plan B porque no hay planeta B”.

Aunque siempre hemos necesitado personalmente “verle las orejas al lobo para reaccionar”, y no parece que en esta cuestión esta vez vaya a ser distinto, hay que añadir que cada vez la sociedad está más implicada en el tema. Además el ser humano históricamente ha proyectado los supuestos peligros para la supervivencia, es decir, el propio pesimismo ha servido para juzgar y actuar frente a los problemas.

Por ello, es necesario hacer a la población consciente del problema, no para crear alarma ni un pesimismo inútil, si no para fomentar el cambio de mentalidad y permitir la acción. Igual que en la vida a diario ocurren hechos que nos sorprenden y cuyas consecuencias no eran previsibles, en los que el propio conocimiento y la experiencia son actualizados, en esta cuestión también puede haber gratas sorpresas. Pero para ello es necesario el movimiento. Esta es la esperanza frente a una situación que claramente es urgente, y en el que el uso de las herramientas o medios como el modelado es clave en la necesaria concienciación.

Todos nosotros somos descendientes de supervivientes que en la historia lograron resistir a catástrofes y desastres naturales. Por ello, es obligación nuestra utilizar nuestros medios disponibles para que el ambiente de aparente seguridad en el que vivimos en la sociedad actual de los países desarrollados, que nos permite preocuparnos por otras cosas en lugar de la supervivencia, no nos ciegue dejándonos sin tiempo de reacción.

9.4. Líneas futuras de trabajo

Algunas futuras líneas de trabajo que no se han considerado en el presente TFM se enumeran a continuación. Primero, en este trabajo no se incluyó el secuestro y almacenamiento de CO₂ que aparece en el modelo de C-ROADS considerando su desarrollo y beneficios inciertos. Por ello, una continuación de este trabajo sería por tanto, el estudio en profundidad de esta parte del modelo y de la bibliografía correspondiente con su posterior adaptación al modelo MEDEAS-World de la forma más adecuada.

Por otro lado, otras partes del modelo de C-ROADS que podrían ser adaptadas en MEDEAS-World serían el aumento del nivel del mar debido a la temperatura y al derretimiento de las capas de hielo, y la disminución del pH en los océanos que indica su acidificación y es consecuencia del aumento de la concentración atmosférica de CO₂. Estas dos partes constituyen una base fundamental a la hora de valorar los impactos de las distintas posibles políticas o escenarios de mitigación.

Por último, otra línea futura de trabajo sería probar resultados del MEDEAS incluyendo ya las hipótesis propias del modelo, que fueron desactivadas para llevar a cabo la comparación de los dos módulos climáticos en su forma original. Se recuerda que las funciones desactivadas para la comparación son las restricciones de disponibilidad de energías fósiles, la realimentación de la tasa de retorno energético en la demanda de energía final, y la retroalimentación de los impactos del cambio climático.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Parson, E.A. and K. Fisher-Vanden, 1995. Searching for Integrated Assessment: A Preliminary Investigation of Methods, Models, and Projects in the Integrated Assessment of Global Climatic Change. Consortium for International Earth Science Information Network (CIESIN). University Center, Mich. Disponible en: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/mva/iamcc.tg/insearchof.html>
- [2] Nordhaus, W. D., 1994. Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change, MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- [3] Nordhaus W. and Sztorc P., 2013. DICE 2013R : Introduction and User's Manual (Second Edition).
- [4] C-ROADS-Climate Interactive. Disponible en: <https://www.climateinteractive.org/tools/c-roads/>.
- [5] Ventana Systems. Vensim User Guide.
- [6] Hansen J., Sato M., Kharecha P., Beerling D., Masson-delmotte V., Pagani M., Raymo M., Royer D. L., and Zachos J. C., 2008. Target Atmospheric CO₂ : Where Should Humanity Aim ?, *Open Atmos. Sci. J.*, vol. 2, pp. 217–231.
- [7] Capellán-Pérez I., de Blas I., Nieto J., de Castro C., Miguel L. J., Mediavilla M., Carpintero O., Rodrigo P., Frechoso F. and Cáceres S., 2016. D4.1 (D13) Global Model: MEDEAS-World Model and IOA implementation at global geographical level. MEDEAS project. Disponible en: <http://www.medeas.eu/>.
- [8] Systems Biology to Advance Understanding of Carbon Cycling and Other Biogeochemical Processes. Genomic Science Program. Systems Biology for Energy and Environment. Disponible en: <http://genomicscience.energy.gov/carboncycle/>.
- [9] ESRL Global Monitoring Division - Global Greenhouse Gas Reference Network. N. E. S. R. L. US Department of Commerce. Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>.
- [10] Forcings in GISS Climate Model. National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies. Disponible en: <https://data.giss.nasa.gov/modelforce/ghgases/>
- [11] Lowe D. C. and Zealand N., 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing (IPCC), *Change*, vol. 30, no. 22, pp. 129–234, 2007.
- [12] Knutti R. and Hegerl G. C., 2008. The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes, *Nat. Geosci.*, vol. 1, no. 11, pp. 735–743.
- [13] IPCC 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report.
- [14] The montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. Ozone secretariat. Disponible en: <http://ozone.unep.org/en/treaties-and-decisions/montreal-protocol-substances-deplete-ozone-layer>.
- [15] Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 1998.
- [16] Enmienda de Doha al Protocolo de Kyoto. Disponible en: http://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/kp_doha_amendment_spanish.pdf

- [17] Convención Marco sobre el Cambio Climático. Naciones Unidas. 2015. COP21. Disponible en : <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09r01s.pdf>
- [18] Spash C. L., 2016. This Changes Nothing: The Paris Agreement to Ignore Reality. *Globalizations*, vol. 13, no. 6, pp. 928–933.
- [19] COP23 Information Hub Overview. Disponible en: <http://newsroom.unfccc.int/cop23bonninformationhub/cop23-information-hub-overview/>
- [20] Smith J., Schneider S., Oppenheimer M., Yohe G., Hare W., Mastrandrea M., Patwardhan A., Burton I., Corfee-Morlot J., Magadza C., others, 2009. Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 'reasons for concern'. *Pnas*, vol. 106, no. 11, pp. 4133–4137.
- [21] Hansen J., Sato M., Hearty P., Ruedy R., Kelley M., Masson-Delmotte V., Russell G., Tselioudis G., Cao J., Rignot E., others, 2016. Ice melt, sea level rise and superstorms: Evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2 °c global warming could be dangerous. *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 16, no. 6, pp. 3761–3812.
- [22] Rogelj J., Luderer G., Pietzcker R. C., Kriegler E., Schaeffer M., Krey V., and Riahi K., 2016. Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C. *Nat. Clim. Chang.*, vol. 6, no. 5, pp. 538–538.
- [23] Climate Vulnerable Forum. Focus on Climate Change and Global Warming. Disponible en: <https://thecvf.org/>.
- [24] Abaza H. and Baranzini A., 2002. Implementing Sustainable Development: Integrated Assessment and Participatory Decision-making Processes.
- [25] IAMC, Integrated Assessment Modeling Consortium. Disponible en: <http://www.iamconsortium.org/>
- [26] Yang Z., Wei Y.-M., and Mi Z., 2016. Integrated Assessment Models (IAMs) for Climate Change.
- [27] Weyant J., Davidson O., Dowlabathi H., Cline W., Fankhauser S., Edmonds J., GRUBB M., Parson E. A., Richels R., Rotmans J., Shukla P., and Tol R. S., 1995. Integrated assessment of climate change: An overview and comparison of approaches and results, *Clim. Chang. 1995 Econ. Soc. Dimens. Clim. Chang.*, no. July 2015, pp. 367–439.
- [28] Akhtar M. K., 2011. A System Dynamics based Integrated Assessment Modelling of Global-Regional Climate Change : A Model for Analyzing the Behaviour of the Social-Energy-Economy-Climate System.
- [29] Fiddaman T. S., 1997. Feedback Complexity in Integrated Climate-Economy Models, *Proc. 1998 Syst. Dyn. Conf.*, vol. 1, p. 32.
- [30] Fiddaman T. S., 2002. Exploring policy options with a behavioral climate-economy model, *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 18, no. 2, pp. 243–267.
- [31] Meinshausen M., Raper S. C. B., and Wigley T. M. L., 2011. Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 - Part 1: Model description and calibration, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11, no. 4, pp. 1417–1456.

- [32] Nakicenovic, N. et al . 2000. Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp. Disponible en: <http://sedac.ipcc-data.org/ddc/sres/index.html>.
- [33] Van Vuuren D. P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J. F., others, 2011. The representative concentration pathways: An overview, *Clim. Change*, vol. 109, no. 1, pp. 5–31.
- [34] RCP Database. Version 2.0.5. Disponible en: <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/>.
- [35] Van Vuuren D. P., Kriegler E., O'Neill B. C., Ebi K. L., Riahi K., Carter T. R., Edmonds J., Hallegatte S., Kram T., Mathur R., and Winkler H., 2014. A new scenario framework for Climate Change Research: Scenario matrix architecture, *Clim. Change*, vol. 122, no. 3, pp. 373–386.
- [36] System Dynamics. MIT Sloan School of Management. Disponible en: <http://mitsloan.mit.edu/faculty-and-research/academic-groups/system-dynamics/>.
- [37] Martín J., 2003. Dinámica de sistemas. Ejercicios.
- [38] Forrester J. W., 2009. Some basic concepts in system dynamics. *Sloan School of Management*, pp. 1–17.
- [39] Sterman J. D., 2003. Systems Thinking and Modeling for a Complex World.
- [40] Van Vuuren D. P., Kok M. T. J., Girod B., Lucas P. L., and de Vries B., 2012. Scenarios in Global Environmental Assessments: Key characteristics and lessons for future use, *Glob. Environ. Chang.*, vol. 22, no. 4, pp. 884–895.
- [41] Capellán-Pérez I., Mediavilla M., de Castro C., Carpintero Ó., and Miguel L. J., 2014. Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach, *Energy*, vol. 77, pp. 641–666,
- [42] Nordhaus W. D. and Boyer J., 2000. Warming the World.
- [43] Capellán-Pérez I. and de Castro C., 2017. Integration of global environmental change threat to human societies in energy- economy-environment models.
- [44] Fiddaman T., Siegel L. S., Sawin E., Jones A. P., and Sterman J., 2017. C-ROADS Simulator Reference Guide.
- [45] Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., J.-F. Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., others, 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 1–44.
- [46] Daniel J. S., Velders G. J. M., Douglass A. R., Forster P. M. D., Hauglustaine D. A., Isaksen I. S. A., Kuijpers L. J. M., McCulloch A., and Wallington T. J., 2006. Halocarbon Scenarios, Ozone Depletion Potentials, and Global Warming Potentials, *Sci. Assess. Ozone Deplet.* 2006, no. February, p. 572.
- [47] Schmidt G., Ruedy R., Persin A., Sato M., and Lo K., Global Annual Temperature Anomalies (Land + Ocean), *The GISTEMP Team*. Disponible en: http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/ftp/trends/temp/hansen/gl_land_ocean.txt.
- [48] Schneider S. H. and Thompson S. L., 1981. Atmospheric CO₂ and climate: Importance of the transient response, *J. Geophys. Res.*, vol. 86, no. C4, p. 3135.
- [49] Tans P., Mauna Loa CO₂ annual mean data. NOAA/ESRL. Disponible en: ftp://afpt.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_annmean_mlo.txt.

- [50] Data. GISS Surface Temperature Analysis: Analysis Graphs and Plots. Disponible en: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/#>.
- [51] HadCRUT4 Data. Met Office Hadley Centre observations datasets. Disponible en: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/data/current/download.html>.

11. GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

Este glosario define los términos y abreviaturas que se utilizan en este trabajo:

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
AR4	Cuarto Informe de Evaluación del IPCC
AR5	Quinto Informe de Evaluación del IPCC
BAU	Business-as-Usual (Tendencia presente, sin cambios)
COP	-Conferencia de las Partes (Conference of Parties). -Regiones o conjunto de países en el programa C-ROADS.
C-ROADS	Simulador Rápido del Clima y Soporte en la toma de Decisiones. (Climate Rapid Overview And Decision-support Simulator)
CVF	Foro de Vulnerabilidad Climática (Climate Vulnerable Forum)
DICE	Modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy)
EROI	Tasa de Retorno Energético (Energy Return On Investment)
FF	Combustibles fósiles. (Fossil fuels)
FREE	Modelo Feedback-Rich Energy-Economy
GDP	Producto Interior Bruto (Gross Domestic Product)
GHG/GEI	Gases de efecto invernadero
GWP	Potencial de calentamiento global (Global Warming Potencial).
IAM	Modelos de Evaluación Integrada (Integrated Assessment Models)
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
MAGICC	Modelo para la Evaluación del Cambio Climático Inducido por los Gases de Efecto Invernadero (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change)
MP	Protocolo de Montreal
ODS	Sustancias que agotan la capa de ozono (Ozone-Depleting Substances)
RCP	Trayectorias de Concentración Representativas (Escenarios IPCC del AR5).
RF	Forzamiento radiativo
RS	Escenario de referencia
SRES	Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IPCC AR4)
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (United Nations Framework Convention on Climate Change)

