

DESARROLLO, PRUEBA E INTEGRACIÓN DE UN MEJOR Y  
MÁS REALÍSTICO MÓDULO PARA LA BIÓSFERA  
TERRESTRE DEL MODELO “DCESS EARTH SYSTEM”

NELSON ALBARRÁN ARRIAGADA

TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO A LA FACULTAD DE  
CIENCIA, EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUISITOS EXIGIDOS  
PARA OPTAR AL GRADO DE INGENIERO FÍSICO

PROFESOR GUÍA: DR. GARY SHAFFER

PROFESOR PATROCINANTE: DRA. YOLANDA VARGAS



SANTIAGO-CHILE

2015

DESARROLLO, PRUEBA E INTEGRACIÓN DE UN MEJOR Y  
MÁS REALÍSTICO MÓDULO PARA LA BIÓSFERA  
TERRESTRE DEL MODELO “DCESS EARTH SYSTEM”

NELSON ALBARRÁN ARRIAGADA

ESTE TRABAJO DE GRADUACIÓN FUE PREPARADO BAJO LA SUPERVISIÓN DEL  
PROFESOR GUÍA DR. GARY SHAFFER DEL CENTRO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN  
ZONAS ÁRIDAS (CEAZA) Y HA SIDO APROBADO POR LOS MIEMBROS DE LA  
COMISIÓN CALIFICADORA DEL CANDIDATO.

---

DR. RAÚL R. CORDERO

---

DR. PATRICIO PEREZ JARA

---

DRA. YOLANDA VARGAS HERNÁNDEZ

---

PROFESOR GUÍA

---

DRA. YOLANDA VARGAS HERNÁNDEZ

DIRECTORA

*Dedicado a mi familia y  
a todos aquellos que hacen  
de mi vida una alegría.*

# Agradecimientos

Agradezco a todos aquellos que de alguna u otra manera se involucraron y fueron parte de este proyecto. En primera instancia agradezco a mis padres María Jesús Arriagada y José Octavio Albarrán, por su gran apoyo y confianza en mi. A mi hermano Francisco Albarrán, con quien sostuve profundas discusiones que ayudaron a madurar este trabajo. Y a Natalia Tapia, por su apoyo y cariño.

En lo académico, quisiera agradecer y mi tutor, el Profesor Gary Shaffer, quien me guió y enseñó el mundo de las simulaciones del clima a gran escala. Y a la Profesora Yolanda Vargas, quien me apoyó y patrocinó en mi proyecto de tesis.

# Resumen

El clima de la Tierra depende principalmente de la concentración de gases de invernadero, tales como  $CO_2$  y  $CH_4$ , presentes naturalmente en el planeta. La biósfera es uno de los principales gestores de estos gases y dependiendo de las condiciones climáticas, la distribución de la vegetación puede inducir a la biósfera a ser un sumidero o fuente de  $CO_2$ . A su vez, los avances y retrocesos de hielos, capturan o liberan carbono produciendo flujos interesantes.

En esta tesis se trabajará en el desarrollo, prueba e integración de un más realístico módulo biósfera terrestre para el modelo Danish Center for Earth System Science [9] (DCESS). Para ello se particionará la vegetación en tres zonas, dominadas por ecosistemas Tropical, Desiertos-Pastizales y Extra Tropical, se definirá la variación climática de los bordes zonales, y se integrará a la dinámica general de Carbono del Modelo DCESS. Junto con lo anterior se modelará el flujo de carbono referente al movimiento de hielo y extensión de permafrost. Finalmente, se realizarán simulaciones comparativas entre la nueva biósfera y la original, analizando el comportamiento de la biomasa para escenarios de calentamiento y enfriamiento, encontrando que los resultados obtenidos por el nuevo modelo son más consistentes con la literatura frente al modelo original.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
Resumen . . . . .	III
<b>Lista de figuras</b>	<b>VI</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Producción Primaria Neta, NPP . . . . .	2
1.2. El concepto Bioma . . . . .	3
1.2.1. Bosque Tropical . . . . .	4
1.2.2. Desiertos y Pastizales . . . . .	6
1.2.3. Bosque Extratropical . . . . .	7
1.3. Componentes Climáticos . . . . .	8
1.3.1. Gases de Invernadero . . . . .	8
1.3.2. Ciclo del Carbono . . . . .	10
1.4. Modelo DCESS . . . . .	12
1.4.1. Geometría . . . . .	13
1.4.2. Modulo Biósfera Original . . . . .	13

<b>2. Desarrollo</b>	<b>18</b>
2.1. Partición de Biosfera: Biomas Dominantes . . . . .	18
2.2. Definición de Bordes Dinámicos . . . . .	22
2.3. Ecuaciones de interacción entre reservorios . . . . .	26
2.4. Ecuaciones de intercambio de carbono Biósfera-Atmósfera . . . . .	28
2.5. Carbono Atrapado: Permafrost . . . . .	29
<b>3. Evaluación y Análisis</b>	<b>33</b>
3.1. Evaluación general: Modulo Original vs Nuevo Módulo . . . . .	34
3.1.1. Evolución de la temperatura y concentración de $CO_2$ . . . . .	34
3.1.2. Evolución de los bordes zonales . . . . .	36
3.1.3. Evolución de la Biomasa Terrestre . . . . .	37
3.2. Calentamiento . . . . .	40
3.3. Enfriamiento: Último Máximo Glaciar, LGM . . . . .	41
<b>4. Conclusiones</b>	<b>44</b>
<b>A. Código Modulo Biosfera Nuevo</b>	<b>46</b>
<b>B. Modelo LPJ-DGVM</b>	<b>55</b>

# Índice de figuras

1.1. Distribución global de la Producción Primaria Neta [6] . . . . .	3
1.2. Los biomas del mundo. Los biomas dependen principalmente de la temperatura zonal y la precipitación. Forseth, I. (2010) Terrestre Biomas. Naturaleza Educación Conocimiento 3 (10): 11 . . . . .	4
1.3. Los biomas del mundo. Los biomas son regiones de clima similar y tipos de plantas dominantes. . . . .	5

1.4.	Vista general de los principales flujos de carbono de un ecosistema. El carbono entra en el sistema mediante de la producción primaria bruta GPP, a través de la fotosíntesis de las plantas. Las partes aéreas de las plantas retornan casi la mitad de este carbono en forma de respiración, $R_{plant}$ . La producción primaria neta NPP, es la diferencia entre la ganancia por GPP y la perdida por $R_{plant}$ . La mayoría de la NPP se transfiere a la materia orgánica del suelo. Los animales también transfieren algo de carbono al suelo a través de la excreción y la muerte. La mayoría del carbono que entra en el suelo se pierde a través de la respiración microbiana (junto con la respiración animal es llamada respiración heterotrófica, $R_{het}$ ). La producción neta del ecosistema es el balance entre GPP y la respiración heterotrófica más la respiración de las plantas. El suelo pierde carbono adicional a través de la lixiviación, $F_{leach}$ . El balance neto del ecosistema es el carbono neto acumulado por un ecosistema; es igual a la entrada de carbono desde GPP menos las pérdidas de carbono (respiración, lixiviación, etc).	11
1.5.	Esquema representativo del modelo DCESS [9]. En el que se muestra las interacciones entre los distintos módulos y los factores externos.	12
1.6.	Geometría estándar de modelo DCESS [9].	13
2.1.	División de la tierra en tres zonas de vegetación dominante, cada zona posee una producción primaria, NPP y distribución de biomasa almacenada característica. Por simplicidad solo se muestra la división en el hemisferio norte, un tratamiento similar recibió el hemisferio sur.	19

2.2.	División de la Tierra en tres nuevas zonas de vegetación dominante. El límite Limite Tropical-Desiertos Pastizales es representada por una línea roja discontinua, mientras que el límite Desiertos Pastizales-Extratropical se representa mediante una línea azul discontinua, por ultimo la linea verde (temperatura promedio anual igual a $0^{\circ}C$ ) define el límite Extra Tropical- Polar. . . . .	20
2.3.	Distribución latitudinal de la vegetación en función de la desviación de la temperatura local[4]. Se ha marcado con cruces roja y azules los bordes promedio entre las zonas Tropical, Desierto-Pastizales y Extra Tropical respectivamente. . . . .	23
2.4.	En línea continua roja: ploteo de la función característica para el borde Tropical-Desierto Pastizales. Círculos rojos: Datos extraídos de la simulación LPJ para el mismo borde. En línea continua azul: función característica para el borde Desiertos Pastizales-Extra Tropical. Círculos azules: Datos extraídos de la simulación LPJ para el borde anterior. . . . .	26
2.5.	Esquema representativo de los ciclos de glaciación y deshielo. Las flechas indican la dirección de los flujos de carbono tierra-atmósfera. El color marrón rojizo representa el carbono en el suelo, arboles verdes representan carbono en la vegetación. En periodos de crecidas de los hielos y permafrost, estos atrapan carbono (sumidero), cuando el hielo y permafrost retrocede, el carbono es descompuesto y liberado (fuente). . . .	30

<p>3.1. Curvas de concentración de <math>CO_2</math> función del tiempo, desde 1765 (Pre-industrial). En rojo se presenta los resultados del módulo biósfera original, usando un factor de fertilización de <math>CO_2</math> original igual a 0,37[9]. En negro los resultados del mismo modulo original pero con un factor de fertilización igual a 0,65 (valor adoptado recientemente; [16]. En azul los resultados del módulo con la distribución de vegetación implementada. Finalmente, en verde los resultados del módulo con distribución de vegetación y hielo/permafrost. . . . .</p>	35
<p>3.2. Curvas evolución temporal de la desviación de temperatura global atmosférica, desde 1765 (Pre-industrial) y forzado antropogénico A2. En rojo se presenta los resultados del módulo biósfera original, usando un factor de fertilización de <math>CO_2</math> igual a 0,65. En negro los resultados del mismo modulo original pero con un factor de fertilización igual a 0,37. En azul los resultados del módulo con la distribución de vegetación implementada. Finalmente, en verde los resultados del módulo con distribución de vegetación y hielo/permafrost. Notese que las curvas negro, azul y verde son muy semejantes y no se nota la diferencias en la figura. . . . .</p>	36
<p>3.3. Seguimiento temporal de los bordes latitudinales y área disponible para vegetación . Izquierda: En negro se muestra el borde entre Bosque Extratropical-Permafrost (snow line). En azul se muestra el borde entre Desiertos-Pastizales y Bosque Extra tropical. En rojo el borde correspondiente a Bosque Tropical y Desierto-Pastizales. Derecha: Azul, superficie ocupada por los bosques tropicales. Negro, superficie ocupada por los bosques Extra-Tropicales. Rojo, superficie ocupada por los Desiertos-Pastizales. . .</p>	37

3.4.	Curvas de Biomasa total en función del tiempo, desde 1765 (Pre-industrial). En rojo se presenta los resultados del módulo biósfera original, usando un factor de fertilización de $CO_2$ igual a 0,65. En negro los resultados del mismo modulo original pero con un factor de fertilización igual a 0,37 (valor adoptado finalmente). En azul los resultados del módulo con la distribución de vegetación implementada. Finalmente, en verde los resultados del módulo con distribución de vegetación y hielo/permafrost. . . . .	38
3.5.	Biomasa total (hojas, madera, litter y suelo) en función del tiempo para cada zona en la biósfera. Azul: Bosque Extra Tropical. Negro: Desiertos-Pastizales. Rojo: Bosque Tropical. . . . .	39
3.6.	Biomasa total (hojas, madera, litter y suelo) en función del tiempo hasta alcanzar el estado estacionario. Negro continuo: Resultados del modelo con la nueva biósfera implementada. Negro discontinuo: resultados para el modelo original. . . . .	41
3.7.	Biomasa total (hojas, madera, litter y suelo), para simulación bajo un escenario de enfriamiento. La simulación fue realizada hasta alcanzar el estado estacionario. Negro continuo: Nuevabiosfera implementada. Negro discontinuo: biosfera original. . . . .	42
3.8.	(a) Intercomparación del incremento relativo porcentual de biomasa respecto del valor pre-industrial, entre resultados del modelo original (antigua biosfera), el nuevo modelo (nueva biosfera) y LPJ-Gerber et al., 2004 [4] tanto para el calentamiento como enfriamiento. (b)Intercomparación de incrementos relativos porcentuales de biomasa entre reservorios respecto del valor pre-industrial, entre resultados del modelo original, modelo nuevo y LPJ-Gerber et al., 2004 [4] para un enfriamiento. . . . .	43

4.1. A: Concentración de $CO_2$ para el modelo con la nueva biósfera (verde) y con la biósfera original con fertilización 0,37 (rojo). B: Desviación de temperatura global, para el modelo con la nueva biósfera (verde) y con la biósfera original con fertilización 0,37 (rojo). . . . .	45
B.1. Cada celda de la cuadrícula en las simulaciones LPJ puede constar de tipos de uso de la tierra individual o un mosaico de fracciones variables de diferentes tierras agrícolas y la vegetación natural. . . . .	56

# Índice de cuadros

1.1. Distribución pre-industrial de la producción primaria neta NPP y la biomasa almacenada en los reservorios de hojas, madera, litter y suelo [9]. . . . .	14
2.1. Distribución de valores pre-industrial de reservorios de biomasa y NPP para el nuevo Módulo Biosfera. [5, 7, 14, 15]. . . . .	20
2.2. Set de datos correspondientes a los bordes Tropical-Desiertos Pastizales y Desiertos Pastizales-E. Tropical en función de la desviación de temperatura global. . . . .	24

# Capítulo 1

## Introducción

A través de la historia de la Tierra, ésta ha tenido una compleja evolución, en particular su clima. El clima de la Tierra depende fundamentalmente de la composición de la atmósfera, y en particular sobre la concentración en ella de gases de efecto invernadero que aumentan la cantidad de calor del sol que se retiene. Los dos más importantes son el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el metano ( $CH_4$ ). Ambos gases están presentes naturalmente en la atmósfera como parte del ciclo de carbono, pero su concentración se ha incrementado en gran medida por las actividades humanas, en particular por la industrialización.

En la actualidad, los diferentes tipos de vegetación se adaptan al clima; en consecuencia, los tipos de vegetación también cambian, decayendo en lugares donde el clima se vuelve demasiado estresante, y prosperando cuando el clima se vuelve favorable. A medida que la Tierra varía su temperatura por los cambios en las concentraciones de los gases de efecto invernadero, la redistribución de la vegetación puede inducir a la biósfera terrestre a ser, ya sea una fuente de  $CO_2$  adicional (acelerando el calentamiento) o un sumidero de  $CO_2$  (amortiguando el calentamiento).

La implementación de una mejora al modelo DCESS <sup>1</sup> que contemple la redistribución de la vegetación, y sus efectos en los flujos de carbono entre la biósfera y la atmósfera son de suma importancia y un problema ingenieril interesante de abordar. En esta tesis se presentan, en primera instancia algunos conceptos claves entorno a la interacción biósfera-atmósfera junto con una descripción del módulo biósfera original, posteriormente se describe la metodología para la implementación del nuevo módulo biósfera y la evaluación junto con la validación de éstas mejoras.

## 1.1. Producción Primaria Neta, NPP

Cuando se habla de producción de un ecosistema se hace referencia a la cantidad de energía que ese ecosistema es capaz de aprovechar. Una pradera húmeda y templada, por ejemplo, es capaz de convertir más energía luminosa en biomasa que un desierto y, por tanto, su producción es mayor. La producción primaria bruta (GPP) de un ecosistema es la energía total fijada mediante fotosíntesis por las plantas. La producción primaria neta (NPP) es la energía fijada por fotosíntesis menos la energía empleada en la respiración, es decir la producción primaria bruta menos la respiración.

$$NPP = GPP - R_{plant}$$

Cuando la NPP es positiva, la biomasa de las plantas del ecosistema va aumentando. Es lo que sucede, por ejemplo, en un bosque joven en el que los árboles van creciendo

---

<sup>1</sup>Existen modelos computacionales que permiten realizar estudios biogeoquímicos de la tierra, uno de ellos es el modelo DCESS [9], modelo global del Sistema Tierra de baja complejidad y resolución espacial, éste cuenta con los módulos de atmósfera, océano, sedimento oceánico, biósfera terrestre y litósfera.

y aumentando su número. Cuando el bosque ha envejecido, sigue haciendo fotosíntesis pero toda la energía que recoge la emplea en la respiración, la producción neta se hace cero y la masa de vegetales del bosque ya no aumenta. La productividad de la biósfera está concentrada en áreas sometidas a rápidos cambios en el uso del suelo. Los bosques tropicales húmedos, por ejemplo, ocupan el 12% de la superficie terrestre, pero representa un tercio de la producción primaria terrestre (ver Figura 1.1). La NPP así como GPP son medidas en intervalos de tiempo largos, generalmente años. Así una manera usual de medida de NPP sería gramos de biomasa o de carbono por metro cuadrado y por año, es decir,  $[gC/m^2y]$  o  $[KgC/m^2y]$ .

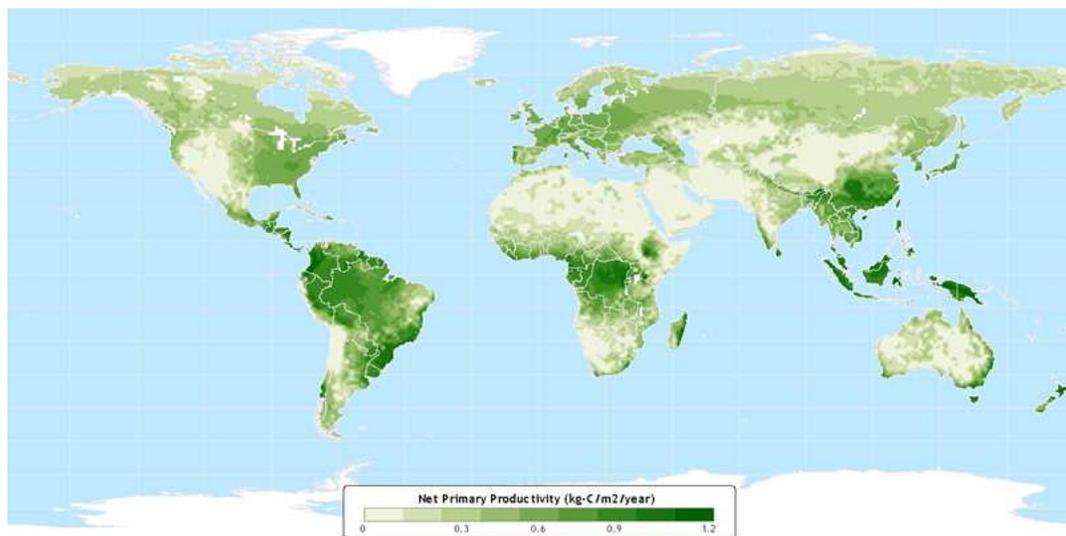


Figura 1.1: Distribución global de la Producción Primaria Neta [6]

## 1.2. El concepto Bioma

Diferencias de temperatura y precipitación determinan los tipos de plantas que crecen en un área dada (ver Figura 1.2). En términos generales, la altura, densidad y diversidad de especies disminuye de climas cálidos y húmedos a climas fríos y secos.

Regiones con tipos de clima y de vegetación dominante similares se llaman biomas. Hay diferentes sistemas para la clasificación de biomas, que en general suelen dividir la tierra en dos grandes grupos (biomas terrestres y biomas acuáticos), con un número no demasiado grande de biomas. A escala planetaria y en función de la producción primaria neta para este trabajo se distinguen tres grupos de biomas dominantes; el bosque tropical, los pastizales junto con los desiertos, y los bosques extra tropicales (bosques boreales y templados). Estos son los grandes biomas que caracterizan la biósfera y que tienen un reparto zonal, es decir, que no superan ciertos valores latitudinales.

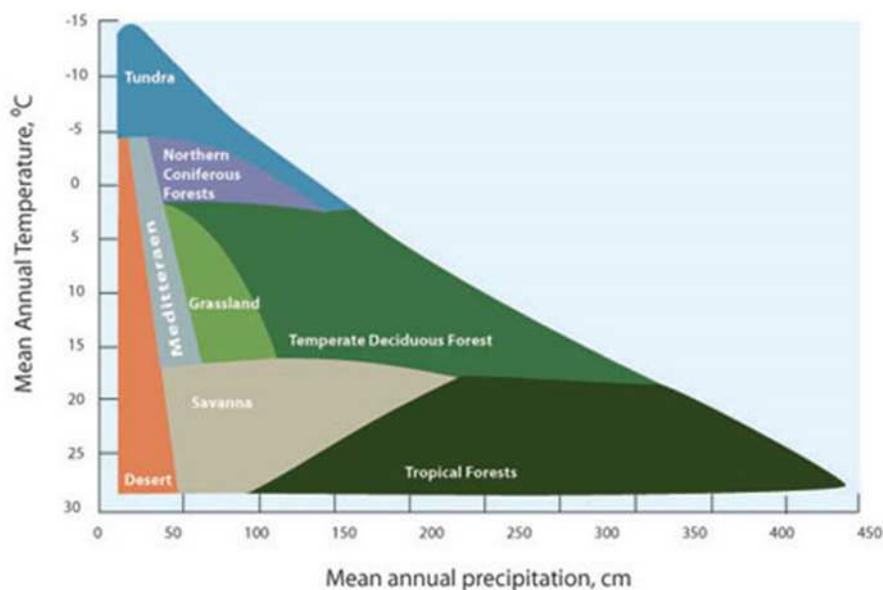
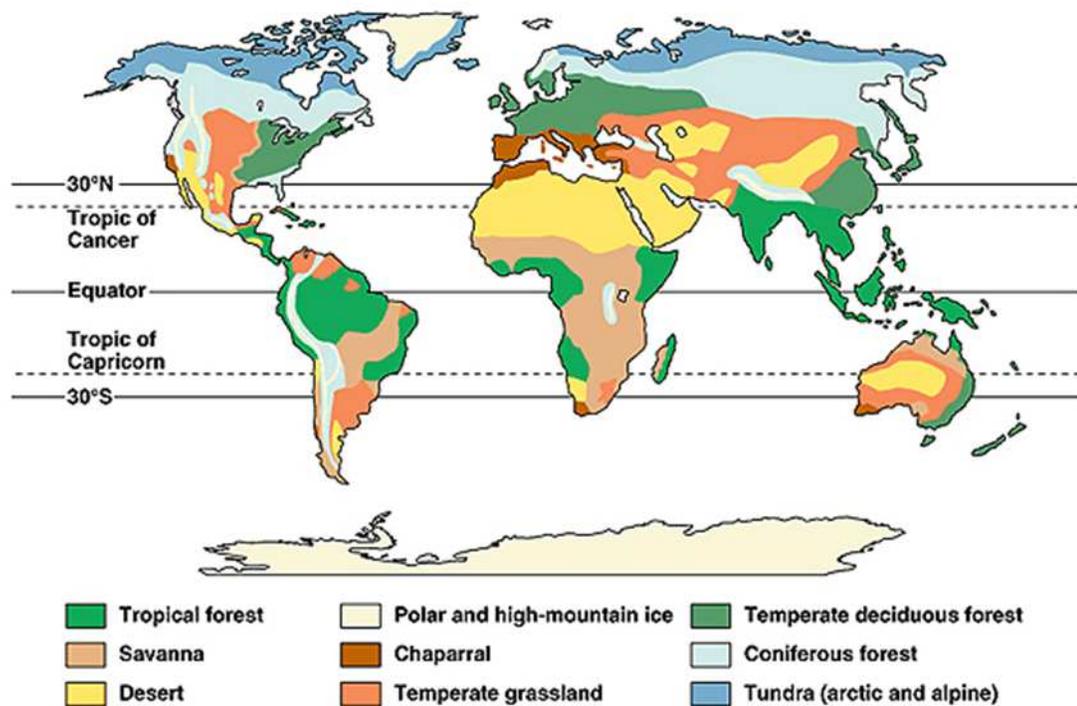


Figura 1.2: Los biomas del mundo. Los biomas dependen principalmente de la temperatura zonal y la precipitación. Forseth, I. (2010) Terrestre Biomas. Naturaleza Educación Conocimiento 3 (10): 11

### 1.2.1. Bosque Tropical

Los bosques tropicales se encuentran en áreas centradas en el ecuador (ver Figura 1.3). América Central y del Sur posee la mitad de los bosques tropicales del mundo. El clima en estos biomas muestra poca variación estacional, con alta precipitación anual y

relativamente constantes temperaturas cálidas. Las plantas dominantes son fanerófitos (árboles, lianas y epífitas). Los bosques tropicales tienen una capa emergente de altos árboles de más de 40[m] de altura, un dosel de árboles de hasta 30[m] de altura, una capa de sub-dosel de árboles y arbustos altos, y una capa de tierra de la vegetación herbácea. Los bosques tropicales tienen la mayor biodiversidad y productividad primaria de cualquiera de los biomas terrestres. La productividad primaria neta oscila entre  $2-3[kg/m^2y]$  o superior. La alta productividad se mantiene a pesar de los suelos pobres en nutrientes debido a una alta tasa de descomposición, favorecidas por las condiciones de humedad y temperatura. La rápida descomposición provoca que la mayor parte de la biomasa se mantenga sobre el suelo, una cantidad mínima queda enterrada. Se estima que el bioma de bosques tropicales contiene más de la mitad de las especies terrestres de la Tierra.



Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

Figura 1.3: Los biomas del mundo. Los biomas son regiones de clima similar y tipos de plantas dominantes.

### 1.2.2. Desiertos y Pastizales

Los desiertos generalmente aparecen en una banda en todo el mundo entre los 15 a 30 grados N y S de latitud. Ellos cubren entre el 26 a 35 % de la superficie terrestre de la Tierra. El clima de los desiertos es dominado por una baja precipitación. La biomasa vegetal dominante en la mayoría de los desiertos se compone de arbustos perennes con raíces extensas y pequeñas, grises o blancas hojas. En los desiertos las semillas pueden permanecer viables en el suelo durante varios años, hasta que se produzcan las condiciones de precipitación y temperatura adecuadas, tras lo cual pueden germinar. Estas plantas anuales crecen rápidamente, completando su ciclo de vida en un par de semanas, a continuación, la floración y el establecimiento de la semilla antes de las reservas de agua del suelo se agotan. Con la excepción de las grandes floraciones de plantas anuales, la productividad primaria neta en la mayoría de los desiertos es baja y muy variable. Existe una relación positiva entre la productividad y la precipitación, y los valores pueden variar desde cerca de 0 a  $120[g/m^2y]$ . Al igual que con las sabanas, la productividad varía con la profundidad del suelo y de los patrones de drenaje locales. Biomas de pastizales se producen principalmente en el interior de los continentes (ver Figura 1.3) y se caracterizan por grandes variaciones de temperatura estacionales, con veranos calurosos e inviernos fríos. Las precipitaciones varían, con un peak fuerte en verano. El tipo de comunidad de pastizales que se desarrolla, y la productividad de los pastizales, depende en gran medida de la precipitación. Precipitación superior conduce a altas hierbas en las praderas, con una alta biodiversidad de gramíneas y herbáceas.

Baja precipitación conduce a praderas de hierba corta y pastizales áridos. Productividad primaria neta en pastizales secos puede ser  $400[g/m^2y]$ , mientras que, con alta precipitación puede llegar a una producción de hasta  $1[Kg/m^2y]$ .

### **1.2.3. Bosque Extratropical**

Como bosque Extra Tropical, nos referimos al conjunto de Bosques Templados y Boreales, en esta tesis estos dos biomas, son agrupados como uno solo más grande, llamado Extra Tropical.

El bosque Boreal situado en latitudes más altas (ver Figura 1.3), es un bioma dominado por hojas de aguja, tolerantes a las sequías, árboles de hoja perenne, y un clima que consta de inviernos largos y fríos y veranos frescos cortos. La biodiversidad es baja en este bosque de dos capas compuesto por un dosel de árboles y una capa de tierra de hierbas o musgos. El dosel en gran parte del bosque extra tropical se compone de sólo una o dos especies. La escasa biodiversidad se refleja en la baja productividad primaria neta de 200 a  $600[g/m^2y]$ . Productividad varía con la precipitación, la duración del período libre de heladas, y el drenaje del suelo local. Las bajas temperaturas conducen a retrasar la descomposición y acumulando una gran cantidad de biomasa. Hasta un 60% de la biomasa puede quedar almacenada en el suelo.

Por otro lado, los bosques templados se encuentran en latitudes medias, donde se producen inviernos fríos, veranos cálidos y altas precipitaciones media anual. Este tipo de bosque se compone de árboles caducifolios que pierden sus hojas todos los años debido a la temporada invernal fría y seca y se renuevan para la temporada cálida y lluviosa propia del clima continental húmedo, como es el caso de los bosques de robles, arces, hayas y olmos. La productividad primaria neta oscila entre 600 y  $1500 [g/m^2y]$

con alta producción de litter (desechos). El litter sirve como una vía importante para el reciclaje de nutrientes.

## 1.3. Componentes Climáticos

A continuación se describen los componentes climáticos involucrados en el clima a gran escala utilizados en esta tesis.

### 1.3.1. Gases de Invernadero

Dentro de la composición atmosférica, existen alrededor de 20 gases, pero sólo unos pocos de ellos tienen un efecto radiativo importante en lo que a modificación climática respecta.

Dentro de estos gases, los principales constituyentes atmosféricos (naturales<sup>2</sup>) que poseen un alto impacto climático son el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ) y vapor de agua.

- Dióxido de Carbono: Este gas es uno de los más importantes dentro de los nombrados anteriormente, si bien su impacto radiativo no es tan alto, su presencia en la atmósfera es muy alta, en donde su ciclo abarca los reservorios en el océano, atmósfera y el suelo terrestre. El  $CO_2$  es un gas proveniente de la quema de carbono, y es por ello que la mayor presencia de carbono en la atmósfera es en forma de este gas. El intercambio de carbono entre el océano y la atmósfera es relativamente rápido, por tanto el tiempo de renovación o recambio de este gas es entre 4 a 12 años [2], sin embargo, el

---

<sup>2</sup>Se exceptúan los gases de tipo halocarbonos, tales como clorofluorocarbonos (CFCs), si bien su potencial invernadero es enorme, su origen es exclusivamente antropogénico.

tiempo requerido para el cual este constituyente atmosférico alcance un nuevo estado de equilibrio en respuesta a una perturbación es mucho mayor, del orden de los miles de años por varios procesos lentos como carbonate composition y weathering.

Las moléculas de este gas son transparentes a la radiación solar de onda corta, y por el contrario, son fuertes absorbedoras de radiación de onda larga (infrarroja) procedente de la superficie terrestre (Peixoto y Oort, 1992), esto está directamente relacionado al tamaño de la molécula y la longitud de onda que la incide.

- Metano: Este gas entra a la atmósfera mayoritariamente mediante ambientes anaeróbicos, tales como, humedales, plantaciones de arroz y descomposición de materia orgánica, si bien su impacto radiativo es un poco mayor que el dióxido de carbono, su concentración en la atmósfera es en menor cantidad, es por ello que su medición se realiza en partes por billón (ppb) en vez de partes por millón (ppm) y además su tiempo de vida en la atmósfera es de alrededor de 9-12 años [2].

- Óxido Nitroso: Si bien su concentración atmosférica es pequeña, su potencial invernadero está muy por encima que incluso el metano. Este gas es producido por fuentes biológicas en el suelo y agua y destruido en la estratósfera. A diferencia del Metano, el tiempo de vida en la atmósfera del  $N_2O$  es alrededor de 114 años [2].

- Vapor de agua: Es el mayor gas de efecto invernadero, este se condensa para formar nubes e influye directamente en la cantidad de radiación solar reflejada y radiación infrarroja absorbida. El vapor de agua junto con las nubes proporcionan al rededor del 80 % del efecto invernadero de estas décadas (Hartmann, 1994). La fuente y sumidero de este gas corresponden a la evaporación y condensación respectivamente. Debido a esto último, su tiempo de vida es muy corto, que puede variar entre días y semanas.

### 1.3.2. Ciclo del Carbono

El ciclo del carbono, es el ciclo biogeoquímico por el cual de carbono se intercambia entre la biósfera, pedosfera, geosfera, hidrosfera y atmósfera terrestre. El ciclo del carbono comprende una secuencia de eventos que son clave para hacer a la Tierra capaz de sostener la vida; se describe el movimiento del carbono a medida que se recicla y se reutiliza en toda la biósfera.

La biósfera terrestre incluye el carbono orgánico en todos los organismos vivos de la tierra, tanto vivos como muertos, así como el carbono almacenado en los suelos. Cerca de 500 gigatoneladas de carbono se almacenan en la superficie (plantas y otros organismos vivos), mientras que el suelo posee aproximadamente 1.500 gigatoneladas de carbono. La mayor parte de carbono en la biósfera terrestre es el carbono orgánico, mientras que alrededor de un tercio del carbono del suelo se almacena en formas inorgánicas, tales como carbonato de calcio. El carbono orgánico es un componente principal de todos los organismos vivos en la tierra. Los autótrofos extraen el carbono del aire en forma de dióxido de carbono y lo convierten en carbono orgánico, mientras que los heterótrofos reciben de carbono al consumir otros organismos.

La biósfera pierde carbono de varias maneras y en diferentes escalas de tiempo. La combustión o la respiración liberan rápidamente carbono en la atmósfera. También se puede transferir a los océanos a través de ríos o permanecer almacenado en los suelos en forma de carbono inerte. El carbono almacenado en el suelo puede permanecer allí durante miles de años hasta que sea vertido a los ríos por medio de la erosión o liberado a la atmósfera a través de la respiración del suelo. En la figura 1.4 se representan los principales intercambios de carbono entre la biósfera y la atmósfera terrestre.

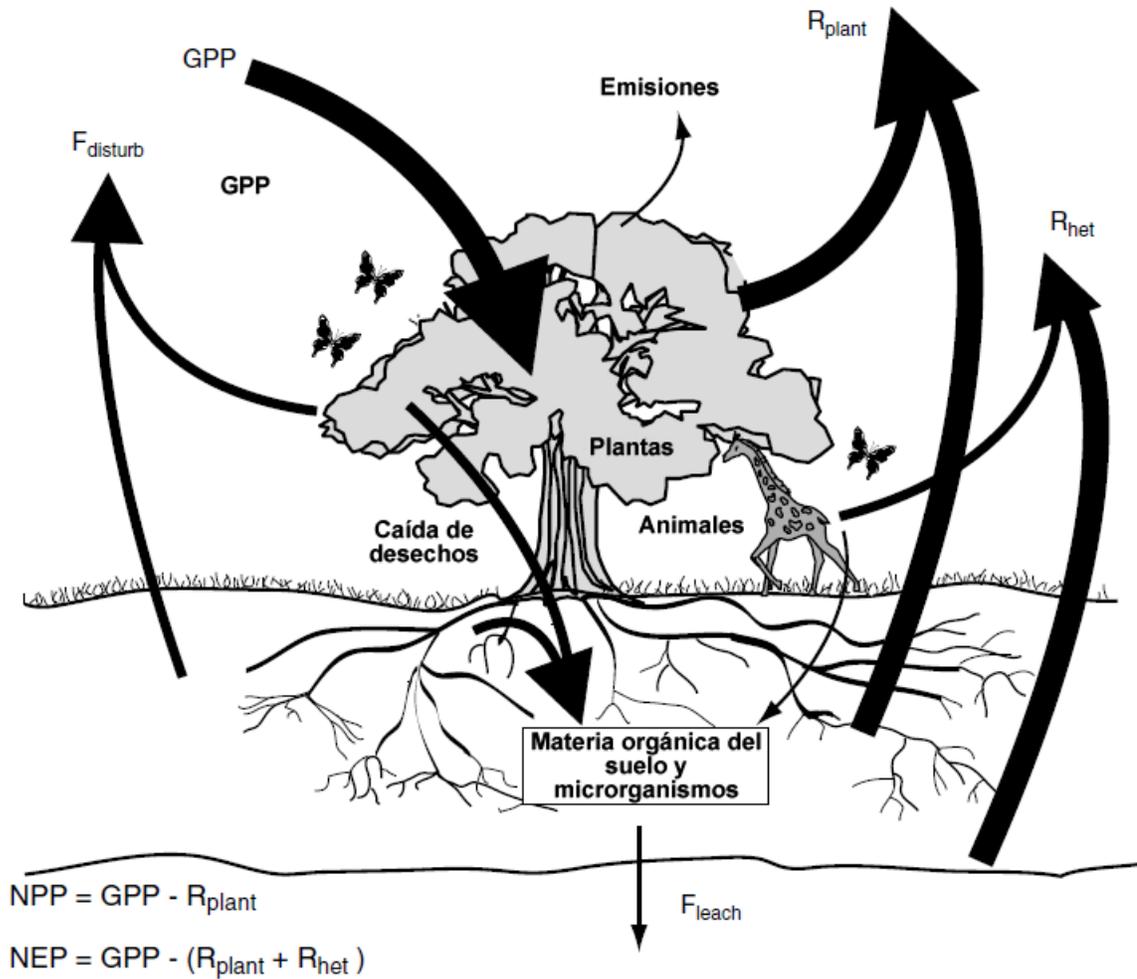


Figura 1.4: Vista general de los principales flujos de carbono de un ecosistema. El carbono entra en el sistema mediante de la producción primaria bruta  $GPP$ , a través de la fotosíntesis de las plantas. Las partes aéreas de las plantas retornan casi la mitad de este carbono en forma de respiración,  $R_{plant}$ . La producción primaria neta  $NPP$ , es la diferencia entre la ganancia por  $GPP$  y la pérdida por  $R_{plant}$ . La mayoría de la  $NPP$  se transfiere a la materia orgánica del suelo. Los animales también transfieren algo de carbono al suelo a través de la excreción y la muerte. La mayoría del carbono que entra en el suelo se pierde a través de la respiración microbiana (junto con la respiración animal es llamada respiración heterotrófica,  $R_{het}$ ). La producción neta del ecosistema es el balance entre  $GPP$  y la respiración heterotrófica más la respiración de las plantas. El suelo pierde carbono adicional a





como 0,65, basado en los resultados de una intercomparacion de modelos de biósfera terrestre más complejos [3] y este valor fue usado en las publicaciones iniciales del modelo. Sin embargo un re análisis de esto se llevó a cabo en el marco de una serie de posteriores intercomparaciones que incluyeron los modelos ([16]) y se encontró que un factor menor, 0,37 es una mejor aproximación de la biósfera terrestre. Este valor fue usado en los papers de intercalibración EMIC y ha sido adoptado desde entonces. No se encontró consenso en los modelos para la dependencia de la temperatura [3], solo encontró una muy baja dependencia en 5 modelos de la intercomparacion. Sobre esta base se ha descuidado la dependencia de la temperatura en la ecuación 1.12. Siguiendo a [11], la NPP es distribuida entre hojas y madera en una proporción fija 35:25, todas las hojas perdidas van al litter, la madera perdida es dividida entre litter y suelo en la razon fija 20:5, el litter perdido es dividido entre la atmósfera (como  $CO_2$ ) y el suelo en la razón 45:10. La pérdida de suelo entra en la atmósfera como  $CO_2$  y, en menor medida va como  $CH_4$ . La sepultura orgánica de la tierra no se considera.

NPP [ $GtC/y$ ]	Hojas [ $GtC$ ]	Madera [ $GtC$ ]	Litter [ $GtC$ ]	Suelo [ $GtC$ ]
60	100	500	120	1500

Cuadro 1.1: Distribución pre-industrial de la producción primaria neta NPP y la biomasa almacenada en los reservorios de hojas, madera, litter y suelo [9].

Las pérdidas en todos los reservorios se toman proporcionales al tamaño del reservorio y para litter y suelo, también dependen de la temperatura media atmosférica según

$$\lambda_Q = Q_{10}^{\bar{T}_a - \bar{T}_{a,PI}/10} \quad (1.2)$$

donde  $Q_{10}$  es el incremento de la actividad para un incremento de 10 grados de  $T_a$ . Elegimos un valor para  $Q_{10}$  igual a 2, una elección típica en los modelos de clima-carbono[3].

Las ecuaciones de conservación para los reservorios de C12 en la biósfera terrestre son

$$dM_G/dt = (35/60)NPP - (35/60)(NPP_{PI})(M_G/M_{G,PI}) \quad (1.3)$$

$$dM_W/dt = (25/60)NPP - (25/60)(NPP_{PI})(M_W/M_{W,PI}) \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} dM_D/dt &= (25/60)NPP(M_G/M_{G,PI}) \\ &+ (20/60)(NPP_{PI})(M_W/M_{W,PI}) \\ &- (55/60)(NPP_{PI})\lambda_Q(M_D/M_{D,PI}) \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} dM_S/dt &= (5/60)NPP(M_W/M_{W,PI}) \\ &+ (10/60)(NPP_{PI})\lambda_Q(M_D/M_{D,PI}) \\ &- (15/60)(NPP_{PI})\lambda_Q(M_S/M_{S,PI}) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Las ecuaciones de conservación para los reservorios de C13 en la biósfera terrestre son

$$\begin{aligned} d^{13}M_G/dt &= {}^{13}\alpha_L(p^{13}CO_2/pCO_2)(35/60)NPP \\ &- (35/60)(NPP_{PI})(^{13}M_G/M_{G,PI}) \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} d^{13}M_W/dt &= {}^{13}\alpha_L(p^{13}CO_2/pCO_2)(25/60)NPP \\ &- (25/60)(NPP_{PI})(^{13}M_W/M_{W,PI}) \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned}
d^{13}M_D/dt &= (35/60)(NPP_{PI})(^{13}M_G/M_{G,PI}) \\
&+ (20/60)(NPP_{PI})(^{13}M_W/M_{W,PI}) \\
&+ (55/60)(NPP_{PI})\lambda_Q(^{13}M_D/M_{D,PI})
\end{aligned} \tag{1.9}$$

$$\begin{aligned}
d^{13}M_S/dt &= (5/60)(NPP_{PI})(^{13}M_W/M_{W,PI}) + (10/60)(NPP_{PI})\lambda_Q(^{13}M_D/M_{D,PI}) \\
&- (15/60)(NPP_{PI}) - (1 - ^{13}\alpha_M)\lambda_{CH_4,PI}pCH_4_{PI}\lambda_Q(^{13}M_S/M_{S,PI})
\end{aligned} \tag{1.10}$$

donde  $^{13}\alpha_L$  es el factor de fracción de  $^{13}C$  de la fotosíntesis terrestre, tomado como 0,9819. Esto corresponde al 1,81 % fracción lo que refleja una dominación de  $C3$  sobre la productividad de plantas  $C4$  y unos valores de  $\delta^{13}C$  de la biósfera terrestre alrededor de 2,5 % (Joos y Bruno, 1998). El intercambio de carbono en forma de  $CO_2$  entre la atmósfera y la biósfera, depende del tamaño y la variación de los reservorios asociados a litter y suelo. La ecuación que relaciona lo mencionado anteriormente, se presenta a continuación.

$$U_{CO_2} = \left( -NPP + \left( \frac{45}{55} \right) \Delta L * L + \Delta S * S \right) \tag{1.11}$$

donde  $\Delta L$  y  $\Delta S$  son las variaciones en los reservorios litter y suelo respectivamente, calculadas en las ecuaciones 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6. Mientras que  $L$  y  $S$  son los tamaños de dichos reservorios.

El intercambio Biósfera/atmósfera de carbono en forma de metano queda representado por

$$U_{CH_4} = LBMP \tag{1.12}$$

donde  $LBMP$  es la producción de metano de la biósfera terrestre dependiente de  $Q_{10}$  y la temperatura. Explícitamente dicha producción tiene la siguiente forma

$$LBMP = LBMP_0 \frac{S}{S_{PI} Q_{10}^{(T_a - T_{a,PI})/10}} \quad (1.13)$$

Donde  $S$  es el reservorio de suelo, y el sub-índice PI hace referencia al valor pre-industrial.

# Capítulo 2

## Desarrollo

El clima terrestre depende fundamentalmente de la concentración de gases de invernadero, tales como el  $CO_2$  y el  $CH_4$ , gases de presencia natural en la atmósfera como parte del ciclo del carbono. La biósfera terrestre es uno de los principales gestores de estos gases. A medida que las condiciones climáticas cambian, la redistribución de la vegetación puede influenciar a la biósfera a ser una fuente adicional o un sumidero de  $CO_2$ , induciendo al clima a un calentamiento o enfriamiento respectivamente. Es por esto, que es de especial importancia la modificación del módulo biósfera original e introducir los efectos de la redistribución de la vegetación. En este capítulo se describen los métodos para el desarrollo e implementación de la dinámica de Bioma (redistribución de la vegetación) y sus efectos en el clima global.

### 2.1. Partición de Biosfera: Biomas Dominantes

Para la definición de los biomas dominantes a nivel planetario, se usó como criterio principal la producción primaria neta y la biomasa almacenada. Cuando hablamos de

criterio de biomasa almacenada y NPP, nos referimos a que observando los datos de distribución global de la NPP, esta sugiere una división latitudinal, permitiendo definir tres zonas con límites latitudinales (ver Figura 2.1); la primera zona dominada por el bosque tropical, la segunda mayoritariamente por desiertos y pastizales, y por último la zona correspondiente a los bosques extra tropicales (Taiga o bosque boreal y bosques templados).

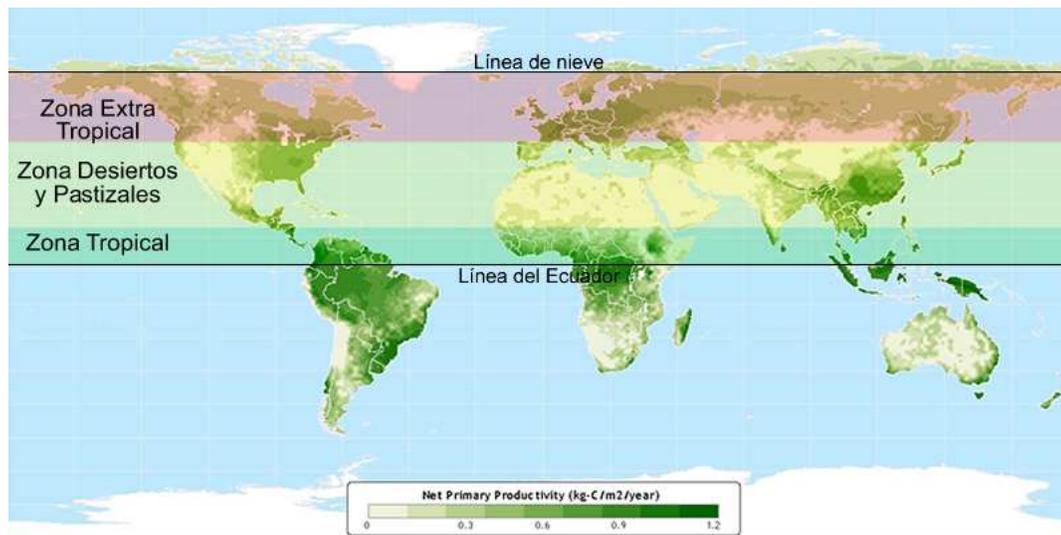


Figura 2.1: División de la tierra en tres zonas de vegetación dominante, cada zona posee una producción primaria, NPP y distribución de biomasa almacenada característica. Por simplicidad solo se muestra la división en el hemisferio norte, un tratamiento similar recibió el hemisferio sur.

Cada una de estas zonas, como se dijo anteriormente posee una producción primaria neta y biomasa almacenada característica. El cuadro 2.1 muestra la distribución de los reservorios de biomasa y la NPP fuera de perturbación, es decir, valores pre-industrial medidos en Giga toneladas de carbono para cada zona.

	Bosque Tropical	Desiertos y Pastizales	Bosque Extra Tropical
Hojas [ <i>GtC</i> ]	15	25	10
Madera [ <i>GtC</i> ]	135	25	90
Litter [ <i>GtC</i> ]	8	20	32
Suelo [ <i>GtC</i> ]	100	250	400
NPP [ <i>GTON/yr</i> ]	12.5	10	7.5

Cuadro 2.1: Distribución de valores pre-industrial de reservorios de biomasa y NPP para el nuevo Módulo Biosfera. [5, 7, 14, 15].

Es importante destacar que los valores de Biomasa almacenada y NPP una vez hecha la partición, son tales que, en conjunto reproducen los valores pre-industriales globales antes de la partición (ver cuadro 1.1, sección 1.4.2).

En consecuencia la geometría del modelo se ve modificada, ya que aparecen dos nuevas líneas que dividen la zona terrestre correspondientes a las transiciones entre zonas de biomas dominantes(ver Figura 2.2).

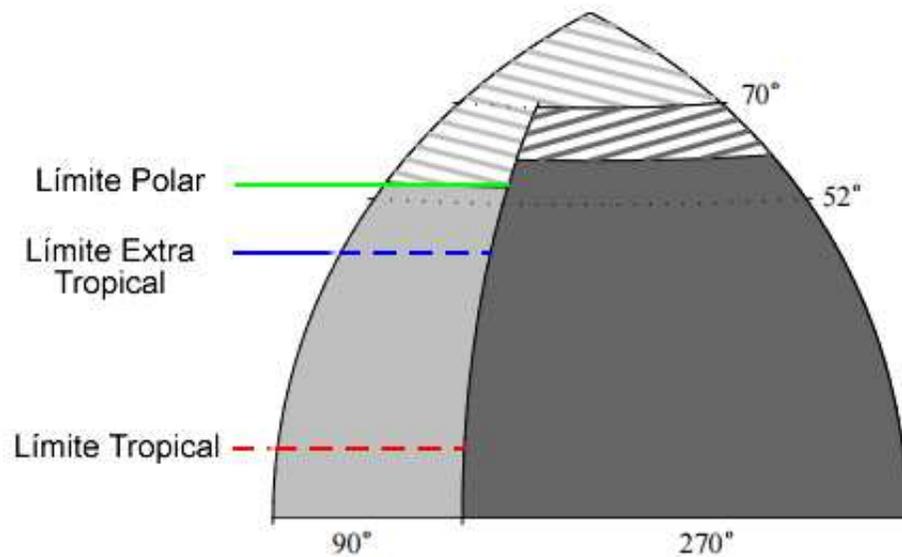


Figura 2.2: División de la Tierra en tres nuevas zonas de vegetación dominante. El límite Límite Tropical-Desiertos Pastizales es representada por una línea roja discontinua, mientras que el límite Desiertos Pastizales-Extratropical se representa mediante una línea azul discontinua, por ultimo la linea verde (temperatura promedio anual igual a  $0^{\circ}C$ ) define el límite Extra Tropical- Polar.

De esta forma, ahora las cuatro ecuaciones de conservación para los reservorios de  $C12$  vistas en la sección 1.4.3 se transforman en doce ecuaciones, cuatro para cada nueva zona definida. Estas ecuaciones pueden ser resumidas usando un índice  $i$  que representa a la zona que pertenece dicha ecuación.

$$dM_G^i/dt = (35/60)NPP^i - (35/60)(NPP_{PI}^i)(M_G^i/M_{G,PI}^i) \quad (2.1)$$

$$dM_W^i/dt = (25/60)NPP^i - (25/60)(NPP_{PI}^i)(M_W^i/M_{W,PI}^i) \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} dM_D^i/dt &= (25/60)NPP^i(M_G^i/M_{G,PI}^i) \\ &+ (20/60)(NPP_{PI}^i)(M_W^i/M_{W,PI}^i) \\ &- (55/60)(NPP_{PI}^i)\lambda_Q^i(M_D^i/M_{D,PI}^i) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} dM_S^i/dt &= (5/60)NPP^i(M_W^i/M_{W,PI}^i) \\ &+ (10/60)(NPP_{PI}^i)\lambda_Q^i(M_D^i/M_{D,PI}^i) \\ &- (15/60)(NPP_{PI}^i)\lambda_Q^i(M_S^i/M_{S,PI}^i) \end{aligned} \quad (2.4)$$

donde  $i = 1, 2, 3$ , con  $1 \rightarrow$  Tropical,  $2 \rightarrow$  Desierto-Pastizales, y  $3 \rightarrow$  Extra Tropical.

Como se aprecia las ecuaciones mantienen su misma forma, y el cambio en los reservorios depende netamente del tamaño del reservorio y de la producción de cada zona, que depende del cambio de área zonal. En el caso de los reservorios  $M_D$  y  $M_S$

siguen dependiendo del mismo factor  $\lambda_Q$ , que está estrechamente relacionado con la temperatura media atmosférica zonal. El cambio de área y temperatura media zonal serán definida más adelante, junto con la definición de los bordes dinámicos.

## 2.2. Definición de Bordes Dinámicos

Al igual que el clima, los límites entre estas nuevas zonas de vegetación no son estáticos, y varían según el clima, y viceversa. En general, como se habló en el apartado 'concepto de bioma', estos bordes varían en función de la temperatura y precipitación, entre otros factores.

Existen modelos complejos, los llamados modelos de dinámica de vegetación mundial (DGVM) que simulan los cambios en la vegetación potencial y sus ciclos biogeoquímicos e hidrológicos asociados, como respuesta a los cambios en el clima. Estos modelos incluyen los efectos de una diversidad de factores climáticos, además de los ya nombrados precipitación y temperatura. En concreto, utilizando el modelo LPJ-DGVM [12, 13] se obtienen resultados para la redistribución de la vegetación en función de la desviación de temperatura local<sup>1</sup> [4]. Valiéndonos de estos resultados podemos definir nuestros bordes en función de una única variable. El trazado de los límites promedios entre las transiciones de biomas puede ser vista en la figura 2.3.

---

<sup>1</sup>En el Apéndice B y en [12, 13] se puede encontrar una descripción breve del modelo LPJ-DGVM.

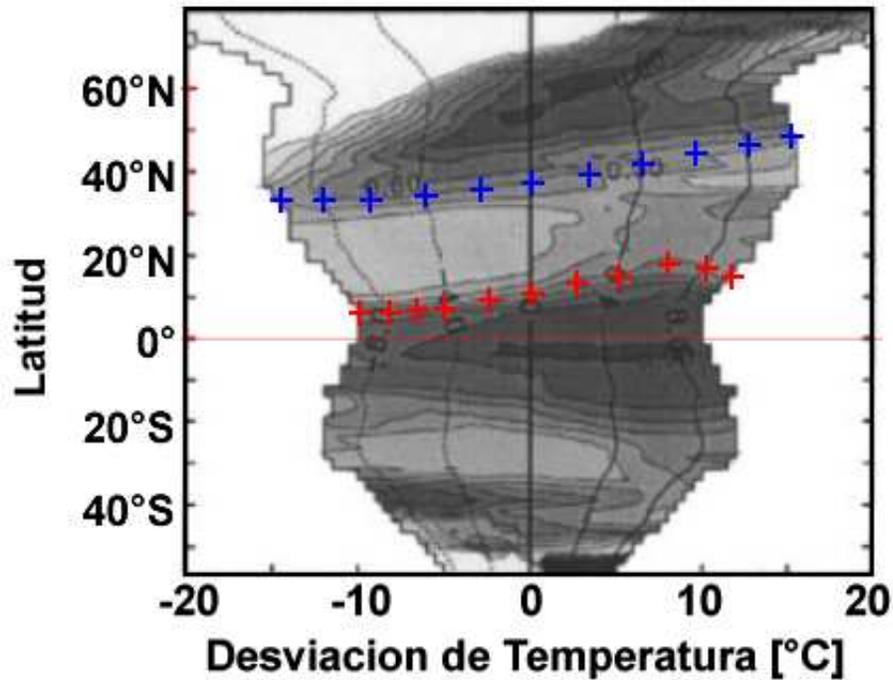


Figura 2.3: Distribución latitudinal de la vegetación en función de la desviación de la temperatura local[4]. Se ha marcado con cruces roja y azules los bordes promedio entre las zonas Tropical, Desierto-Pastizales y Extra Tropical respectivamente.

Es importante mencionar que si bien hemos definido los bordes en función de solo una variable, debemos recordar que los datos que hemos utilizado para nuestra definición han sido calculados usando no solo la temperatura como única variable, si no que diversos otros factores climáticos [13, 12] (ver Apéndice B). En resumen podemos decir que la desviación de temperatura global arrastra consigo los efectos sobre la vegetación de todas las otras variables utilizadas por el modelo LPJ. También elegimos la snowline, definido en el modelo como temperatura promedio cero grados, como borde Extra-Tropical-Polar.

A partir de este set de datos (valores asociados a las cruces rojas y azules de la figura 2.3

DelTemp [ $^{\circ}C$ ]	Latitud Tropical	Latitud E-Tropical
-10	6.5	33.4
-8	6.6	33.5
-6	7.0	33.8
-4	7.8	34.6
-2	9.6	36.1
0	11.2	37.8
2	13.6	39.6
4	15.5	42.2
6	18.4	44.7
8	17.1	45.5
10	15.5	47

Cuadro 2.2: Set de datos correspondientes a los bordes Tropical-Desiertos Pastizales y Desiertos Pastizales-E. Tropical en función de la desviación de temperatura global.

y explicitados en el cuadro 2.2) podemos definir dos funciones características para cada borde. Se usó interpolación polinomial ya que los polinomios son funciones fácil de manejar matemáticamente hablando<sup>2</sup>. El grado del polinomio, es el más bajo que obtenga una buena correlación ( $> 0,95$ ). Finalmente, los datos se ajustan con un polinomio de grado 5, con coeficientes de correlación de 0.97 y 0.98 para el borde Tropical-Desierto Pastizales y Desiertos Pastizales-Extra Tropical respectivamente. Los polinomios con sus constantes de ajuste respectivas son

$$\begin{aligned}
 F_{T-DP} = & -1,803 * 10^{-5} * \delta T_{glob}^5 - 0,0005809 * \delta T_{glob}^4 \\
 & - 0,005168 * \delta T_{glob}^3 + 0,0497 * \delta T_{glob}^2 + 1,092 * \delta T_{glob} + 11,28
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

donde  $F_{T-DP}$  es el borde entre Bosque Tropical y Desiertos-Pastizales,  $\delta T_{glob}$  es la desviación de temperatura global.

$$\begin{aligned}
 F_{DP-B} = & 1,152 * 10^{-5} * \delta T_{glob}^5 - 0,0001785 * \delta T_{glob}^4 \\
 & - 0,004557 * \delta T_{glob}^3 + 0,04156 * \delta T_{glob}^2 + 1,017 * \delta T_{glob} + 37,77;
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

donde  $F_{DP-B}$  es el borde entre Desiertos-Pastizales y Bosque Extra Tropical,  $\delta T_{glob}$  es nuevamente la desviación de temperatura global.

En la figura 2.4 se muestran ploteados los polinomios característicos de cada bordes.

---

<sup>2</sup>Al decir a manejabilidad matemática, nos referimos a que poseen tanto integrales como derivadas analíticas de fácil calculo y que a su vez también son polinomios.

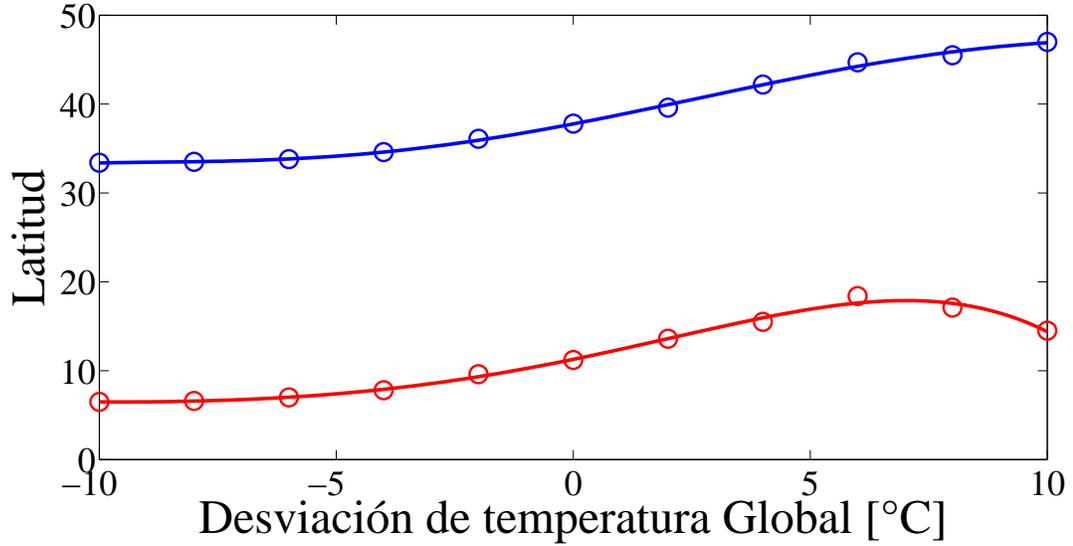


Figura 2.4: En línea continua roja: ploteo de la función característica para el borde Tropical-Desierto Pastizales. Círculos rojos: Datos extraídos de la simulación LPJ para el mismo borde. En línea continua azul: función característica para el borde Desiertos Pastizales-Extra Tropical. Círculos azules: Datos extraídos de la simulación LPJ para el borde anterior.

### 2.3. Ecuaciones de interacción entre reservorios

Al hacer la partición de la biósfera y definir los bordes dinámicos, que en pocas palabras definen el área de tierra disponible para que cada tipo de vegetación crezca, se deben particionar la ecuaciones correspondiente a la interacción entre reservorios descritas en el apartado 1.4.2. De esta manera la ecuación 1.12 correspondiente a la producción primaria se transforma en tres nuevas ecuaciones, una para cada zona y además se introduce en cada una de estas el factor  $F_{area}$ , que representa el cambio de área correspondiente a cada nueva zona definida. Así se tiene el siguiente set de ecuaciones

$$NPP_T = NPP_{T,PI} F_{area}^T (1 + F_{CO_2} \ln(pCO_2/pCO_{2,PI})) \quad (2.7)$$

$$NPP_{DP} = NPP_{DP,PI} F_{area}^D P (1 + F_{CO_2} \ln(pCO_2/pCO_{2,PI})) \quad (2.8)$$

$$NPP_B = NPP_{B,PI} F_{area}^B (1 + F_{CO_2} \ln(pCO_2/pCO_{2,PI})) \quad (2.9)$$

los súper índices en los factores de cambio de área hacen referencia a la zona a la que pertenecen. Los factores de cambio de área son calculados según

$$F_{area}^T = \sin(F_{T-DP}) / \sin(F_{T-DP,PI})$$

$$F_{area}^{DP} = (\sin(F_{DP-B}) - \sin(F_{T-DP})) / (\sin(F_{DP-B,PI}) - \sin(F_{T-DP,PI}))$$

$$F_{area}^B = (\sin(F_S) - \sin(F_{DP-B})) / (\sin(F_{S,PI}) - \sin(F_{DP-B,PI}))$$

donde  $F_{T-DP,PI}$ ,  $F_{DP-B,PI}$  y la línea de nieve  $F_{S,PI}$ , representan los valores iniciales de los bordes zonales.

El factor  $\lambda_Q$  dependiente de la temperatura también se ve transformado en tres, donde cada uno depende de la temperatura media de cada zona según

$$\lambda_{Q,T} = Q_{10}^{\bar{T}_T - \bar{T}_{T,PI}} \quad (2.10)$$

$$\lambda_{Q,DP} = Q_{10}^{\bar{T}_{DP} - \bar{T}_{DP,PI}} \quad (2.11)$$

$$\lambda_{Q,B} = Q_{10}^{\bar{T}_B - \bar{T}_{B,PI}} \quad (2.12)$$

donde la temperatura media zonal se calcula siguiendo

$$\bar{T}_T = \frac{\sum_{i=0}^{F_{T-DP}} \cos(i) * T_a(i)}{\sum_{i=0}^{F_{T-DP}} \cos(i)}$$

$$\bar{T}_{DP} = \frac{\sum_{i=F_{T-DP}}^{F_{DP-B}} \cos(i) * T_a(i)}{\sum_{i=F_{T-DP}}^{F_{DP-B}} \cos(i)}$$

$$\bar{T}_B = \frac{\sum_{i=FDP-B}^{F_S} \cos(i) * T_a(i)}{\sum_{i=DP-B}^{F_S} \cos(i)}$$

De esta manera las nuevas ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 correspondientes a la conservación para los reservorios de  $C12$  quedan completamente definidas.

## 2.4. Ecuaciones de intercambio de carbono Biósfera-Atmósfera

Como se explicó en el apartado 1.4.2, el intercambio de carbono entre la atmósfera y la biósfera depende del tamaño y la variación de los reservorios de litter y suelo, ambos asociados a la descomposición de la biomasa. Siguiendo esta línea la ecuación de flujo de  $CO_2$  entre la atmósfera y la biósfera con la división zonal incluida queda definida por la contribución individual de cada zona.

$$\begin{aligned} U_{CO_2} = & \left( -NPP_T + \left( \frac{45}{55} \right) \Delta L_T * L_T + \Delta S_T * S_T \right) \\ & + \left( -NPP_{DS} + \left( \frac{45}{55} \right) \Delta L_{DS} * L_{DS} + \Delta S_{DS} * S_{DS} \right) \\ & + \left( -NPP_B + \left( \frac{45}{55} \right) \Delta L_B * L_B + \Delta S_B * S_B \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

donde  $\Delta L$  y  $\Delta S$  son las variaciones en los reservorios Litter y Suelo respectivamente, mientras que  $L$  y  $S$  son los tamaños de los mismos reservorios. Los subíndices T, DS y B, nuevamente representan a la zona que pertenecen estos reservorios.

Por otra parte, el intercambio Biosfera/Atmosfera de carbono en forma de metano queda representado por

$$U_{CH_4} = LBMP_T + LBMP_{DP} + LBMP_B \quad (2.14)$$

donde  $LBMP_T$ ,  $LBMP_{DS}$  y  $LBMP_B$ , son la producciones de metano de la biósfera terrestre dependientes de  $Q_{10}$  y la temperatura. Explícitamente dichas producciones tienen la siguiente forma

$$LBMP_T = \frac{LBMP_{PI} * S_T}{(S_{T,PI} + S_{DS,PI} + S_{B,PI})Q_{10}^{(T-T_{T,PI})/10}} \quad (2.15)$$

$$LBMP_{DS} = \frac{LBMP_{PI} * S_{DS}}{(S_{T,PI} + S_{DS,PI} + S_{B,PI})Q_{10}^{(T_{DS}-T_{DS,PI})/10}} \quad (2.16)$$

$$LBMP_B = \frac{LBMP_{PI} * S_B}{(S_{T,PI} + S_{DS,PI} + S_{B,PI})Q_{10}^{(T_B-T_{B,PI})/10}} \quad (2.17)$$

donde  $S$  son los reservorios de suelo y el subíndice T, DS y B, se refieren a la zona del reservorio mientras que el subíndice PI se refiere el valor preindustrial de dicho reservorio.

## 2.5. Carbono Atrapado: Permafrost

En los procesos de avance y retroceso de las masa de hielo y existencia de permafrost, se producen flujos interesantes de carbono. En los periodos de glaciación (avance de las masa de hielo) materia orgánica queda atrapada bajo el hielo, quedando aislada de la atmósfera. Con el aumento de la temperatura y el posterior deshielo, la masa glacial retrocede, este carbono atrapado se expone a la atmósfera nuevamente, y posteriormente se descompone liberándose a la atmósfera, contribuyendo así al aumento observado de carbono atmosférico, una representación esquemática es presentada en la figura 2.5.

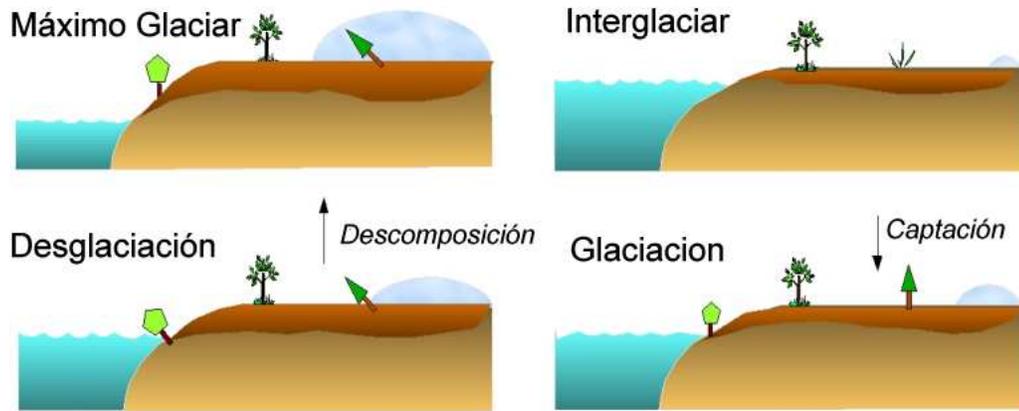


Figura 2.5: Esquema representativo de los ciclos de glaciación y deshielo. Las flechas indican la dirección de los flujos de carbono tierra-atmósfera. El color marrón rojizo representa el carbono en el suelo, arboles verdes representan carbono en la vegetación. En periodos de crecidas de los hielos y permafrost, estos atrapan carbono (sumidero), cuando el hielo y permafrost retrocede, el carbono es descompuesto y liberado (fuente).

Los suelos con carbono atrapado (permafrost) contienen enormes cantidades de carbono orgánico, que podrían actuar como una respuesta positiva al cambio climático global, debido a las tasas de respiración mejoradas con el calentamiento. Dadas las cantidades de carbono almacenadas en permafrost (el doble del contenido en toda la atmósfera), es importante incorporar al nuevo módulo biósfera los flujos de carbono referentes a los avances y retrocesos de los hielos.

Para modelar lo descrito anteriormente, modificamos la ecuación 2.13 referente al intercambio de carbono Biosfera/Atmósfera en forma de  $CO_2$ , introduciendo el término  $G_{perma}$ , el que contiene información acerca del carbono que es almacenado o liberado, según la masa de hielo y extensión de permafrost crece o se reduce. La nueva ecuación de intercambio (fuente/sumidero) de carbono queda descrita de la siguiente forma.

$$\begin{aligned}
U_{CO_2} = & \left( -NPP_T + \left( \frac{45}{55} \right) \Delta L_T * L_T + \Delta S_T * S_T \right) \\
& + \left( -NPP_{DS} + \left( \frac{45}{55} \right) \Delta L_{DS} * L_{DS} + \Delta S_{DS} * S_{DS} \right) \\
& + \left( -NPP_B + \left( \frac{45}{55} \right) \Delta L_B * L_B + \Delta S_B * S_B \right) + G_{perma}
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Donde el nuevo término  $G_{perma}$ , representa al carbono en forma de  $CO_2$  que es almacenado (atrapado) o liberado a la atmósfera y depende del cambio de área cubierta por hielo y la concentración de carbono en esta según.

$$G_{perma} = A_{snow} * P * (1 - \sigma_{CH_4}) \tag{2.19}$$

donde  $P$  es la concentración de carbon atrapado, con un valor promedio según la literatura de  $30[Kgm^{-2}]$ [8]. La razón  $\sigma_{CH_4}$  simboliza a la fracción de carbono que se almacena o se libera como metano, su valor es de 0.0031, es decir, un 0.31 % del carbono es en forma de metano, mientras que un 99.69 % lo es en  $CO_2$ . Finalmente,  $A_{snow}$  es el cambio temporal de área cubierta por hielo y es calculado según

$$A_{snow} = -2\pi R \left( 1 - \frac{270}{360} \right) ((1 - \sin F_{s,2}) - (1 - \sin F_{s,1})) \tag{2.20}$$

con  $R$  el radio terrestre,  $F_{s,2}$  y  $F_{s,1}$  son las líneas del límite polar actual y de la iteración anterior. La razón  $(270/360)$ , hace referencia a la zona cubierta de oceano consistente con la geometría del modelo. Para manter la referencia en el sentido de los flujos de carbono, se introduce el signo menos en la ecuación 2.20 para que cuando el hielo avance, se almacene carbono ( $A_{snow} > 0$ ) y cuando el hielo retrocede ( $A_{snow} < 0$ ), se libere carbono a la atmósfera.

Por último, la ecuación de intercambio en forma de metano también es modificada y queda de la siguiente forma

$$U_{CH_4} = LBMP_T + LBMP_{DP} + LBMP_B + A_{snow} * P * \sigma_{CH_4} \tag{2.21}$$

En esta ecuación se ha introducido el término de la contribución del hielo/permafrost, que tiene la misma forma de la ecuación 2.19, sólo se ha intercambiado la razón de intercambio en forma de  $CO_2$  por la razón de intercambio en forma de  $CH_4$ , es decir,  $(1 - \sigma_{CH_4}) \rightarrow \sigma_{CH_4}$ .

# Capítulo 3

## Evaluación y Análisis

Es importante una vez terminado el desarrollo e implementación de las mejoras del nuevo módulo biósfera, realizar una evaluación y validación de estas, integradas al modelo DCESS. Para ello en este capítulo se comenzará realizando un contraste entre los resultados obtenidos en simulaciones forzadas a un escenario de emisiones antropogénicas A2<sup>1</sup> para el nuevo módulo y el original, describiendo el comportamiento de la biomasa. Luego se simularan reproducciones de escenarios correspondientes a un calentamiento y un enfriamiento, fijando en este ultimo las condiciones de temperatura global y concentración de  $CO_2$  similares a las del ultimo máximo glaciario (LGM).

---

<sup>1</sup>Proyección futura de emisiones antropogénicas de  $CO_2$ . Para información mas detallada de este escenario futuro, se recomienda consultar la referencia 12.

## 3.1. Evaluación general: Modulo Original vs Nuevo

### Módulo

Comparación del nuevo módulo biósfera y el original a partir de los resultados de una simulación desde el periodo pre-industrial (1765) hasta el año 5000, usando un forzamiento de emisiones antropogénicas A2.

#### 3.1.1. Evolución de la temperatura y concentración de $CO_2$

Las concentraciones de  $CO_2$  (ver figura 3.1) varían muy poco entre simulaciones (curvas negra, roja y azul), excepto la simulación con factor de fertilización de 0,37 (color rojo), la cual presenta un peak mayor, esto es debido a la menor capacidad de la biósfera para capturar  $CO_2$ , ya que al tener una fertilización menor, la cantidad de vegetación que crece y quita  $CO_2$  atmosférico también es menor (ver figura 3.4). Ahora fijando la atención en las curvas verde y azul correspondientes a simulaciones con redistribución de vegetación y permafrost respectivamente, es posible identificar que la curva verde presenta una mayor cantidad de  $CO_2$ , esto es debido a que al integrar el permafrost en el caso de un calentamiento, este adiciona un flujo de carbono adicional por retroceso del hielo y descomposición de biomasa enterrada.

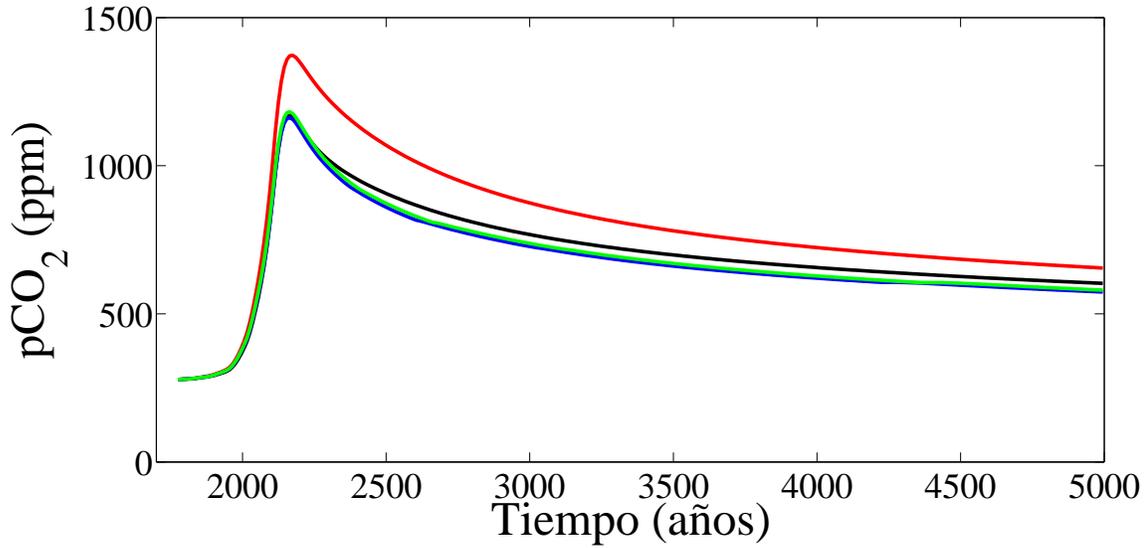


Figura 3.1: Curvas de concentración de  $CO_2$  función del tiempo, desde 1765 (Pre-industrial). En rojo se presenta los resultados del módulo biósfera original, usando un factor de fertilización de  $CO_2$  original igual a 0,37[9]. En negro los resultados del mismo modulo original pero con un factor de fertilización igual a 0,65 (valor adoptado recientemente; [16]. En azul los resultados del módulo con la distribución de vegetación implementada. Finalmente, en verde los resultados del módulo con distribución de vegetación y hielo/permafrost.

Respecto a la evolución de temperatura, esta está muy relacionada con la cantidad de  $CO_2$  atmosférico, mayor cantidad de gas invernadero mayor temperatura, y las curvas son consistentes con toda la descripción anterior referente a las concentraciones de  $CO_2$ .

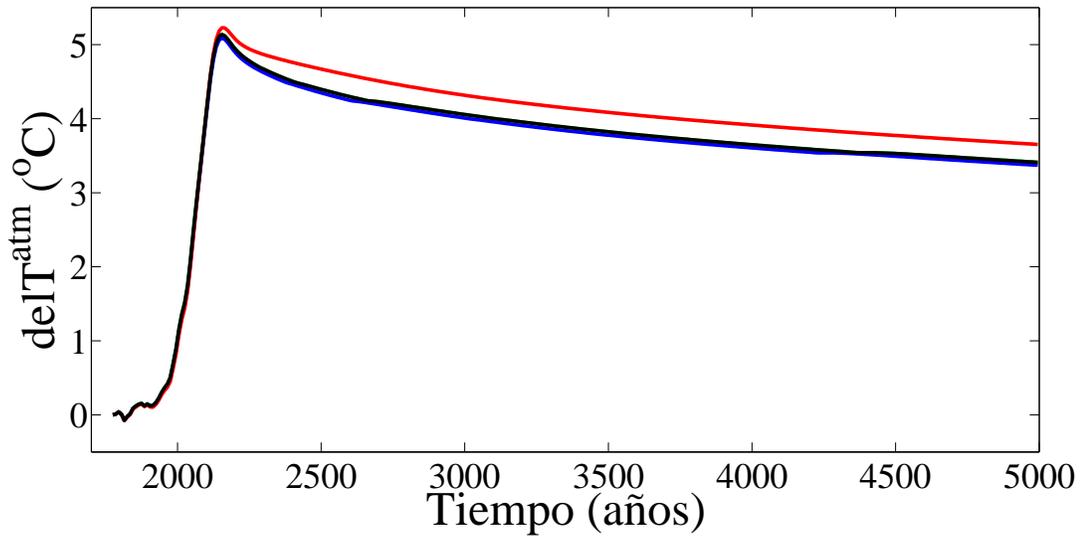


Figura 3.2: Curvas evolución temporal de la desviación de temperatura global atmosférica, desde 1765 (Pre-industrial) y forzado antropogénico A2. En rojo se presenta los resultados del módulo biósfera original, usando un factor de fertilización de  $CO_2$  igual a 0,65. En negro los resultados del mismo modulo original pero con un factor de fertilización igual a 0,37. En azul los resultados del módulo con la distribución de vegetación implementada. Finalmente, en verde los resultados del módulo con distribución de vegetación y hielo/permafrost. Notese que las curvas negro, azul y verde son muy semejantes y no se nota la diferencias en la figura.

### 3.1.2. Evolución de los bordes zonales

Visualizaremos el movimiento de los bordes zonales bajo el aumento de la temperatura (ver figura 3.2). De acuerdo a lo esperado, los bordes van siendo desplazados hacia el polo, alcanzando su máximo desplazamiento de la mano con la máximo desviación de temperatura (año 2200), luego los bordes comienzan a retroceder lentamente junto con la temperatura (ver figura 3.3). Esto es bastante consistente con que la vegetación aumenta hacia los polos cuando las condiciones de temperatura mejoran. También es

importante destacar que existe una disminución de los desiertos y pastizales. Una evolución del área disponible para cada vegetación se visualiza en la misma figura 3.3, en donde también se aprecia que el bosque tropical experimenta el mayor aumento de área y el bosque extra tropical presenta un pequeño aumento<sup>2</sup>.

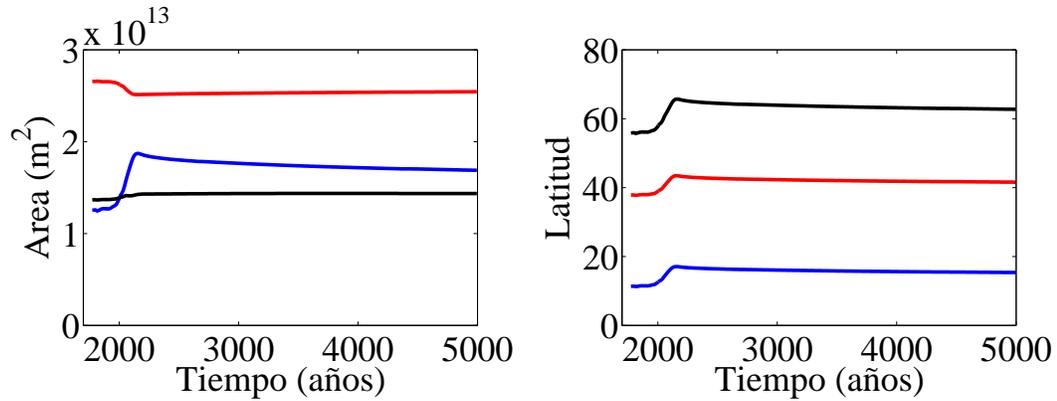


Figura 3.3: Seguimiento temporal de los bordes latitudinales y área disponible para vegetación . Izquierda: En negro se muestra el borde entre Bosque Extratropical-Permafrost (snow line). En azul se muestra el borde entre Desiertos-Pastizales y Bosque Extra tropical. En rojo el borde correspondiente a Bosque Tropical y Desierto-Pastizales. Derecha: Azul, superficie ocupada por los bosques tropicales. Negro, superficie ocupada por los bosques Extra-Tropicales. Rojo, superficie ocupada por los Desiertos-Pastizales.

### 3.1.3. Evolución de la Biomasa Terrestre

A continuación veremos las diferencias entre la biomasa almacenada para las simulaciones de cada modelo. Se contrastan 4 simulaciones diferentes, dos para el modelo original variando el factor de fertilización por  $CO_2$  y otras dos curvas para el modelo con

<sup>2</sup>Igual cambios de latitud presentan un mayor cambio de área si la latitud cambia cerca del ecuador y menor si es más alejado del ecuador. debido a la geometría esférica.

solo la distribución de vegetación implementada y con esta distribución más el permafrost. La curva negra, correspondiente a fertilización de 0,37 presenta menor biomasa frente a la roja con fertilización de 0,65, esto es consistente ya que un factor de fertilización mayor favorece un mayor crecimiento de vegetación. Las curvas referentes a los modelos modificados (verde y azul), difieren levemente, presentando la curva verde, con permafrost integrado una mayor cantidad de biomasa frente a la que solo contiene la redistribución de vegetación (azul), es debido a que el permafrost junto con un calentamiento adicionan un flujo de carbono extra a la atmósfera, y una mayor concentración de carbono aumenta la vegetación y por tanto la biomasa almacenada.

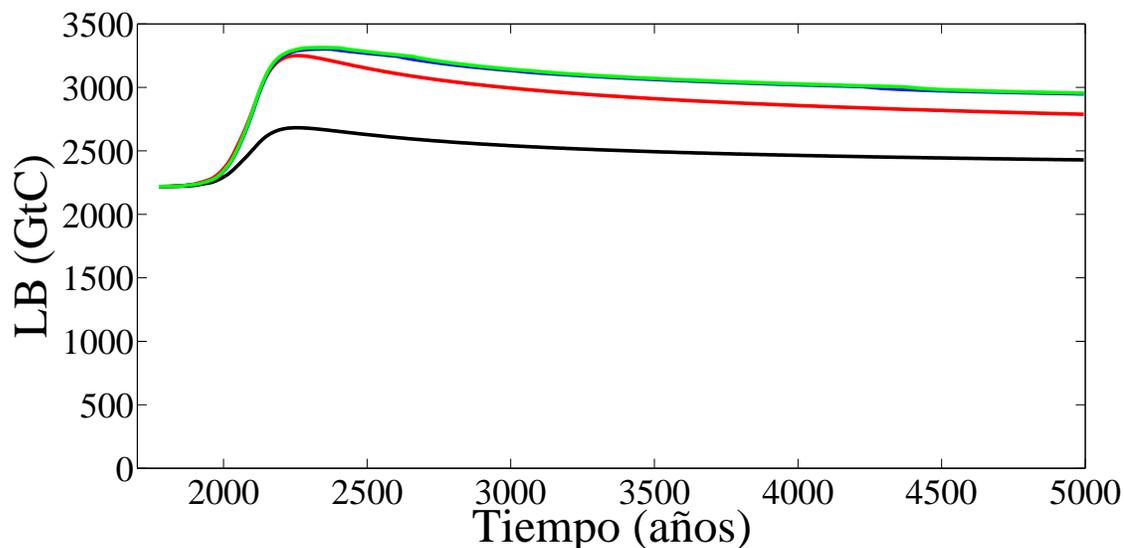


Figura 3.4: Curvas de Biomasa total en función del tiempo, desde 1765 (Pre-industrial). En rojo se presenta los resultados del módulo biósfera original, usando un factor de fertilización de  $CO_2$  igual a 0,65. En negro los resultados del mismo modulo original pero con un factor de fertilización igual a 0,37 (valor adoptado finalmente). En azul los resultados del módulo con la distribución de vegetación implementada. Finalmente, en verde los resultados del módulo con distribución de vegetación y hielo/permafrost.

Los resultados de la biomasa dividida en las tres zonas para el modelo nuevo, muestran que las velocidades de crecimiento de las distintas vegetación son diferentes (ver figura 3.5). En primer lugar la vegetación tropical presenta una evolución temporal que va de la mano con la evolución de la temperatura y  $CO_2$ , es decir, la vegetación tropical sigue los cambios climáticos casi sin desfase de tiempo, esto se ve de manera más evidente si observamos los máximos de temperatura y  $CO_2$  (año 2155) y comparamos con el máximo de vegetación tropical (año 2205). Esto es debido a que la biomasa de la vegetación tropical se encuentra mayoritariamente en la superficie, y es de rápido crecimiento, esto le permite ir casi a la par con los cambios climáticos. Caso contrario es el de la vegetación extra tropical, esta vegetación contiene la mayor cantidad de biomasa bajo tierra (suelo y litter), reservorios de más lenta variación frente a la temperatura, esto sumado a que la vegetación de la superficie es de lento crecimiento hace que la evolución temporal de la biomasa vaya bastante más desfasada de los cambios climáticos, alcanzando el pick 470 años después. Caso intermedio es el de la vegetación de desierto y pastizales.

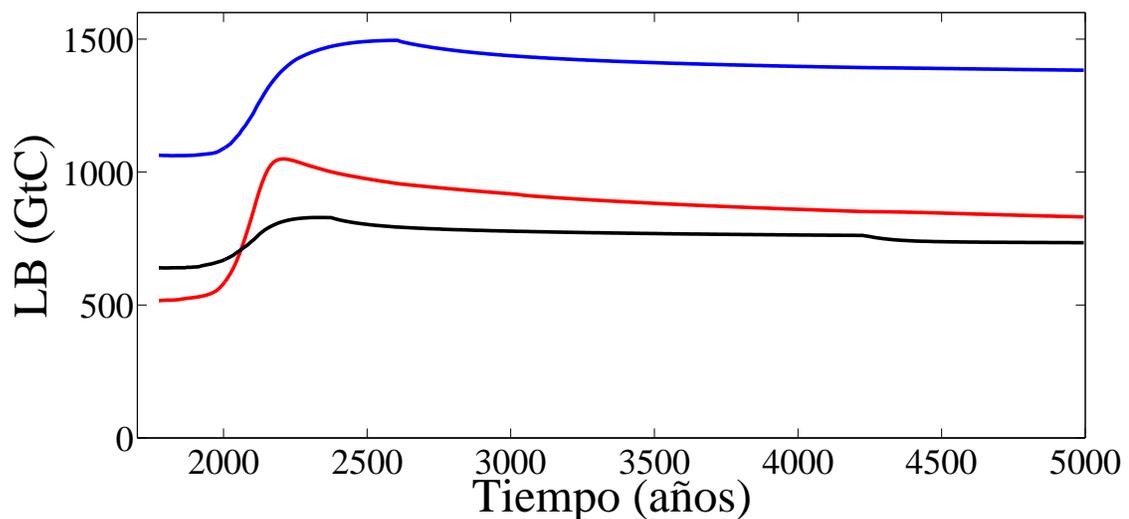


Figura 3.5: Biomasa total (hojas, madera, litter y suelo) en función del tiempo para cada zona en la biósfera. Azul: Bosque Extra Tropical. Negro: Desiertos-Pastizales. Rojo: Bosque Tropical.

## 3.2. Calentamiento

Ahora el modelo nuevo con la redistribución de vegetación y permafrost integrados, es forzado a una concentración de  $CO_2$  atmosférico,  $pCO_2 = 1000ppm$  y se dejara evolucionar naturalmente a la temperatura hasta que alcance el máximo ( $dTem = 5,2^\circ C$ ) predicho por el modelo DCESS para un escenario de emsiones A2 [10] y se forzara a mantener ese máximo. Se realizará el calculo por 2 mil años hasta alcanzar el estado estacionario. Analizaremos el comportamiento de la biomasa y compararemos con la literatura [4].

Los resultados para dicha simulación se presentan en la figura 3.6, la biomasa total alcanza un estado estacionario a partir del año 3500, llegando a un valor de  $3400[GtC]$ , esto simboliza un aumento en la biomasa respecto de los valores preindustriales ( $2200[GtC]$ ) en  $1200GtC$ , es decir, un  $54,4\%$ . Según [4], la biomasa total para estas mismas condiciones de clima caliente aumenta en  $1300[GtC]$  respecto del valor estándar fijada en  $2700[GtC]$ , es decir, presentan un aumento del  $49,1\%$ .

En contraste podemos mirar los resultados en el estado estacionario del modelo original (ver figura 3.6) para las mismas condiciones de clima caliente. El incremento de biomasa en este caso es de  $350[GtC]$  que simboliza un crecimiento de tan solo un  $15\%$  muy por debajo del valor de referencia en la literatura.

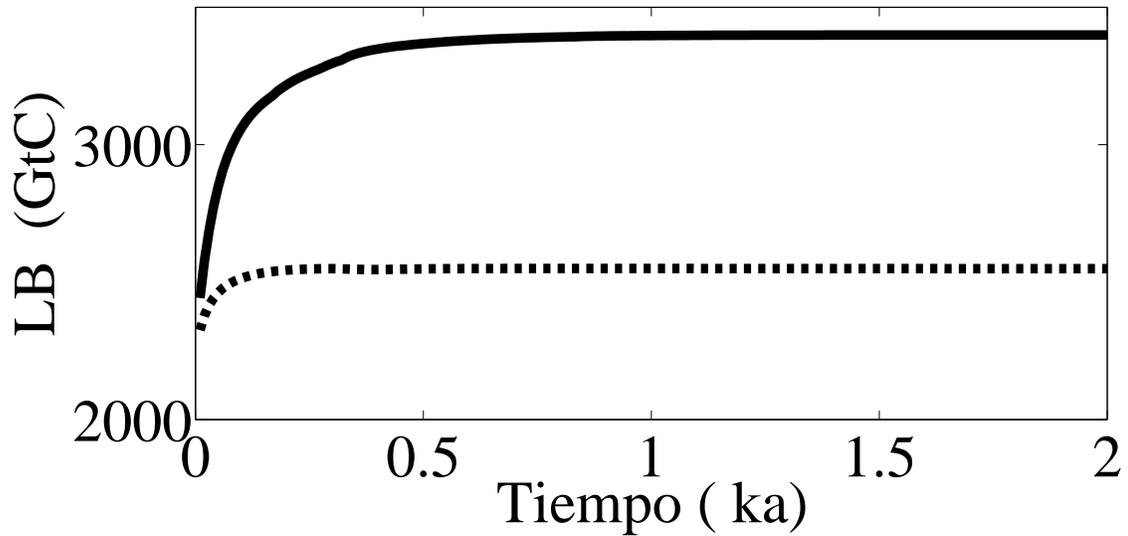


Figura 3.6: Biomasa total (hojas, madera, litter y suelo) en función del tiempo hasta alcanzar el estado estacionario. Negro continuo: Resultados del modelo con la nueva biósfera implementada. Negro discontinuo: resultados para el modelo original.

### 3.3. Enfriamiento: Último Máximo Glaciar, LGM

Evidencia encontrada en núcleos de hielo indican que las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico fueron alrededor de 190 ppm durante el último máximo glaciar (LGM, 18000 años atrás) y la temperatura media global descendió en  $3,5^{\circ}C$  respecto de la temperatura estándar [1]. Se corrieron simulaciones hasta llegar al estado estacionario usando las condiciones de enfriamiento, tanto en el modelo original como en la nueva versión. Analizaremos el comportamiento de la biomasa y compararemos resultados basándonos en la literatura.

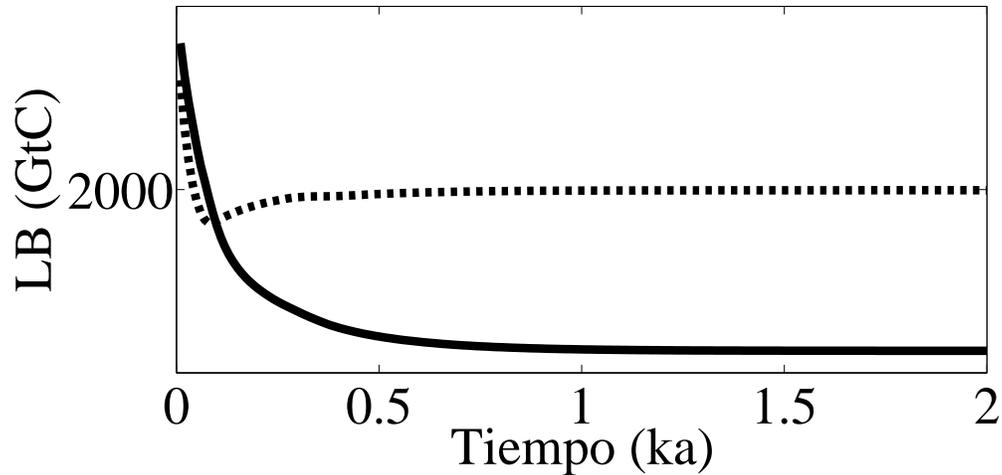
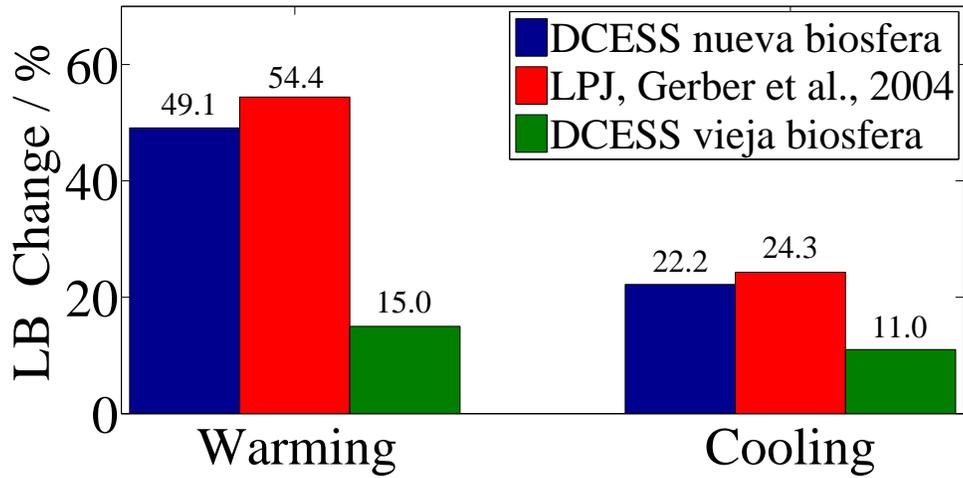


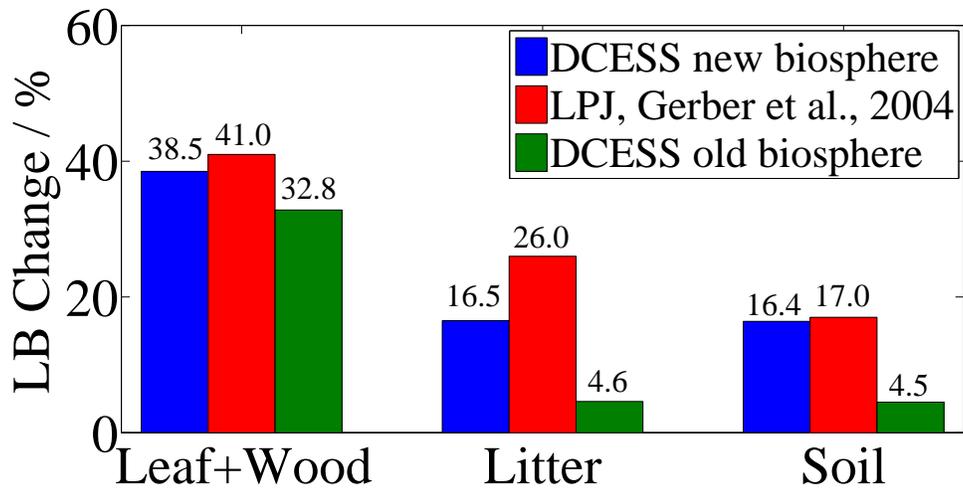
Figura 3.7: Biomasa total (hojas, madera, litter y suelo), para simulación bajo un escenario de enfriamiento. La simulación fue realizada hasta alcanzar el estado estacionario. Negro continuo: Nuevabiosfera implementada. Negro discontinuo: biosfera original.

La literatura [4] nos dice que el aumento de biomasa LGM hasta la actualidad es de un 24,3% mientras nuestro modelo con la nueva biósfera implementada presenta un aumento del 22,2%. Por otra parte el modelo original presenta solo un aumento del 11%, presentando demasiada biomasa para un clima frío (ver figura 3.7). Otro aspecto interesante es comparar el cambio de la biomasa de los reservorios. Se obtienen aumentos para Hojas y Madera del 41%, Litter del 26% y para Suelo del 17%, mientras que en nuestro modelo los crecimientos son 38,5% para Hojas y Madera, 16,5% para Litter y un 16,4% para Suelo.

Para finalizar, presentamos un resumen de la intercomparación de resultados en la figura 3.8



(a) Intercomparación Calentamiento/Enfriamiento LGM



(b) Intercomparación de Reservorios LGM

Figura 3.8: (a) Intercomparación del incremento relativo porcentual de biomasa respecto del valor pre-industrial, entre resultados del modelo original (antigua biosfera), el nuevo modelo (nueva biosfera) y LPJ-Gerber et al., 2004 [4] tanto para el calentamiento como enfriamiento. (b) Intercomparación de incrementos relativos porcentuales de biomasa entre reservorios respecto del valor pre-industrial, entre resultados del modelo original, modelo nuevo y LPJ-Gerber et al., 2004 [4] para un enfriamiento.

# Capítulo 4

## Conclusiones

Con los resultados de las simulaciones realizadas tanto con el nuevo modelo como el original, podemos concluir lo siguiente: se comprobó que realizando una partición latitudinal de la biósfera, en tres zonas con vegetación dominada por Bosque Tropical, Desierto-Pastizales y Bosque Extra Tropical, el módulo biósfera terrestre se vuelve más realístico, ya que el comportamiento de la biomasa tanto en el caso de un calentamiento como en el de un enfriamiento (LGM) mejoran, llegando a resultados bastante acorde con la literatura [4]. Comparando directamente con [4], para un calentamiento, donde obtiene un aumento de biomasa total de 49,1 % se concluye que el nuevo manejo de la vegetación hace que la biomasa total en el nuevo modelo aumente un 54,4 %, bastante más cercano al valor citado que el antiguo modelo, que solo aumentaba un 15 %. Para el caso de un enfriamiento (LGM), [4], obtiene un cambio de biomasa de 24,3 %, mientras el modelo nuevo da una diferencia de 22,2 %, más en acuerdo con el valor citado [4] que el antiguo modelo, que daba como resultados una diferencia 11 %.

El cambio en la biomasa, debido a la redistribución de vegetación y el permafrost, hace que el nuevo modelo de la biósfera capte bastante carbono antropogénico, dejando

más bajo el  $pCO_2$ , amortiguando el calentamiento global comparado con el modelo original y sus últimas aplicaciones (con factor de fertilización 0,37), ver figura 4.1.

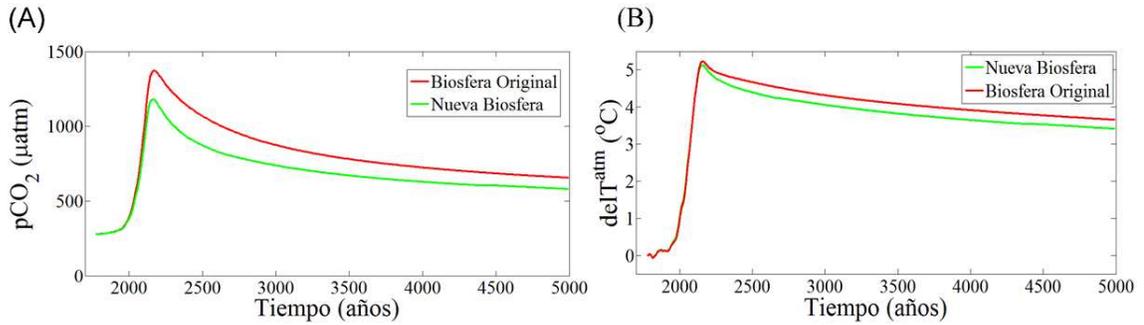


Figura 4.1: A: Concentración de  $CO_2$  para el modelo con la nueva biósfera (verde) y con la biósfera original con fertilización 0,37 (rojo). B: Desviación de temperatura global, para el modelo con la nueva biósfera (verde) y con la biósfera original con fertilización 0,37 (rojo).

Análogamente en el caso de enfriamiento, es importante notar que el permafrost al aumentar el hielo atrapa biomasa, aislándola de la atmósfera, convirtiéndose en un sumidero de  $CO_2$  y  $CH_4$  y reduciendo la cantidad de estos gases en la atmósfera, que favorece la reducción de la temperatura potenciando un enfriamiento.

Por último es importante decir que el modelo DCESS es un modelo de muy baja complejidad y resolución. Intentar simular la redistribución de la vegetación en la biósfera terrestre considerando pocas variables (en nuestro caso la desviación de Temperatura Global) e integrarla al modelo general, manteniendo la filosofía de baja complejidad es un problema no trivial. Por lo tanto es de gran importancia y el mayor valor del trabajo realizado en esta tesis, el haber logrado mejorar y obtener simulaciones más realísticas desde el punto de vista de la biomasa terrestre manteniendo la simplicidad del modelo.

# Apéndice A

## Código Modulo Biosfera Nuevo

```
function [al]=LandExc_Rtest3(AT,LB,fsnowold)

% Calculates Land Biomass changes and land-sea gas exchanges of CO2 and CH4
% Input :
%       AT    - Atmospheric tracers, see ODE_R.m for the data structure.
%       LB    - Land Biomasses
%
% Output:
%       al(1) - increment change in leafy biomass 12C (GtC/s). Tropical
%       al(2) - increment change in woody biomass 12C (GtC/s). Tropical
%       al(3) - increment change in litter biomass 12C (GtC/s). Tropical
%       al(4) - increment change in soil biomass 12C (GtC/s). Tropical
%       al(5) - increment change in leafy biomass 12C (GtC/s). Desert,
%       Savanna and Grassland
%       al(6) - increment change in woody biomass 12C (GtC/s). Desert,
%       Savanna and Grassland
```

```

%      al(7) - increment change in litter biomass 12C (GtC/s). Desert,
%      Savanna and Grassland
%      al(8) - increment change in soil biomass 12C (GtC/s). Desert,
%      Savanna and Grassland
%      al(9) - increment change in leafy biomass 12C (GtC/s).
%      E-Tropical
%      al(10) - increment change in woody biomass 12C (GtC/s).
%      E-Tropical
%      al(11) - increment change in litter biomass 12C (GtC/s).
%      E-Tropical
%      al(12) - increment change in soil biomass 12C (GtC/s).
%      E-Tropical
%      al(13) - land air exchange of DIC [mol/s]
%      al(14) - land air exchange of CH4-C [mol/s]
%      al(15) - N2O production [mol/s]

% Activate global parameters
global sy fdiv Q10 CO2fer mgt rVa Q10met pCH4int pN2Oint pCO2int
global mdts Tsnow fsnow_i divi fgrass_i ftrop_i surfdivi
global grasstem_i troptem_i botem_i perma fracCH4 olf aH
%load latitude %cargamos los datos interpolados a partir de Gerber et al.
%-----
% four box Land biosphere model derived from Siegenthaler and Oeschger
%(1987), includes CO2 fertilisation
% effect, and bacterial respiration in litter and soil as a functions of
% global mean temperature. Biomasses refer to one hemisphere.
% The CO2 fertilization factor, CO2fer, taken from a fit to the results of
% Friedlingstein et al (2006), Journal of Climate

```

```

pCO2=AT(4,1);

% Polynomial constants
p1 = -1.803e-05;p2 = -0.0005809;p3 = -0.005168;p4 = 0.0497;p5 = 1.092;p6 = 11.28;
p7 = 1.152e-05;p8 = -0.0001785;p9 = -0.004557;p10 = 0.04156;p11 = 1.017;p12 = 37.77;

% definimos variables para distintos tipos de vegetacion.
%----

%-- Tropical Forest -----
Gro_T = 15;      %Pre-Industrial(PI) leafy biomass on tropical forest, GtC
Woo_T = 135;    %PI woody biomass on tropical forest, GtC
Lio_T = 8;      %PI litter biomass on tropical forest, GtC
Slo_T = 100;    %PI soil biomass on tropical forest, GtC

NPPL_To = 12.5;%10; %PI primary production on tropical forest, GtC/yr

%-- Grassland, savanna, desert -----
Gro_G = 25;     %Pre-Industrial(PI) leafy biomass on Grassland, GtC
Woo_G = 25;     %PI woody biomass on Grassland, GtC
Lio_G = 20;     %PI litter biomass on Grassland, GtC
Slo_G = 250;    %PI soil biomass on Grassland, GtC

NPPL_Go = 10;  %PI primary production on Grassland, GtC/yr

%-- Boreal Forest
Gro_B = 10;     %Pre-Industrial(PI) leafy biomass on Grassland, GtC

```

```

Woo_B = 90;      %PI woody biomass on Grassland, GtC
Lio_B = 32;      %PI litter biomass on Grassland, GtC
Slo_B = 400;     %PI soil biomass on Grassland, GtC

NPPL_Bo = 7.5;  %PI primary production on boreal forest, GtC/yr

%-----

LBMPo = pCH4int/(rVa*mgt*mdts);    %PI land biosphere methane production,
                                     %GtC/yr minus 1/2"PA",
                                     % anthropogenic input

N2OPo = pN2Oint/(rVa*150*sy);      %PI N2O production, mol/s

%-----

CTa(1,:) = [ 1 .5*(sin(fdiv)^2-1)          ];
CTa(2,:) = [ 1 .5*(sin(fdiv)-sin(fdiv)^3)/(1-sin(fdiv)) ];
RTa      = [ AT(1,1) AT(1,2)]';
PTa      = CTa\RTa;

%-----

Ta      = PTa(1) + PTa(2) *.5* ( 3*sin(divi).^2 -1 ); %Temperature Profile

%-----
%-----

deTglob = (AT(1,1)*sin(fdiv)+AT(1,2)*(1-sin(fdiv)))-15; %Global temperature
                                                    %deviation

%-----

%Calculate vegetation boundaries

%-----

y1= p1*deTglob^5 + p2*deTglob^4 + p3*deTglob^3 + ...

```

```

p4*deTglob^2 + p5*deTglob + p6;    %Characteristic polynomial
                                     %Tropical-Desert edge

y2= p7*deTglob^5 + p8*deTglob^4 + p9*deTglob^3 + ...

p10*deTglob^2 + p11*deTglob + p12;  %Characteristic polynomial
                                     %Desert-E.tropical edge

ftrop  =  degtorad(y1);    %Latitude line of Tropical Forest, radian
fgrass =  degtorad(y2);    %Latitude line of grassland, desert, savanna, radian
fsnow  =  min(pi/2-.001 , asin((2/(3*PTa(2))*...
    (Tsnow-PTa(1)+PTa(2)/2))^(.5)) ); %Snowline, E.tropical-Permafrost edge, radian

ftrop2  =  y1;    %Latitude line of Tropical Forest degree
fgrass2  =  y2;    %Latitude line of grassland, desert, savanna degree
fsnow2  =  radtodeg(min(pi/2-.001 , asin((2/(3*PTa(2))*...
    (Tsnow-PTa(1)+PTa(2)/2))^(.5)) )); %Snowline, E.tropical-Permafrost edge, degree

%--- Area changes in different areas -----

facTrop  =  sin(ftrop)/sin(ftrop_i);          %Factor change area, tropical
facGrass =  (sin(fgrass)-sin(ftrop))/...
    (sin(fgrass_i)-sin(ftrop_i)); %Factor change area, desert, grassland
facBo    =  (sin(fsnow)-sin(fgrass))/...
    (sin(fsnow_i)-sin(fgrass_i)); %Factor change area, E.Tropical

facSnow  =  -(1-olf)*aH*((1-sin(fsnow))-(1-sin(fsnowold)));

    %[m^2] Change of area covered with snow in meters.
    %If facSnow<0 -> covered area decreased.
    %If facSnow>0 -> covered area advanced.
    %The negative sign is consistent with the
    %direction of flows

```

```

%--- Mean zonal temperature ----
tropTem = sum(surfdivi(1,1:ftrop2).*Ta(1,1:ftrop2))/...
        sum(surfdivi(1,1:ftrop2)); % Mean atmospheric temperature Tropical
grassTem = sum(surfdivi(1,ftrop2:fgrass2).*Ta(1,ftrop2:fgrass2))/...
        sum(surfdivi(1,ftrop2:fgrass2)); % Mean atmospheric temperature Desert
boTem    = sum(surfdivi(1,fgrass2:fsnow2).*Ta(1,fgrass2:fsnow2))/...
        sum(surfdivi(1,fgrass2:fsnow2)); % Mean atmospheric temperature E-Tropical

ATem = AT(1,1)*sin(fdiv)+AT(1,2)*(1-sin(fdiv)); %Mean atmospheric temperature
%--- Tropical
AGr_T = (35/60)*NPPL_To/Gro_T;           %decay rate for leafy biomass, GtC/yr
AWo_T = (25/60)*NPPL_To/Woo_T;           %decay rate for woody biomass, GtC/yr
ALi_T = ((55/60)*NPPL_To/Lio_T)*...
        Q10^((tropTem-troptem_i)/10); %decay rate for litter biomass
                                     %with Q10 T dependence, GtC/yr
ASl_T = ((15/60)*NPPL_To-(LBMPo*Slo_T/(Slo_T+Slo_G+Slo_B)))/Slo_T*...
        Q10^((tropTem-troptem_i)/10);           %decay rate for soil biomass
                                               %with Q10 T dependence, GtC/

%--- Desert
AGr_G = (35/60)*NPPL_Go/Gro_G;           %decay rate for leafy biomass, GtC/yr
AWo_G = (25/60)*NPPL_Go/Woo_G;           %decay rate for woody biomass, GtC/yr
ALi_G = ((55/60)*NPPL_Go/Lio_G)*...
        Q10^((grassTem-grasstem_i)/10); %decay rate for litter biomass
                                     %with Q10 T dependence, GtC/yr
ASl_G = ((15/60)*NPPL_Go-(LBMPo*Slo_G/(Slo_T+Slo_G+Slo_B)))/Slo_G*...
        Q10^((grassTem-grasstem_i)/10);           %decay rate for soil biomass
                                               %with Q10 T dependence, GtC/yr

```

```

%--- E-Tropical

AGr_B = (35/60)*NPPL_Bo/Gro_B;           %decay rate for leafy biomass, GtC/yr
AWo_B = (25/60)*NPPL_Bo/Woo_B;           %decay rate for woody biomass, GtC/yr
ALi_B = ((55/60)*NPPL_Bo/Lio_B)*...
      Q10^((boTem-botem_i)/10);           %decay rate for litter biomass with
                                           %Q10 T dependence, GtC/yr

ASl_B = ((15/60)*NPPL_Bo-(LBMPo*Slo_B/(Slo_T+Slo_G+Slo_B)))/Slo_B*...
      Q10^((boTem-botem_i)/10);           %decay rate for soil biomass with
                                           %Q10 T dependence, GtC/yr

%-----

NPPL_T = NPPL_To*facTrop...
      *(1+CO2fer*log(pCO2/pCO2int));      %Net Primary Production Tropical

NPPL_G = NPPL_Go*facGrass...
      *(1+CO2fer*log(pCO2/pCO2int));      %Net Primary Production Desert

NPPL_B = NPPL_Bo*facBo...
      *(1+CO2fer*log(pCO2/pCO2int));      %Net Primary Production E-Tropical

LBMP_T = LBMPo*LB(4,1)/...
      (Slo_T+Slo_G+Slo_B)*Q10met^((tropTem-troptem_i)/10); % Land biosphere
                                           %methane production with Q10 T dependence Tropical

LBMP_G = LBMPo*LB(8,1)/...
      (Slo_T+Slo_G+Slo_B)*Q10met^((grassTem-grasstem_i)/10); % Land biosphere
                                           %methane production with Q10 T dependence Desert

LBMP_B = LBMPo*LB(12,1)/...

```

```

(Slo_T+Slo_G+Slo_B)*Q10met^((boTem-botem_i)/10); % Land biosphere methane
                                %production with Q10 T dependence E-Tropical

N2OP_T = N2OPo*LB(4,1)/...
        (Slo_T+Slo_G+Slo_B)*Q10^((tropTem-troptem_i)/10); % N2O production Tropical
N2OP_G = N2OPo*LB(8,1)/...
        (Slo_T+Slo_G+Slo_B)*Q10^((grassTem-grasstem_i)/10); % N2O production Desert
N2OP_B = N2OPo*LB(12,1)/...
        (Slo_T+Slo_G+Slo_B)*Q10^((boTem-botem_i)/10); % N2O production E-Tropical
% Tropical
al(1) = ((35/60)*NPPL_T - AGr_T*LB(1,1))/sy; % 12C rate of change for
                                %leafy biomass, GtC/s
al(2) = ((25/60)*NPPL_T - AWo_T*LB(2,1))/sy; % 12C rate of change for wood, Gt/s
al(3) = (AGr_T*LB(1,1) + ...
        (20/25)*AWo_T*LB(2,1) - ALi_T*LB(3,1))/sy; % 12C rate of change for
                                %litter, GtC/s
al(4) = ((10/55)*ALi_T*LB(3,1) + (5/25)*AWo_T*LB(2,1)...
        - ASl_T*LB(4,1)-LBMP_T)/sy; % 12C rate of change for soil, GtC/s
% Desert
al(5) = ((35/60)*NPPL_G - AGr_G*LB(5,1))/sy; % 12C rate of change for
                                %leafy biomass, GtC/s
al(6) = ((25/60)*NPPL_G - AWo_G*LB(6,1))/sy; % 12C rate of change for
                                %wood, Gt/s
al(7) = (AGr_G*LB(5,1) + ...
        (20/25)*AWo_G*LB(6,1) - ALi_G*LB(7,1))/sy; % 12C rate of change
                                %for litter, GtC/s
al(8) = ((10/55)*ALi_G*LB(7,1) + (5/25)*AWo_G*LB(6,1)...
        - ASl_G*LB(8,1)-LBMP_G)/sy; % 12C rate of change for soil, GtC/s

```

```

% E-Tropical

al(9) = ((35/60)*NPPL_B - AGr_B*LB(9,1))/sy;    %12C rate of change for
                                                %leafy biomass, GtC/s

al(10) = ((25/60)*NPPL_B - AWo_B*LB(10,1))/sy; % 12C rate of change for
                                                %wood, Gt/s

al(11) = (AGr_B*LB(9,1) + ...
          (20/25)*AWo_B*LB(10,1) - ALi_B*LB(11,1))/sy; % 12C rate of change
                                                %for litter, GtC/s

al(12) = ((10/55)*ALi_B*LB(11,1) + (5/25)*AWo_B*LB(10,1)...
          - ASl_B*LB(12,1)-LBMP_B)/sy; % 12C rate of change for soil, GtC/s

al(13) = (-NPPL_T + (45/55)*ALi_T*LB(3,1) + ASl_T*LB(4,1) + ...
          -NPPL_G + (45/55)*ALi_G*LB(7,1) + ASl_G*LB(8,1) + ...
          -NPPL_B + (45/55)*ALi_B*LB(11,1) + ASl_B*LB(12,1)+...
          facSnow*perma*(1-fracCH4)*10e-15)*mgt/sy; % pCO2-12C sink/source to
                                                %atmosphere from changes in LB, mol/s.

al(14) = (LBMP_T+LBMP_G+LBMP_B+...
          facSnow*perma*fracCH4*10e-15)*mgt/sy;    %CH4-12C source to atmosphere

al(15) = N2OP_T + N2OP_G + N2OP_B;                %N2O source to atmosphere

return

```

# Apéndice B

## Modelo LPJ-DGVM

El modelo LPJ está diseñado para simular la composición y distribución de la vegetación, así como las acciones y los flujos de intercambio tierra-atmósfera de carbono y agua, tanto para los ecosistemas naturales como los agrícolas. Usando una combinación de las relaciones fisiológicas de las plantas, las funciones generalizadas empíricamente y parámetros de rasgos de la planta, que simulan los procesos tales como la fotosíntesis, crecimiento de las plantas, las pérdidas por mantenimiento y regeneración, perturbación por fuego, humedad del suelo, el escurrimiento, evapotranspiración, irrigación y estructura de la vegetación.

LPJ es actualmente uno de los DGVM que tiene al uso dinámico de la tierra plenamente incorporado a escala global y también simula la producción de madera y plantaciones herbáceas de rotación bioenergéticas corta.

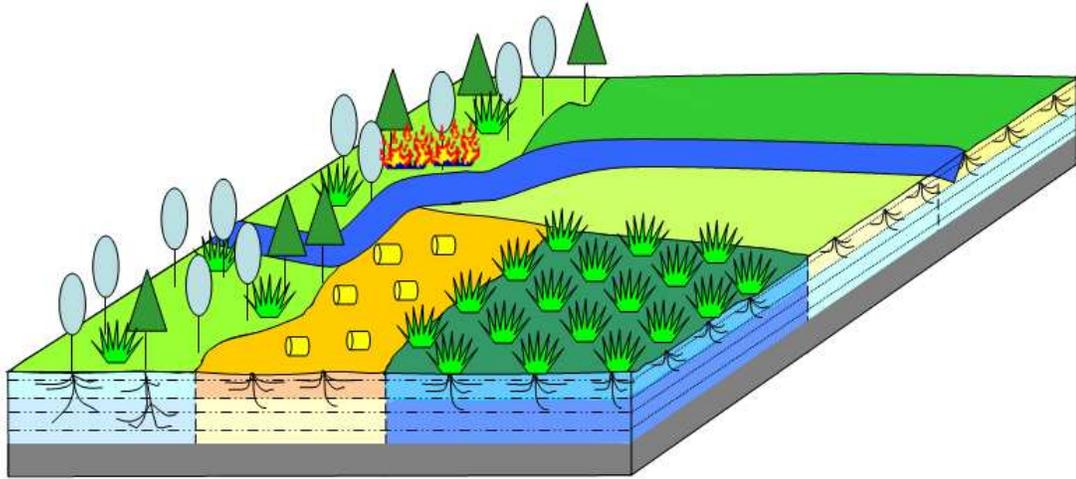


Figura B.1: Cada celda de la cuadrícula en las simulaciones LPJ puede constar de tipos de uso de la tierra individual o un mosaico de fracciones variables de diferentes tierras agrícolas y la vegetación natural.

# Bibliografía

- [1] ADAMS, J. M., FAURE, H., FAURE-DENARD, L., MCGLADE, J., AND WOODWARD, F. Increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present. *Nature* 348, 6303 (1990), 711–714.
- [2] FORSTER, P., RAMASWAMY, V., ARTAXO, P., BERNTSEN, T., BETTS, R., FAHEY, D. W., HAYWOOD, J., LEAN, J., LOWE, D. C., MYHRE, G., ET AL. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. chapter 2. In *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. 2007.
- [3] FRIEDLINGSTEIN, P., COX, P., BETTS, R., BOPP, L., VON BLOH, W., BROV-KIN, V., CADULE, P., DONEY, S., EBY, M., FUNG, I., ET AL. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the c4mip model intercomparison. *Journal of Climate* 19, 14 (2006), 3337–3353.
- [4] GERBER, S., JOOS, F., AND PRENTICE, I. C. Sensitivity of a dynamic global vegetation model to climate and atmospheric co<sub>2</sub>. *Global Change Biology* 10, 8 (2004), 1223–1239.
- [5] GOWER, S. T., KUCHARIK, C. J., AND NORMAN, J. M. Direct and indirect estimation of leaf area index, f<sub>apar</sub>, and net primary production of terrestrial

- ecosystems. *Remote sensing of environment* 70, 1 (1999), 29–51.
- [6] KUCHARIK, C. J., FOLEY, J. A., DELIRE, C., FISHER, V. A., COE, M. T., LENTERS, J. D., YOUNG-MOLLING, C., RAMANKUTTY, N., NORMAN, J. M., AND GOWER, S. T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles* 14, 3 (2000), 795–825.
- [7] SAUGIER, B., ROY, J., AND MOONEY, H. A. Estimations of global terrestrial productivity: converging toward a single number. *Terrestrial global productivity* (2001), 543–557.
- [8] SCHUUR, E., MCGUIRE, A., SCHÄDEL, C., GROSSE, G., HARDEN, J., HAYES, D., HUGELIUS, G., KOVEN, C., KUHRY, P., LAWRENCE, D., ET AL. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, 7546 (2015), 171–179.
- [9] SHAFFER, G., MALSKÆR OLSEN, S., AND PEPKE PEDERSEN, J. Presentation, calibration and validation of the low-order, dcess earth system model (version 1), *geosci. model dev.*, 1, 17–51, doi: 10.5194, 2008.
- [10] SHAFFER, G., OLSEN, S. M., AND PEDERSEN, J. O. P. Long-term ocean oxygen depletion in response to carbon dioxide emissions from fossil fuels. *Nature Geoscience* 2, 2 (2009), 105–109.
- [11] SIEGENTHALER, U., AND OESCHGER, H. Biospheric co<sub>2</sub> emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus B* 39, 1-2 (1987).

- [12] SITCH, S., SMITH, B., PRENTICE, I. C., ARNETH, A., BONDEAU, A., CRAMER, W., KAPLAN, J., LEVIS, S., LUCHT, W., SYKES, M. T., ET AL. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the lpj dynamic global vegetation model. *Global Change Biology* 9, 2 (2003), 161–185.
- [13] SMITH, B., PRENTICE, I. C., AND SYKES, M. T. Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within european climate space. *Global Ecology and Biogeography* 10, 6 (2001), 621–637.
- [14] STERNER, R. W., AND ELSER, J. J. *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*. Princeton University Press, 2002.
- [15] ZHENG, D., PRINCE, S., AND WRIGHT, R. Terrestrial net primary production estimates for 0.5 grid cells from field observations—a contribution to global biogeochemical modeling. *Global Change Biology* 9, 1 (2003), 46–64.
- [16] ZICKFELD, K., EBY, M., WEAVER, A. J., ALEXANDER, K., CRESPIAN, E., EDWARDS, N. R., ELISEEV, A. V., FEULNER, G., FICHEFET, T., FOREST, C. E., ET AL. Long-term climate change commitment and reversibility: An emic intercomparison. *Journal of Climate* 26, 16 (2013), 5782–5809.