

Buenos Aires, Diciembre de 2006



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

**IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LA
VEGETACION EN ARGENTINA**

**Análisis de escenarios de impacto, desarrollo metodológico y
aplicación en el diseño de políticas**

Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad
de Buenos Aires en el área de Ciencias Biológicas

TESISTA: Lic. en Ciencias Biológicas, Nazareno Castillo Marín

DIRECTOR: Dr. en Meteorología, Mario N. Nuñez

Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera



*Este trabajo fue parcialmente financiado por una beca interna doctoral, otorgada por
el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).*

Página para los jurados

**IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LA
VEGETACION EN ARGENTINA**

**Análisis de escenarios de impacto, desarrollo metodológico y
aplicación en el diseño de políticas**

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LA VEGETACION EN ARGENTINA

Análisis de escenarios de impacto, desarrollo metodológico y aplicación en el diseño de políticas

Resumen: El objetivo principal del presente estudio es evaluar los impactos del cambio climático sobre la vegetación en la Argentina. Se evaluó el desempeño de una versión simplificada del modelo CPTEC-PVM y del modelo BIOME4 para simular la distribución de la vegetación, la productividad primaria neta y el índice de área foliar en Argentina. A tal fin, se corrieron los modelos utilizando una climatología actual y se comparó la salida con un mapa de vegetación existente obteniéndose un acuerdo regular para CPTEC y bajo para BIOME4: $k_{\text{cptec}}=0,40$ y $k_{\text{biome4}}=0,32$. Los valores de PPN y IAF_{100} simulados por BIOME4 son coherentes aunque requieren ser validados. Luego de ajustar algunos parámetros en ambos modelos, se logró una muy buena representación de la distribución de la vegetación existente: $k_{\text{cptec}}=0,75$ y $k_{\text{biome4}}=0,63$. Se encararon experimentos de sensibilidad (a temperatura, precipitación y CO_2) y de cambio climático. En este último caso se corrieron los modelos de vegetación, sin ajustes, utilizando escenarios climáticos futuros (2081-2090) de la región generados por el modelo climático regional MM5-CIMA. Ambos modelos simulan para los escenarios (A2 y B2 del IPCC) aumentos en el área ocupada por la vegetación de tipo leñoso. En BIOME4, al agregar el efecto fisiológico del CO_2 la respuesta es aún más pronunciada. Las eco-regiones donde se registra la mayor cantidad de cambios en el tipo de bioma son: chaco seco y monte de llanuras en CPTEC y monte de llanuras y estepa en BIOME4. La PPN aumenta prácticamente en todo el territorio, con la excepción de la región chaqueña. El IAF_{100} muestra incrementos y decrementos dependiendo de la eco-región analizada.

Palabras clave: *modelos de vegetación; impactos del cambio climático; metodologías; modelo climático regional; escenarios climáticos futuros; eco-regiones.*

CLIMATE CHANGE IMPACTS ON THE VEGETATION IN ARGENTINA

Impact scenarios analysis, methodology development and policy design

Abstract: The main objective of this thesis is to evaluate climate change impacts on the vegetation in Argentina. The performance of a simplified version of the CPTEC-PVM and the BIOME4 model was tested to simulate the distribution of “general biomes” in Argentina. Additionally, in the case of BIOME4, we also analyze the net primary productivity (NPP), leaf area index (LAI) and runoff outputs. The vegetation models were run using a present climatology and the biome output was compared to a regional potential vegetation map resulting in a “regular” and “fair” agreement for CPTEC-PVM and BIOME4 respectively ($k_{\text{cptec}}=0,40$ y $k_{\text{biome4}}=0,32$). NPP and LAI BIOME4 outputs were coherent. The models were adjusted resulting in a better representation of biome distribution in Argentina ($k_{\text{cptec}}=0,75$ y $k_{\text{biome4}}=0,63$). Secondly, sensibility analysis and climate change experiments were done. In the last case, the models were run using futures climate scenarios (2081-2090) generated by the MM5 climate regional model (for A2 and B2 IPCC scenarios). Both models simulate an increment in forest-savanna area in Argentina. In BIOME4 including the CO₂ physiological effect the response was even stronger. NPP increases over the main part of the country while LAI shows increments and decrements depending on the study area.

Keywords: *vegetation models; climate change impacts; methodologies; regional climate model; climate change scenarios; eco-regions.*

AGRADECIMIENTOS:

Al Dr. Mario N. Nuñez por la orientación en el trabajo y la confianza depositada en mi para completar el doctorado.

A mis colegas del CIMA por el apoyo y colaboración recibida a lo largo de estos años.

A Jed Kaplan por facilitar el modelo BIOME4 utilizado en esta tesis y por sus valiosas observaciones sobre la síntesis ejecutiva.

A Marcos Daisuke Oyama por sus valiosos aportes sobre los capítulos del CPTEC-PVM.

A Colin Prentice y Leila Zajac por sus valiosos comentarios sobre los aspectos generales y perspectivas a futuro del trabajo.

A los revisores, en especial a Betina, Javier, Carla y Martin que con sus aportes contribuyeron a mejorar la calidad de este manuscrito.

“Es preciso saber lo que se quiere: cuando se quiere ... hay que tener el valor de decirlo, y cuando se dice.... es menester tener el coraje de realizarlo ”

Georges Clemenceau

*A mis padres, Alicia y Luis,
por hacerme tal como quería ser,
una persona feliz.*

A mis hermanos María, Francis y Emi.

*A mi tía Graciela Beaty,
que me transmitió su pasión por la ciencia.*

*A mi familia, amigos y todos aquellos
que me acompañaron y apoyaron
a lo largo de estos años de trabajo.*

OBJETIVOS:

- 1- Desarrollo de una metodología para evaluar impactos del cambio climático sobre la vegetación en la Argentina.
- 2- Evaluación de los impactos del cambio climático sobre la distribución de la vegetación, el Índice de Área Foliar y la Productividad Primaria Neta.
- 3- Identificación de herramientas que contribuyan al diseño de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCION

1.1 CAMBIO CLIMATICO.....	10
1.2 MODELOS CLIMATICOS	17
1.3 IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LA VEGETACION	24
1.4 MODELOS DE VEGETACION	31
1.5 SENSIBILIDAD, VULNERABILIDAD Y ADAPTACION	36

2. MATERIALES Y METODOS - RESULTADOS

2.1 METODOLOGIA GENERAL DE TRABAJO	42
2.2 BASES DE DATOS DE ENTRADA	51
2.3 MODELO CPTEC-PVM Y CPTEC-PVM-CIMA	58
2.4 BIOME4.....	67
2.5 CORRIDAS CONTROL Y VALIDACION DE LOS MODELOS.....	80
2.7 AJUSTES SOBRE LOS MODELOS	98
2.8 AJUSTES EN EL MODELO CPTEC-PVM-CIMA.....	100
2.9 AJUSTES EN BIOME4.....	108
2.10 ANALISIS DE SENSIBILIDAD: BIOMAS	117
2.11 ANALISIS DE SENSIBILIDAD: PPN	125
2.12 CORRIDAS DEL MM5-CIMA	127
2.13 ESCENARIOS CLIMATICOS FUTUROS Y VARIABILIDAD NATURAL.....	131
2.14 CORRIDAS CON ESCENARIOS CLIMATICOS FUTUROS: BIOMAS	135
2.15 CORRIDAS CON ESCENARIOS CLIMATICOS FUTUROS: PPN, IAF Y ESCORRENTIA.	140
2.16 BIOME4: ANALISIS INTEGRAL DE LAS SALIDAS	144
2.17 FUNCIONES DE RESPUESTA DE IMPACTO CLIMATICO Y ANALISIS INVERSO DE IMPACTOS	151

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS A FUTURO..... 156

4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 159

5. INDICE DE MAPAS Y TABLAS..... 169

PREFACIO

Los capítulos 1.1 a 1.5 contienen información introductoria a la temática; los dos primeros, con respecto al sistema climático y su modelado; el tercero describe la relación vegetación-clima, haciendo énfasis en ciertos procesos eco-fisiológicos; el cuarto capítulo es una revisión de las características y tipos de modelos de vegetación; finalmente, el quinto establece el marco de políticas de adaptación y mitigación al cambio climático, en el que se encuadran los resultados de esta tesis.

El capítulo 2.1 establece la metodología de trabajo que se ha utilizado, detallando las actividades realizadas, las dificultades encontrados en su desarrollo y las respuestas implementadas para superarlas.

El capítulo 2.2 describe las bases de datos utilizadas para correr los modelos.

Los capítulos 2.3 y 2.4 explican el funcionamiento de los modelos utilizados.

Los capítulos 2.5 y 2.6 analizan el desempeño de los modelos en las corridas control. En el 2.5 se compara la distribución de biomas simulada con la distribución real correspondiente al mapa de eco-regiones de Parques Nacionales. En el 2.6 se analizan las salidas control de la Productividad Primaria Neta y el Índice de Área Foliar simuladas por BIOME4.

Los capítulos 2.7 a 2.9 describen el desempeño de ambos modelos una vez que se hicieron ciertos ajustes en su funcionamiento.

Los capítulos 2.10 y 2.11 detallan los experimentos de sensibilidad de los modelos a cambios en la precipitación, temperatura y CO₂.

El capítulo 2.12 presenta los patrones de cambio climático (ΔP y ΔT) generados por el modelo MM5-CIMA.

El 2.13 analiza los patrones de cambio climático descritos en el capítulo previo en el contexto de la variabilidad natural del sistema climático.

Los capítulos 2.14, 2.15 y 2.16 describen las salidas de los modelos de vegetación para los escenarios climáticos futuros. A partir de estos resultados, se elaboran las conclusiones principales con respecto a los potenciales impactos del cambio climático sobre la vegetación en Argentina.

El capítulo 2.17 desarrolla un ejercicio metodológico cuya principal importancia radica en constituir una herramienta que facilite la traducción de información de carácter netamente científica en información que sea de utilidad para los decisores políticos en el diseño de políticas de mitigación y adaptación.

El capítulo 3 describe los principales aportes y conclusiones de este trabajo, así como las perspectivas a futuro.

1.1 CAMBIO CLIMATICO

Sistema climático; cambio climático (causas y características); forzantes radiativas (naturales y antropogénicas); efecto invernadero; escenarios futuros de desarrollo económico; escenarios futuros de emisiones de GEI; escenarios de concentración de CO₂; modelos climáticos; escenarios climáticos futuros; incertidumbres.

Clima y sistema climático

El clima suele ser definido como el “promedio del estado del tiempo” o, más rigurosamente, como una “descripción estadística en términos de valores medios y de variabilidad de las cantidades de interés durante un período que puede abarcar desde algunos meses hasta miles o millones de años”. El período clásico, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial, es de 30 años,

Sistema climático: componentes e interacciones

El sistema climático está formado por varias componentes con interacciones mutuas, incluyendo la atmósfera, los océanos y la cobertura del suelo que están en un balance dinámico. El sistema climático está continuamente ajustándose a perturbaciones forzadas, y como resultado, el clima se ve alterado. Un cambio en cualquier parte del sistema climático tiene la capacidad propagarse estando sujeto a procesos de retroalimentación. En algunos casos el efecto inicial puede ser amplificado (feedback positivo¹), mientras que en otros, puede verse reducido (feedback negativo).

Cambio Climático

Es la variación estadísticamente significativa, ya sea de las condiciones climáticas medias o de su variabilidad, que se mantiene durante un período prolongado, generalmente durante decenios o períodos de tiempo superiores.

Causas de un proceso de Cambio Climático

El cambio del clima puede deberse a procesos naturales internos o factores externos: naturales o antropógenos, generalmente vinculados a cambios en el forzamiento radiativo.

El forzamiento radiativo es una medida de la influencia que un factor ejerce en la modificación del equilibrio entre la energía entrante y saliente en el sistema Tierra-atmósfera, y es un índice de la importancia del factor como mecanismo potencial de generación de un proceso de cambio climático.

¹ Un ejemplo de un mecanismo de feedback positivo, involucra el vapor de agua. Una atmósfera más caliente potencialmente aumentará la cantidad de vapor de agua en ella. Ya que el vapor de agua es un gas invernadero, se atraparán más energías que aumentarán la temperatura atmosférica más todavía. Esto a su vez, produce mayor vapor de agua, estableciéndose un feedback positivo.

Un forzamiento radiativo positivo, como el que se produce por las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero² producto de las actividades humanas, tiende a calentar la superficie terrestre.

Un forzamiento radiativo negativo, que puede deberse al aumento de ciertos tipos de aerosoles³, tiende a enfriar la superficie terrestre.

Los factores naturales, como los cambios en la actividad solar o volcánica, también pueden producir un forzamiento radiativo.

Es necesario caracterizar estos agentes de forzamiento, así como sus cambios con el tiempo, con el fin de comprender el proceso de cambio climático diferenciándolo de las variaciones naturales propias del sistema climático.

Causas del proceso de cambio climático actual

Las actividades humanas aumentan la concentración de gases atmosféricos de efecto invernadero y aerosoles generando un forzamiento radiativo positivo (calentamiento).

Los factores naturales han intervenido poco en el forzamiento radiativo del siglo pasado.

Se calcula que el cambio combinado en el forzamiento radiativo de los dos fenómenos naturales más importantes - la variación solar y los aerosoles volcánicos- fue negativo en los dos últimos decenios y posiblemente en los cuatro últimos.

El Segundo informe de evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) concluyó: *“El balance de las pruebas indica una influencia humana apreciable en el clima mundial”*.

La mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años se debe a las actividades humanas. La reconstrucción de los datos climáticos de los últimos mil años también indica que este calentamiento es inhabitual y es improbable que sea totalmente de origen natural. Las simulaciones de la respuesta a los forzamientos naturales únicamente, por ejemplo, la respuesta a la variabilidad en la irradiancia solar y en las erupciones volcánicas, no explican el calentamiento en la segunda mitad del siglo XX (*Figura 1.1.1*). No obstante, las simulaciones indican que los forzamientos naturales pueden haber contribuido al calentamiento observado en la primera mitad del siglo XX.

² Son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja. En la atmósfera de la Tierra, los principales gases de efecto invernadero (GEI) son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃).

³ Partículas microscópicas suspendidas en el aire.

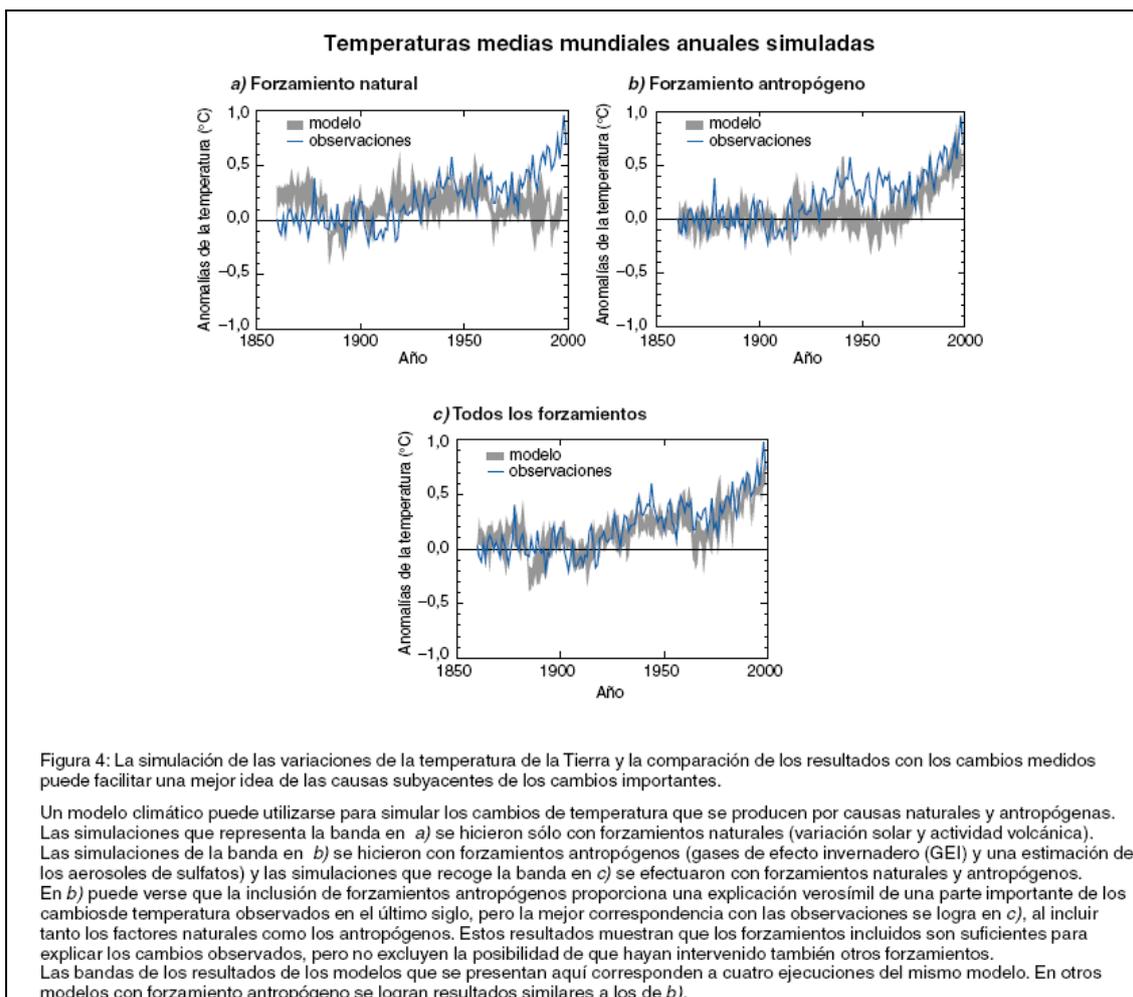


Figura 1.1.1: Extraída del “Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones (2000)”

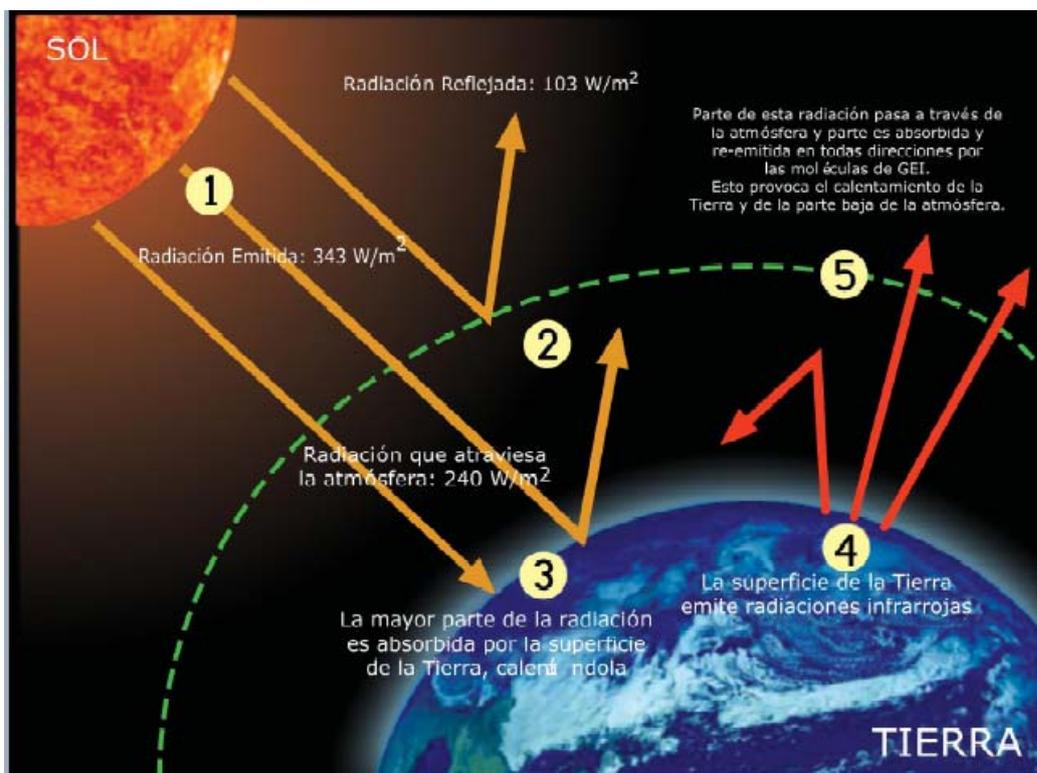
Efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero absorben radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera debido a los mismos gases, y por las nubes. La atmósfera emite radiación en todas direcciones, incluyendo hacia la superficie de la Tierra. De esta manera, los gases de efecto invernadero atrapan el calor dentro del sistema troposfera-superficie. A esto se le llama efecto invernadero natural.

La radiación atmosférica está estrechamente vinculada a la temperatura del nivel desde el cual se emite. En la tropósfera, la temperatura tiende a disminuir con la altura. En efecto, la radiación infrarroja emitida hacia el espacio se origina a una altitud en que la temperatura es de -19°C como promedio, en equilibrio con la radiación solar incidente neta, mientras que la superficie de la Tierra se mantiene a una temperatura mucho más alta, de $+14^{\circ}\text{C}$ como promedio.

Cuando aumenta la concentración de los gases de efecto invernadero, se acentúa la opacidad infrarroja de la atmósfera, lo que a su vez genera una radiación efectiva hacia el espacio desde una altitud mayor, a una temperatura más baja. Esto causa un forzamiento radiativo, un desequilibrio que sólo puede compensarse con un aumento de

la temperatura del sistema superficie-troposfera. Este es el llamado efecto invernadero acentuado.



Extraído de "Manual de ciudadanía Ambiental" (PNUMA, 2005)

Características del proceso de cambio climático actual

Un conjunto de observaciones cada vez mayor describe la imagen global de un mundo en fase de calentamiento y de otros cambios en el sistema climático:

- la temperatura media mundial de la superficie ha aumentado de 0,6°C aproximadamente en el siglo XX.
- la extensión del hielo y de la capa de nieve ha disminuido.
- el nivel medio del mar en todo el mundo ha subido y la temperatura de los océanos ha aumentado.

Estimación de escenarios climáticos futuros

La proyección de escenarios climáticos futuros requiere considerar escenarios de: a) progreso económico b) emisión de GEIs y aerosoles c) concentración atmosférica de GEIs.

En la elaboración de cada uno de estos escenarios existe un grado mayor o menor de incertidumbre que limita nuestra capacidad de detectar, atribuir y comprender el cambio climático actual y proyectar los cambios climáticos que podrían ocurrir en el futuro (*ver "cascada de incertidumbres" más adelante*).

Escenarios de desarrollo económico y de emisiones

Un escenario de emisiones constituye una representación verosímil de la evolución futura de las emisiones sobre la base de una serie homogénea e intrínsecamente coherente de hipótesis sobre las fuerzas determinantes - crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico- y las relaciones fundamentales entre ellas.

El IPCC elaboró primero una serie de escenarios conocidos como IS92 que después fueron actualizados y descriptos en el Informe especial del IPCC sobre escenarios de emisiones, IE-EE, (Figura 1.1.2). A fin de describir de manera coherente las relaciones entre las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, y para añadir un contexto a la cuantificación de los escenarios, se desarrollaron cuatro líneas evolutivas diferentes. Los 40 escenarios resultantes (35 de los cuales contienen datos sobre toda la gama de gases necesarios para forzar los modelos climáticos) abarcan las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinarán las emisiones futuras de GEI y azufre. Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas. El conjunto de escenarios basados en una misma línea evolutiva constituye una “familia” de escenarios.

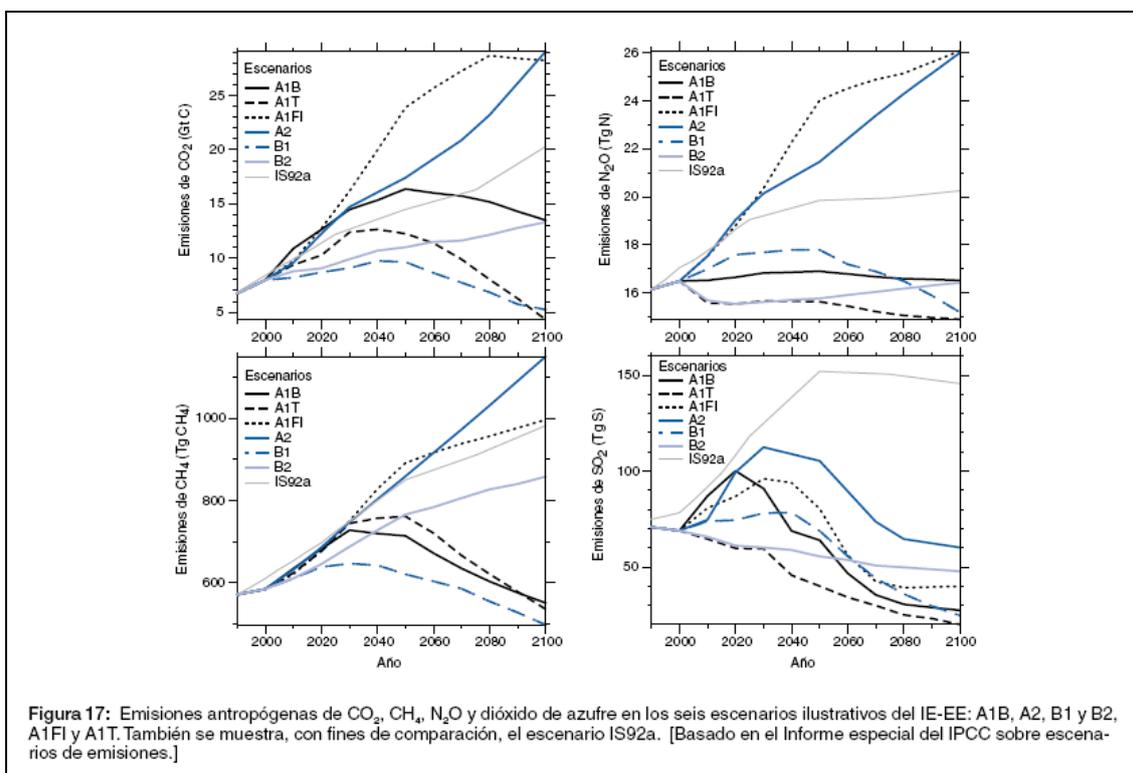


Figura 1.1.2: Escenarios de emisiones de GEI. (Extraída del “Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones, 2000”)

Escenarios de concentraciones

Los escenarios de concentraciones surgen a partir de modelos del ciclo del carbono que hacen proyecciones de las concentraciones atmosféricas de los GEI (agregadas y expresadas como CO₂equivalente) y de los aerosoles basándose en los escenarios de

emisiones descriptos previamente. Estos modelos tienen en cuenta, entre otras, que la biosfera y los océanos tienen la capacidad de secuestrar y almacenar dióxido de carbono atmosférico.

Para el año 2100, los modelos del ciclo del carbono proyectan concentraciones atmosféricas de CO₂ entre 540 y 970 ppm (*Figura 1.1.3*) para los escenarios ilustrativos del IE-EE (entre 90% y 250% mayor que la concentración de 280 ppm en 1750).

El efecto neto de las retroacciones climáticas terrestres y oceánicas, según indican los modelos, es un aumento aún mayor de las concentraciones atmosféricas proyectadas, que se produce como consecuencia de una menor absorción de CO₂ tanto por los océanos como por los continentes.

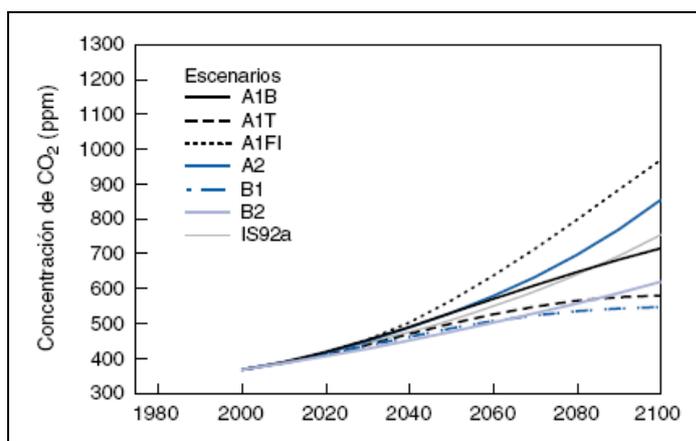


Figura 1.1.3: Escenarios de concentración de CO₂. (Extraída del “Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones, 2000)”

Modelos climáticos

Se utilizan para investigar la reacción del clima, ante perturbaciones naturales y/o provocadas por el hombre.

Utilizan los escenarios de concentración derivados de los escenarios de emisiones para el cálculo de proyecciones climáticas.

Las características y clases de modelos climáticos serán tratadas en detalle en el siguiente capítulo.

Resultados globales de los modelos climáticos

Las simulaciones de modelos climáticos, respecto de una serie de escenarios para cuantificar el cambio climático medio, indican que para fines del siglo XXI (2071 a 2100), el cambio de la temperatura media del aire en la superficie mundial, en relación con el período comprendido entre 1961 y 1990, será de 3,0°C como promedio (con un margen de variación de entre 1,3 y 4,5°C) en el escenario de referencia preliminar A2, y de 2,2°C (con un margen de variación de entre 0,9 y 3,4°C) en el escenario de referencia preliminar B2. En el escenario B2 se produce un calentamiento más leve, acorde con su

menor ritmo de aumento de la concentración de CO₂. Estos cambios de temperatura afectarían notablemente al ciclo hidrológico, causando un aumento de precipitaciones en algunas zonas y un decremento en otras.

Proyecciones del clima y cascada de incertidumbres

La cadena de pasos necesarios para realizar proyecciones climáticas presenta incertidumbres (*Figura 1.1.4*) en todos sus eslabones, desde las emisiones de GEI y aerosoles, hasta los efectos que éstos producen en el sistema climático y en la sociedad.

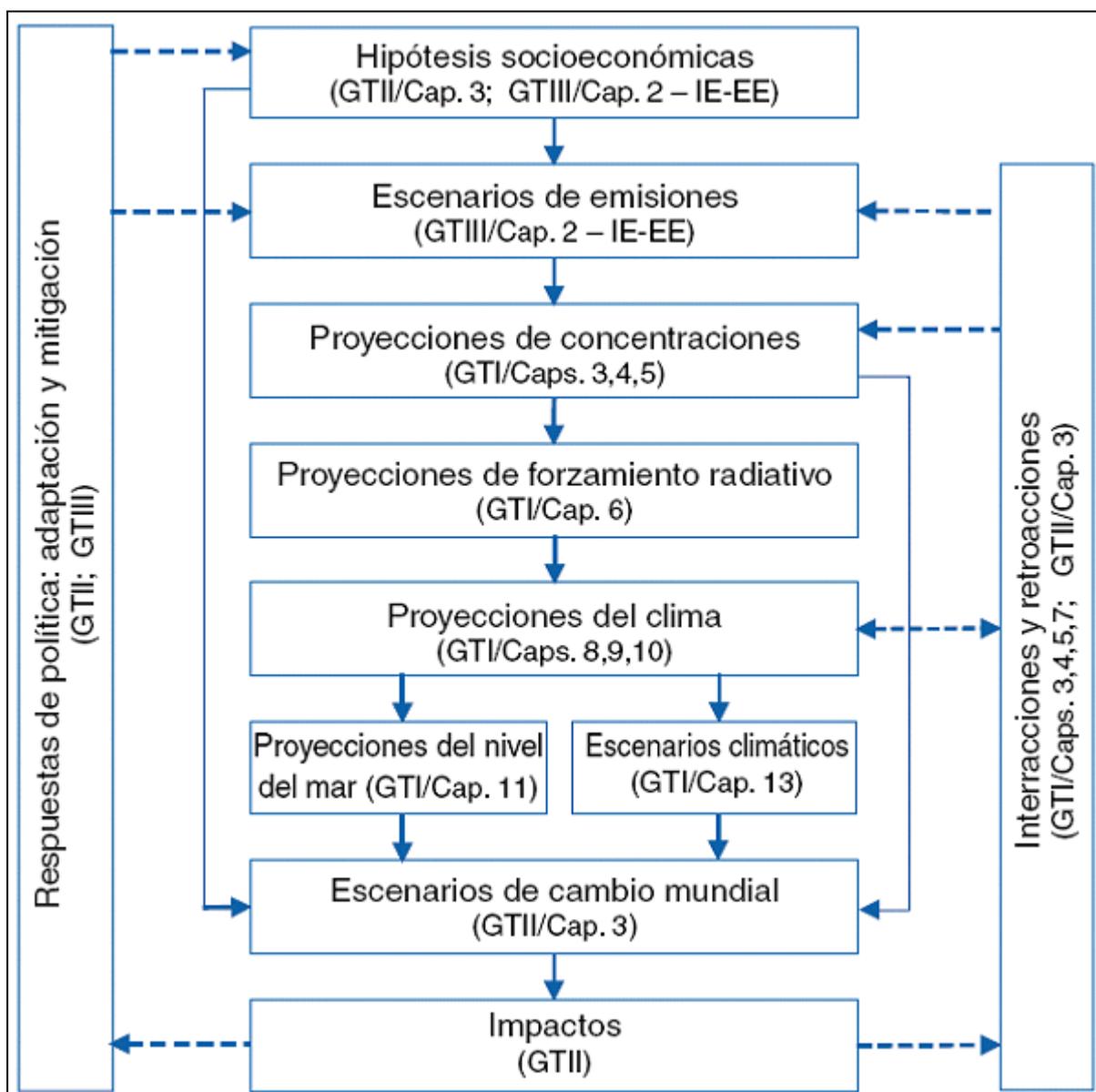


Figura 1.1.4: Cascada de incertidumbres. (Extraída del IPCC, 2001).

1.2 MODELOS CLIMATICOS

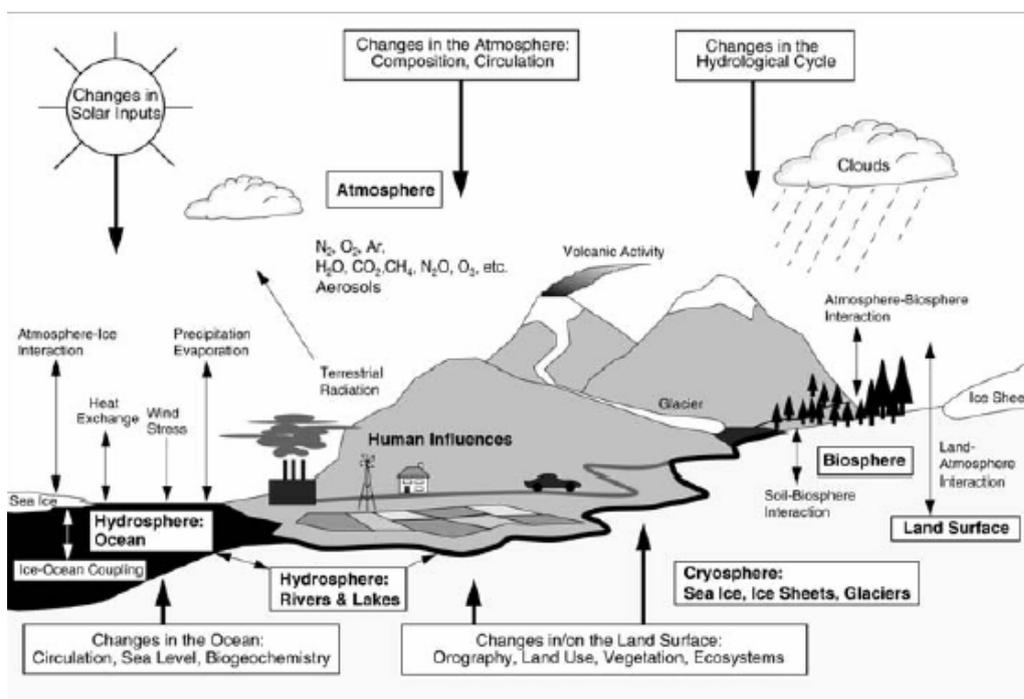
Funcionamiento general de los modelos climáticos; características de los Modelos de Circulación General y los Modelos Climáticos Regionales; tipos de corridas (equilibrio o transiente); condiciones de inicio (“cold or hot start”); “ensembles”; sensibilidad de modelos; técnica de anidado; “Land Surface Models” acoplados a modelos de vegetación; variabilidad interna del clima; diagramas de dispersión; significación estadística.

Los modelos climáticos ¿cómo se construyen y cómo se aplican?

Los modelos climáticos generales se basan en leyes de la física representadas por ecuaciones matemáticas que se resuelven utilizando una rejilla tridimensional sobre el globo terráqueo. A fin de simular el clima, los principales componentes del sistema climático deben representarse en submodelos (la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre, la criósfera y la biosfera), junto con los procesos que ocurren entre ellos y dentro de cada uno de ellos.

Procesos climáticos considerados en los modelos

Los procesos que rigen el sistema climático determinan su variabilidad natural y su respuesta a perturbaciones como el aumento de la concentración de GEIs en la atmósfera. Algunos de los procesos más importantes simulados por los modelos están vinculados al vapor de agua en la atmósfera, las nubes, los océanos, la criósfera, el dióxido de carbono en la atmósfera y la superficie terrestre. A los fines de esta tesis interesa desarrollar este último aspecto.



Consideración de la superficie terrestre en los modelos climáticos

El aumento de la temperatura, los cambios en las precipitaciones, las alteraciones en el calentamiento radiativo neto y los efectos directos del CO₂, influyen en el estado de la superficie terrestre y la vegetación presente. A su vez, los cambios en ciertas propiedades de la vegetación –albedo, rugosidad, etc.- tienen un efecto sobre el clima.

Los intercambios de energía, impulso, agua, calor y carbono entre la superficie terrestre y la atmósfera pueden definirse en los modelos como funciones del tipo y la densidad de la vegetación local y las características físicas del suelo.

Los adelantos logrados en la comprensión de la fotosíntesis de la vegetación y el uso del agua se han utilizado para combinar los ciclos de la energía terrestre, del agua y del carbono dentro de una nueva generación de parametrizaciones de la superficie terrestre, que se han verificado mediante su comparación con las observaciones sobre el terreno y se han aplicado en algunos modelos climáticos. Eso ha permitido mejorar en forma comprobable la simulación de los intercambios entre la superficie terrestre y la atmósfera. Sin embargo, aún quedan por resolver problemas importantes en lo que respecta a los procesos de humedad del suelo, la predicción del escurrimiento y los cambios en el uso de la tierra.

Los cambios en la cubierta vegetal de la superficie terrestre pueden afectar el clima mundial de varias maneras, entre otras, cambiando el albedo, los perfiles verticales de temperatura y humedad en la atmósfera (*Diffenbaugh and Sloan, 2002; Diffenbaugh, 2005*).

El efecto directo del aumento en la concentración de CO₂ atmosférico en la fisiología de las plantas podría conducir a una disminución relativa de la evapotranspiración en los continentes tropicales, junto con un calentamiento regional y una desecación superiores a los pronosticados convencionalmente como efectos de calentamiento de los GEI.

La deforestación, en especial en las zonas tropicales húmedas, ha sido señalada como uno de los ejemplos más claros donde el cambio en la cobertura de la superficie tiene implicancias directas sobre el patrón climático regional (*Shukla et al., 1990*) reduciendo la evaporación y aumentando la temperatura en la superficie.

Modelos acoplados océano-atmósfera

El sistema climático puede representarse con modelos de distinta complejidad, de manera que para cada componente o combinación de componentes, se puede identificar una jerarquía de modelos que difieren entre sí en aspectos como el número de dimensiones espaciales, el grado de detalle con que se representan los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas.

Los modelos climáticos mundiales en los que se han acoplado los componentes atmosféricos y oceánicos se conocen también con el nombre de Modelos de la Circulación General Atmósfera–Océano (MCGAO)⁴.

⁴ En este trabajo se utilizan, indirectamente, las salidas del MCGAO del Haddley Center, el “HadCM3”.

La resolución horizontal de los MCG está en el orden de los 300 km. Muchos procesos físicos, como los que están relacionados con las nubes o la convección oceánica, ocurren en escalas espaciales mucho más pequeñas que la rejilla de los modelos y en consecuencia no pueden modelarse y resolverse en forma explícita. Sus efectos medios se incluyen en forma aproximada con un método simple, aprovechando sus relaciones basadas en la física con las variables a mayor escala. Esta técnica se conoce con el nombre de parametrización.

Los modelos climáticos se han perfeccionado en los últimos decenios gracias al desarrollo de las computadoras. Durante ese período se crearon modelos separados de cada uno de los componentes principales, la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos, el hielo marino, el ciclo del carbono, la química atmosférica, que luego se fueron integrando gradualmente. Además se desarrollaron diferentes técnicas de regionalización que permitieron mejorar la representación regional, en escalas más finas, de los modelos.

Técnicas de regionalización

A pesar de que los MCG son las mejores herramientas con las que contamos para estimar escenarios futuros, su empleo presenta algunas limitaciones. Por ejemplo, la resolución espacial de las rejillas sobre las cuales se realizan las simulaciones y se ofrecen los resultados, es muy baja. A escala regional, los modelos muestran desviaciones medias por zona que varían enormemente de una región a otra y de un modelo a otro.

Por las razones anteriores se han elaborado metodologías que, utilizando los resultados de los MCG, permiten solucionar las dificultades expresadas. Así por ejemplo, mediante el empleo de relaciones estadísticas se han desarrollado técnicas de reducción de escala para reproducir las características climáticas regionales (*Solman y Nuñez, 1999*). Con este mismo fin, se han usado las salidas de los MCG para alimentar modelos de escala más pequeña, conocidos como modelos de área limitada o modelos climáticos regionales (*IPCC, 2003*).

Modelos climáticos regionales (MCR)

Los modelos climáticos globales no son capaces de capturar explícitamente la estructura de escala menor que caracteriza las variables climáticas en muchas regiones del mundo. Esta dificultad, se debe a su baja resolución espacial y a los errores en simular características regionales importantes como topografía, lagos, cobertura de suelo, etc.

Los modelos climáticos regionales (MCR) tienen una resolución más fina (30 a 50 km). Al cubrir un área limitada, en lugar de todo el globo, son capaces de representar más detalladamente las características regionales y por lo tanto de simular más adecuadamente la respuesta a los forzantes locales (*Cabre et al., 2002 y 2003*).

Los MCR necesitan condiciones iniciales, como todos los modelos, pero también necesitan condiciones de borde - laterales al dominio de trabajo-. Las condiciones de borde suelen surgir de corridas de modelos de circulación general⁵.

El desempeño del MCR depende de la información provista por las condiciones de borde laterales así como también de la física y dinámica interna del modelo. Los patrones de circulación de gran escala de los MCR generalmente no se desvían demasiado de los campos conducentes que proveen las condiciones de borde, especialmente para las regiones medias y superiores de la atmósfera.

Los MCR representan los procesos físicos y dinámicos del sistema climático de una manera realista y pueden resolver mejor características climáticas regionales como la topografía, lagos, tipo de suelo, etc. Por otro lado, son computacionalmente costosos⁶ y altamente dependientes de la calidad de las condiciones de borde lateral.

Comparaciones entre modelos

No hay ningún modelo que pueda considerarse “el mejor”, sin embargo hay una serie de aspectos para evaluar su capacidad que pueden generar una mayor o menor confianza en su funcionamiento, por ejemplo:

- reproducir las tendencias de aumento de la temperatura del aire en la superficie durante el siglo XX como consecuencia de la mayor concentración de gases de efecto invernadero y aerosoles de sulfatos.
- simular fenómenos de variabilidad interanual como el ENOA.
- simular características de los paleoclimas.

Sensibilidad de un modelo

Se define como el cambio en la temperatura global promedio de superficie resultante de un incremento en la concentración de GEIs en la atmósfera equivalente a una atmósfera duplicada en dióxido de carbono ($2xCO_2$). A mayor sensibilidad, mayor es el impacto de la perturbación antropogénica sobre el clima simulado. Diferentes modelos climáticos presentan índices de sensibilidad diferentes.

Experimentos climáticos de equilibrio y evolutivos

Un experimento climático de equilibrio es un experimento en el cual se permite que un modelo climático se adapte plenamente a un cambio en el forzamiento radiativo. Estos experimentos permiten obtener información sobre la diferencia entre el estado inicial y

⁵ En este trabajo se utilizaron las condiciones iniciales y de borde generadas por el modelo atmosférico del Haddley Center para forzar el modelo climático regional MM5.

⁶ Los MCR pueden ser computacionalmente muy demandantes ya que entre otras, suelen requerir datos generados por los MCG en una muy alta frecuencia temporal (por ejemplo, cada 6 horas). Un MCR considerando un dominio de $90x110x14$ y resolución de 50 Km. corrido en una Pentium III 1 Ghz PC tarda aproximadamente 10 horas para simular un mes o cerca de 8 días para simular un año. Los recursos computacionales para correr un MCR se incrementan linealmente con el tamaño del dominio y al menos cuadráticamente con la resolución.

el estado final del modelo, pero no sobre la respuesta en función del tiempo. Los experimentos de equilibrio tienen como inconveniente que el cambio en la composición atmosférica no es continuo, ni es posible que se establezca en un futuro cercano y además las distintas componentes del sistema climático no se aproximan al equilibrio al mismo tiempo. Típicamente, un experimento de equilibrio consiste en comparar el control con una atmósfera con concentración atmosférica del CO₂ duplicada (2x CO₂).

Si se deja que el forzamiento radiativo evolucione gradualmente de acuerdo con un escenario de emisiones preestablecido, se puede analizar la respuesta de un modelo climático en función del tiempo. A este experimento, se le llama experimento climático evolutivo o de respuesta transiente.

Los primeros experimentos transientes simulaban la respuesta al clima usando una forzante radiativa desde el presente hacia el futuro (normalmente 100 o más años). Sin embargo, estos no contabilizaban la forzante radiativa causada por el aumento de GEIs durante el siglo pasado, sino que más bien iniciaban la forzante asumiendo una condición de equilibrio en el presente, consecuentemente estaban subestimando el cambio climático durante las primeras décadas, lo que ha sido denominado como "cold start problem", Hasselmann *et al.*, (1993).

En contraste, los experimentos más recientes comienzan modelando la forzante histórica debida a los GEIs y aerosoles desde el siglo XVIII o IX ("warm start experiments") permitiendo realizar comparaciones entre el clima modelado y el observado durante ese periodo.

En ambos casos, las simulaciones continúan en el futuro con un escenario de composición atmosférica⁷.

“Ensembles” de Modelos

Muchos aspectos del sistema climático de la Tierra son caóticos - su evolución es sensible a pequeñas perturbaciones de las condiciones iniciales. Esta sensibilidad limita la posibilidad de predecir la evolución detallada del tiempo más allá de un lapso de aproximadamente dos semanas. No obstante, la posibilidad de predecir el clima no está tan limitada por las influencias sistemáticas en la atmósfera de los componentes del sistema climático que varían más lentamente. Sin embargo, para poder hacer pronósticos fiables, teniendo en cuenta tanto las incertidumbres en las condiciones iniciales como las debidas a los modelos, es conveniente repetir la predicción muchas veces a partir de distintos estados de perturbación iniciales generando una salida promedio de las corridas realizadas denominada "ensemble".

Modelos Climáticos Regionales anidados en MCG

⁷ Como se explicó en el capítulo anterior las emisiones de GEI primero se transforman en concentraciones y posteriormente se agregan expresándose en CO₂equivalentes, que se utilizarán como forzante del modelo climático.

Lo que es comúnmente referido como “nested regional climate modelling” consiste en anidar un modelo climático regional en un modelo de circulación general. En este esquema las salidas del MCG (componentes del viento, temperatura, vapor de agua y presión de superficie) proveen las condiciones iniciales y las condiciones meteorológicas de borde para correr el MCR.

El acople entre los modelos puede ser “one-way”⁸ (el MCR se nutre de la información del MCG) o “two-way” (el intercambio de información entre modelos es mutuo).

“Land Surface Models” acoplados a modelos de vegetación

Los modelos climáticos regionales suelen incluir submodelos que parametrizan los procesos de superficie terrestre en regiones continentales, conocidos como “Land Surface Models” (LSM). En general, estos submodelos proporcionan información sobre la humedad del suelo, la rugosidad y el albedo, todas ellas características dependientes del tipo de vegetación presente.

Usualmente las corridas se hacen con la vegetación fija, ya que los LSM no suelen incorporar la posibilidad de cambios en la vegetación. Considerando que este hecho es poco realista en corridas largas (de más de 30 años) y para mejorar la representatividad de las salidas de los LSM, se los acopla con modelos de vegetación que si generan información sobre cambios en la distribución y estado de la vegetación.

La metodología para lograr el acople entre ambos modelos depende de considerar un modelo de vegetación dinámico o estático. En este último caso, la metodología usualmente utilizada consiste en correr el modelo climático un tiempo determinado y con esa información correr el modelo de vegetación que produce un escenario de distribución de vegetación actualizado que nuevamente es utilizado para correr el modelo climático por otro periodo de tiempo. El acople de modelos climáticos y de vegetación puede conducir a diferentes estados de equilibrio entre la biosfera y la atmósfera (Claussen *et al.*, 1998; Claussen, 1998; Levis *et al.*, 1999; Oyama, 2002).

Cambio climático, variabilidad interna del clima y MCG

La variabilidad del clima se refiere a variaciones en las condiciones climáticas medias y otras estadísticas del clima (como las desviaciones típicas, los fenómenos extremos, etc.) en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular. La variabilidad puede deberse a procesos naturales internos que ocurren dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropógeno (variabilidad externa).

Las series meteorológicas observadas no son lo suficientemente largas como para dar una idea adecuada de la variabilidad interna del sistema climático. Además estas mediciones están probablemente influenciadas por los cambios en la forzante radiativa producto del cambio en la concentración de GEIs que comienza a acontecer con la revolución industrial.

⁸ En este trabajo, se utilizó esta metodología para anidar el modelo regional MM5 en el modelo atmosférico HadCM3P.

En este contexto, una alternativa para estudiar la variabilidad interna del sistema climático y diferenciarla de procesos de cambio en el clima⁹, consiste en realizar corridas de modelos climáticos de larga duración, manteniendo constante la composición de la atmósfera y otros factores externos al sistema como la radiación solar.

⁹ Ver capítulo 2.13.

1.3 IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LA VEGETACION

Biomás; relaciones entre vegetación, clima y suelo; tipos de respuesta de la vegetación (distribución y cambios en la composición); procesos de migración, aclimatación y adaptación; velocidad de respuesta; impactos en la ecofisiología de las plantas (fenología, fertilización por CO₂ y eficiencia en el uso del agua); productividad primaria neta e Índice de Área Foliar; escala de análisis (hoja, planta, ecosistema); impacto de actividades humanas: deposición de nitrógeno y fragmentación de ecosistemas; metodologías de trabajo (modelos, paleodatos, estudios de laboratorio).

Definición de bioma

Aunque estrictamente la definición de bioma incluye a la vegetación y la fauna predominante en un tiempo y una región determinados, a los fines de esta tesis, los “biomas” estarán caracterizados únicamente por el tipo de vegetación dominante.

En virtud de este concepto, a lo largo del trabajo se utilizan indistintamente los términos “bioma” y “vegetación”.

El clima, el suelo y la vegetación

El clima es el principal factor que controla, a escala global, la distribución, composición y productividad de la vegetación. Muchas plantas se pueden reproducir y crecer con éxito únicamente dentro de un rango específico de temperaturas, y responder a determinadas cantidades y patrones estacionales de precipitación.

El clima también tiene influencia sobre determinadas propiedades del suelo que a su vez también afectan a la vegetación presente.

Los cambios en la variabilidad y en los valores medios del clima inciden sobre el estado de la vegetación directamente afectando los procesos fisiológicos (temperatura óptima de fotosíntesis, respiración, etc.) de las plantas o indirectamente a través de modificar propiedades del suelo (humedad, ciclo de nutrientes, etc.).

Respuesta de la vegetación al cambio climático

Existen dos suposiciones conceptualmente diferentes sobre la forma en que los biomas responden al cambio climático: 1) cambios en la distribución y 2) cambios en la composición.

Distribución de la vegetación

El enfoque del ‘movimiento de biomas’ supone que los biomas migren relativamente intactos a nuevos emplazamientos que tengan un clima y entorno parecidos, lo que constituye una simplificación excesiva de lo que probablemente ocurrirá en un escenario climático futuro. Nuestros conocimientos ecológicos más básicos sugieren que este paradigma del ‘movimiento de biomas’ es muy improbable que ocurra en realidad debido a diferencias en la tolerancia climática de las distintas especies, la

variabilidad genética dentro de muchas de ellas, sus diferentes longevidades, sus distintas capacidades migratorias, y los impactos de especies invasoras. Se trata de un paradigma de trabajo idealizado que tiene como ventaja el empleo de la relación entre el emplazamiento de un bioma y el clima existente, para estimar la nueva distribución del bioma en escenarios climáticos distintos.

Migración:

Las simulaciones de modelos de ecosistemas y clima sugieren que las zonas climáticas apropiadas para especies de plantas templadas y boreales se pueden desplazar unos 200–1.200 Km. hacia el norte para el año 2100. Sin embargo, las pruebas paleoecológicas sugieren que, en el pasado, la mayoría de las especies de plantas migraron sólo unos 20–200 Km. por siglo.

Consecuentemente, la migración hacia nuevos hábitats puede efectuarse décadas por detrás del cambio climático, porque la dispersión desde los hábitats existentes a nuevas zonas puede ser un proceso lento, y a menudo los nuevos sitios habrán sido ocupados ya por especies capaces de dispersarse y establecerse con una mayor rapidez.

Para muchas especies de plantas, la migración puede verse retrasada aún más debido a la fragmentación de los hábitats causada por el cambio en el uso del suelo producto de distintas actividades humanas.

Velocidad de respuesta

Los ecosistemas dominados por especies de larga vida (por ejemplo, las especies de árboles longevos) tardarán mucho en responder al cambio y en recuperarse tras el estrés asociado con el clima.

Además hay que considerar la velocidad de respuesta del suelo al cambio climático. En este sentido, por ejemplo, el reemplazo de los bosques boreales por los bosques templados fríos puede ser lento por las características que presentan los podzoles típicos de los bosques boreales. Con suficiente tiempo, las características del suelo podrían cambiar por acción del clima pero este cambio sería definitivamente más lento que el de la biosfera.

Composición de la vegetación

El segundo enfoque, conocido como ‘modificación de los biomas’, asume que a medida que el clima y otros factores ambientales cambian, se producen cambios *in situ* en la composición y dominio de las especies presentes. Las poblaciones de algunas de estas especies disminuirán o se extinguirán localmente, mientras que las de otras aumentarán. Aún sin aumentar la tasa de mortalidad entre individuos maduros, los cambios en el clima afectarán a menudo a etapas vulnerables de la vida, tales como el establecimiento y la germinación. La longevidad de los individuos, la estructura de edad de las poblaciones existentes, y la llegada de especies invasoras moderarán estos cambios.

El resultado será la aparición de biomas de composición bastante diferente de los que vemos hoy en día¹⁰.

El inconveniente con el enfoque de ‘modificación de biomas’ es que es muy difícil de utilizar para algún pronóstico práctico debido a la falta de información detallada sobre la distribución actual de cada una de las especies y a nuestro inadecuado conocimiento de sus interacciones. Por lo tanto, la mayoría de los estudios regionales y globales que intentan evaluar los impactos potenciales del cambio climático sobre la vegetación se han basado en el enfoque de ‘movimiento de biomas’.

De los dos modelos de vegetación utilizados en este trabajo, el CPTEC-PVM considera la hipótesis de “movimiento de biomas” (*ver capítulo 2.3*) mientras que el modelo BIOME4 tiene un funcionamiento más cercano a la hipótesis de “modificación de biomas” aunque en lugar de trabajar con especies lo hace con “tipos funcionales de plantas (TFPs)” que se ensamblan para formar biomas (*ver capítulo 2.4*).

Impactos en la ecofisiología de las plantas

La modificación en la distribución y composición de la vegetación se relaciona con los efectos que el cambio en el clima y la concentración de dióxido de carbono atmosférico tienen sobre distintos procesos ecofisiológicos de las plantas.

A su vez, estos cambios pueden generar respuestas en el corto plazo de *aclimatación* en los individuos y a más largo plazo, de *adaptación* de las poblaciones.

El calentamiento global produce cambios en las temperaturas mínimas absolutas o los días grado de crecimiento (GDD) afectando la fecha aparición de brotes o la migración de plantas que están limitadas por su escasa resistencia a bajas temperaturas o al congelamiento. Además, los cambios en la temperatura afectan de manera diferencial la velocidad de las reacciones químicas, entre otras, las de la fotosíntesis y respiración.

El aumento en la concentración de dióxido de carbono atmosférico tiene un efecto directo, denominado “*fertilización por CO₂*” y uno indirecto a través de su impacto sobre la “*eficiencia en el uso del agua*”.

Además el efecto del CO₂ depende de la escala de análisis:

Hoja: un incremento en el CO₂ resulta a corto plazo en un aumento de la tasa fotosintética de las hojas individualmente, pero a largo plazo puede ocurrir aclimatación.

Planta: un incremento de CO₂ puede alterar la distribución de los metabolitos a las distintas partes de la planta, haciendo que estas inviertan más en la estructura aérea o subterránea.

¹⁰ De igual forma, los datos paleoecológicos indican que en el pasado existieron combinaciones de especies dominantes no observadas hoy.

Ecosistema: la respuesta de la Productividad Primaria Neta al incremento del CO₂ dependerá entre otras, de la disponibilidad de agua en el suelo.

Fertilización por CO₂

Incremento en la tasa fotosintética de la vegetación como resultado de una mayor concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Según el mecanismo de fotosíntesis, ciertos tipos de plantas son más sensibles a los cambios en el dióxido de carbono en la atmósfera.

Las plantas C3 muestran generalmente una respuesta más pronunciada a la fertilización por CO₂ que las plantas C4.

Eficiencia en el uso del agua (EUA)

La transpiración y la captación de carbono de la planta se encuentran vinculadas a través de la difusión de vapor de agua y de CO₂ en las estomas. La planta ha de ceder agua para poder captar CO₂ y al disminuir las pérdidas de agua, también disminuye el flujo de entrada de CO₂. El gradiente de concentración de CO₂ entre la atmósfera exterior y el cloroplasto es mucho menor que el del vapor de agua entre el interior de la hoja y la atmósfera. Además las moléculas de agua difunden más deprisa que las de CO₂ que son mayores. Por estos dos motivos, la evaporación de agua es mucho más intensa que la captación de CO₂.

La relación entre consumo de agua y producción puede expresarse como la Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) definida como unida de carbono fijada por la fotosíntesis / unidad de agua perdida por la evapotranspiración.

Mayores niveles de CO₂ atmosférico pueden ocasionar la reducción en la apertura de los estomas, reduciendo la transpiración e incrementando la ganancia de carbono en condiciones de baja disponibilidad de agua para las plantas, incrementando de esta manera la eficiencia en el uso del agua.

Las plantas C4 tienen una mayor EUA que las plantas C3, pero un aumento en el CO₂ atmosférico reduciría la diferencia.

Si además de los efectos del incremento en la concentración de CO₂ atmosférico, se considera el incremento en la temperatura, la explicación del comportamiento de la EUA en escenarios de cambio climático se hace sumamente compleja en función de la diversidad de mecanismos de retroalimentación que entran en juego (*Grant et al., 2004*).

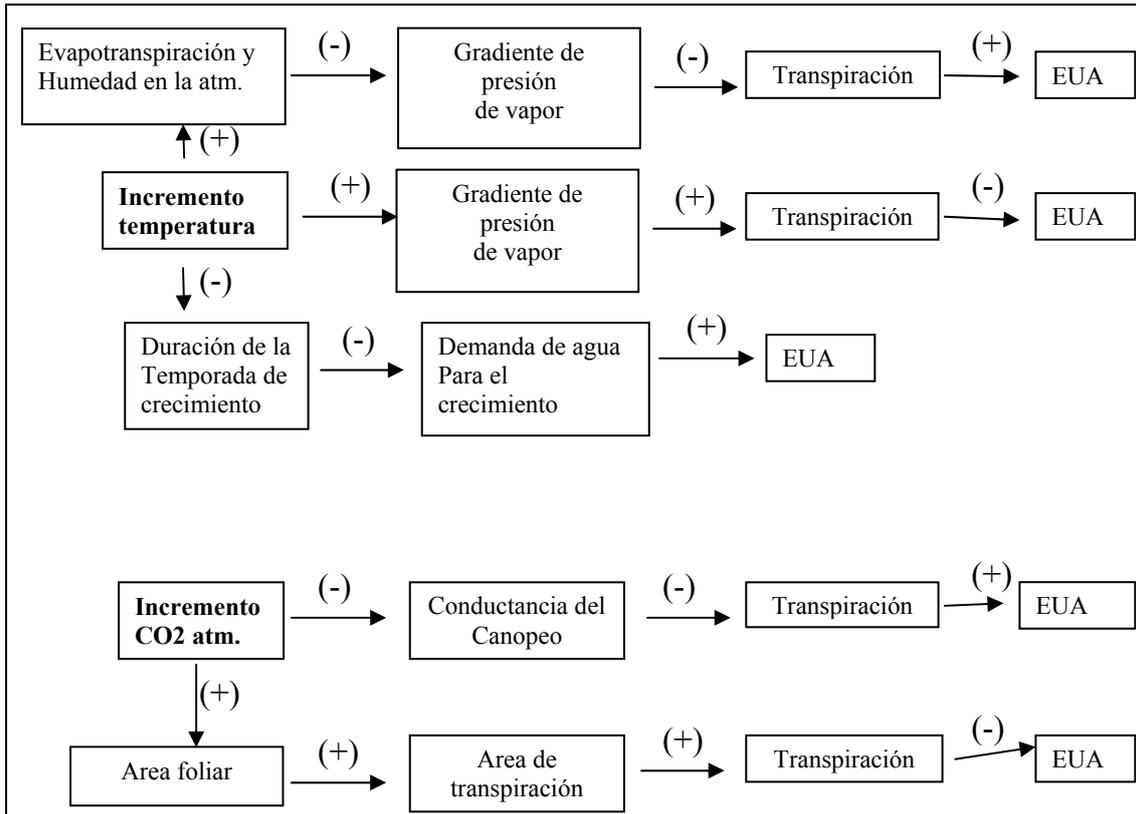


Figura: elaborada en base a Grant et al. (2004)

Impactos del cambio climático sobre la PPN y el IAF

La productividad primaria neta (PPN) y el índice de área foliar (IAF) son buenos indicadores del estado de la vegetación que pueden ser de utilidad para el entendimiento de la suma de efectos, algunos de ellos antagónicos, del cambio en el clima y el aumento en el CO₂ atmosférico sobre los procesos metabólicos de las plantas.

Índice de área foliar (IAF): suma de toda la superficie foliar por unidad de superficie de terreno. El índice de área foliar es un indicador integrador de los flujos del balance de agua y carbono en las plantas, ya que describe la superficie potencialmente disponible para el intercambio de gases (CO₂, O₂ y H₂O).

El IAF está estrechamente relacionado con la PPN (Tianxiang et al., 2004) y directamente influenciado por una serie de controles ambientales (Cowling, 2003).

Productividad primaria bruta: Producción que ocurre mediante la fotosíntesis. Se refiere a la cantidad de material producido por unidad de tiempo. La productividad, o el valor de producción, es afectada por diversos factores ambientales, incluyendo la temperatura, precipitación, cantidad de radiación solar, la disponibilidad de agua y nutrientes.

Productividad primaria neta (PPN): Es la biomasa o energía disponibles después de sustraer de la Productividad Primaria Bruta las pérdidas por respiración y otros procesos metabólicos vinculados al mantenimiento y crecimiento de las estructuras de las plantas.

A escala continental la PPN esta fuertemente correlacionada con variables climáticas

Calentamiento global, Productividad neta del Ecosistema y balance de carbono

El incremento de la temperatura impactará considerablemente sobre la Productividad Neta del Ecosistema¹¹ y consecuentemente sobre el balance de carbono entre la biosfera y la atmósfera (Melillo et al., 2002) a través de sus efectos sobre los dos principales flujos entre los ecosistemas terrestres y la atmósfera: la PPN y la respiración heterótrofa.

El balance entre estos dos flujos¹² determina si los ecosistemas terrestres actuarán como un sumidero o fuente en un escenario de cambio climático.

El aumento de la temperatura afecta directamente casi todos los procesos físicos, químicos y biológicos, incluyendo la fotosíntesis y la respiración del suelo (Shaver et al., 2000).

Adicionalmente, también tiene efectos indirectos a través de extender el periodo de crecimiento, modificar la fenología de las plantas (Chemielewski et al., 2001), incrementar la tasa de mineralización del nitrógeno (Melillo et al., 2002) y reducir el contenido del agua del suelo (Harte y Shaw, 1995).

Impactos de las actividades humanas sobre la vegetación

El análisis de la vegetación en escenarios climáticos futuros requiere considerar no solo los efectos del cambio en el clima y el CO₂ sino además el efecto de otras actividades humanas, entre ellas:

- el cambio en el uso del suelo y sus impactos en la fragmentación de ecosistemas y la capacidad de migración;
- el incremento en la deposición de nitrógeno, a través de su efecto potenciador sobre el crecimiento de las plantas, especialmente en los bosques del hemisferio norte; y
- el aumento del ozono troposférico que es un potente inhibidor de la fotosíntesis.

Metodologías de estudio de impactos del cambio climático sobre la vegetación

Dependiendo del objeto de estudio y la escala de trabajo se utilizan distintas metodologías, entre otras:

¹¹ Productividad Neta del Ecosistema = PPN – respiración heterótrofa

¹² Para ser estrictos también se deberían considerar las pérdidas de carbono vinculadas a fuegos, deforestación, prácticas de manejo forestal, etc.

- estudios de laboratorio con plantas sometidas a condiciones experimentales de alta temperatura y concentración de CO₂;
- experimentos FACE, “free air carbon dioxide enrichment” (*Rogers et al., 2004*);
- análisis de la dinámica de la vegetación, el IAF y la PPN, a partir de imágenes satelitales (*Kindermann et al., 1993; Goward, 1995*);
- medición de flujos de CO₂ en torres por la técnica de la “eddy covariance”;
- análisis de la distribución de polen y su correlación con las zonas climáticas en el pasado;
- modelos de vegetación corridos en épocas pasadas y comparados con paleodatos (*Prentice et al., 1993 and 1998*);
- modelos de vegetación corridos con escenarios climáticos futuros (*ver referencias en el capítulo siguiente*).

Este último aspecto es la metodología de trabajo de este estudio y será desarrollada en detalle en el próximo capítulo.

1.4 MODELOS DE VEGETACION

Bioma; vegetación potencial; Tipos funcionales de Plantas; modelos de vegetación: a) estáticos, dinámicos; b) biogeográficos, biogeoquímicos, mixtos; c) correlacionales, mecanísticos; límites de distribución de biomas: ecofisiológicos o empíricos; procesos y escalas de trabajo.

El modelado del impacto del cambio climático sobre la vegetación requiere de la definición de un sistema de clasificación de vegetación adecuado en función de las características y escala de los procesos simulados. En este sentido, para comprender el funcionamiento de los modelos de vegetación utilizados en este trabajo es necesario introducir los conceptos desarrollados a continuación.

Vegetación natural existente vs. vegetación potencial

La vegetación potencial es la vegetación en el equilibrio que existiría en un lugar determinado si solo estuviera afectada por las condiciones climáticas y el tipo de suelo, descontando de esta manera la acción de cualquier disturbio ya sea de carácter antropógeno o natural.

Vale aclarar que la vegetación natural existente no coincide con la vegetación potencial cuando:

- el hombre haya intervenido el ecosistema (ej. agricultura, ganadería, etc.)
- los disturbios naturales no permiten que se llegue al estado de "equilibrio" ("última etapa de la sucesión natural"). Por ejemplo, la existencia periódica de fuegos puede determinar que en un lugar, donde la vegetación en el equilibrio debería ser un bosque (en función del tipo de clima y condiciones del suelo del lugar) exista en lugar de ello una pradera.
- no hubo suficiente tiempo para que la sucesión alcance su "estado final".

Los dos modelos utilizados en este trabajo simulan la distribución de vegetación potencial sin considerar disturbios naturales o antropógenos¹³. De cualquier manera, la escala a la que los disturbios tienen efectos sobre la vegetación suele ser bastante menor a la que trabajan los modelos de vegetación utilizados en este trabajo (50 Km.), por lo que el hecho de no considerarlos no debería afectar sensiblemente la representación lograda por el modelo.

Sistemas de clasificación fisonómicos vs. florísticos

Florísticos: utilizan la composición de especies para definir los tipos de vegetación.

¹³ Para ser estrictos, esto no es del todo cierto en BIOME4 que considera, aunque de manera muy simplificada, los efectos del fuego sobre la distribución y composición de los biomas.

Fisonómicos: se basan predominantemente en caracteres fisonómicos de la estructura, forma de crecimiento y caracteres de la hoja, entre otras, de las plantas dominantes. Estos sistemas permiten la generalización de las especies en “*Tipos Funcionales de Plantas*”.

Los dos modelos de vegetación utilizados en este trabajo utilizan biomas definidos en función de caracteres fisonómicos.

Tipo funcional de planta (TFP)

Seria muy difícil simular la distribución de todas las especies vegetales existentes, consecuentemente se las agrupa, según ciertos atributos fisiológicos y/o morfológicos y/o ecológicos, en tipos funcionales de plantas (TFPs).

Ejemplos de atributos relevantes¹⁴ para definir TFPs incluyen: Forma de vida (árboles, herbáceas, arbustos); Tipo fenológico (perenne, caducifolio); Tipo de hoja (hoja ancha, acícula) y Camino fotosintético (C3, C4).

A nivel local, existen numerosos trabajos acerca de la identificación de TFPs en Argentina (*Box, 1986*).

Díaz *et al.* (1992) clasificaron especies de plantas herbáceas de la región central de Argentina sobre la base de rasgos morfológicos y de historia de vida y analizaron su rol en procesos a nivel de comunidad.

Días y Cabido (1997) estudiaron rasgos de plantas dominantes a través de un gradiente ambiental en el centro-oeste de la Argentina.

El modelo BIOME4, utilizado en esta tesis, basa su funcionamiento en TFPs caracterizados a escala global.

Eventualmente, una revisión y comparación con los TFPs que han sido identificados localmente podría contribuir a mejorar la representación regional de la vegetación lograda por este modelo.

Distribución de la vegetación: dependiendo del modelo considerado este término se puede entender en términos de especies, TFPs o biomas. Los modelos considerados en este trabajo simulan la distribución de biomas¹⁵.

Tipos de modelos

Se pueden clasificar en función de diferentes características en: a) Dinámicos y estáticos (*Peng, 2000*); b) Biogeográficos, Biogeoquímicos y mixtos y c) Correlacionales y mecanísticos (*Pearson and Dawson, 2003*).

¹⁴ Para mayor información consultar Box 1995 y 1996.

¹⁵ En el caso de BIOME4 es posible también obtener como salida la distribución de TFPs dominantes

Los dos modelos utilizados en este trabajo corresponde a la categoría de modelos estáticos o de equilibrio con una base más mecanística en BIOME4 y correlacional en CPTEC-PVM.

BIOME4 es además un modelo mixto que permite estudiar flujos de carbono.

Modelos estáticos o de equilibrio

Los modelos estáticos o de equilibrio como BIOME4 (Kaplan *et al.*, 2003) CPTEC-PVM (Oyama y Nobre, 2004) y MAPPS (Neilson, 1995) simulan, primero, la distribución de vegetación en equilibrio con un escenario climático actual (“foto1”) y luego, la nueva distribución de vegetación en equilibrio con un escenario climático futuro (“foto2”). Este tipo de modelos no tiene en cuenta los estadios intermedios entre estas dos “fotos” ni el momento en el tiempo en que se lograra el nuevo equilibrio en función de un cambio en el clima.

Los modelos de equilibrio se corren utilizando como entrada datos climáticos de un año hipotético que representa el promedio de 30 años. Consecuentemente no tienen en cuenta la variabilidad interanual (o en otro escala) que podría en ciertos casos ser importante para explicar la vegetación presente en el sitio.

Los modelos estáticos de vegetación se han utilizado para acoplar asincrónicamente con modelos climáticos para estudiar las interacciones entre la vegetación y el clima (Bergengren *et al.*, 2001; Oyama, 2002).

Modelos dinámicos

Para determinar estadios intermedios de la sucesión biológica se utilizan los Modelos Dinámicos de Vegetación Global como IBIS (Foley *et al.*, 1996), HYBRID (Friend *et al.*, 1995), LPJ (Sitch, 2000), MC1 (Bachelet *et al.*, 2001) que simulan paso a paso los cambios en la vegetación.

Estos modelos incluyen en su funcionamiento un esquema en el que solo determinado tipo de vegetación puede remplazar a otra previa existente¹⁶ y parámetros que caracterizan la velocidad de migración de los TFPs considerados.

Los modelos dinámicos, en comparación con los estáticos, requieren mayor información de entrada ya que se corren anualmente (en lugar de utilizar un año promedio de 30).

Las corridas con modelos dinámicos requieren mayores tiempos y recursos computacionales.

Los modelos dinámicos de vegetación se han utilizado acoplados con modelos climáticos para estudiar las interacciones entre la vegetación y el clima (Foley *e tal.*, 1998).

¹⁶ Simulando de alguna manera el proceso de sucesión biológica

Modelos Biogeográficos, Biogeoquímicos y mixtos

Los modelos biogeográficos como el CPTEC-PVM simulan distribuciones de vegetación en función de un escenario climático actual y futuro.

Los modelos biogeoquímicos como el TEM (*Raich et al., 1991*), DEMETER (*Foley, 1994*) CARAIB (*Nemry et al., 1996*) simulan flujos de carbono y agua en función de un escenario climático actual y futuro pero considerando que la vegetación permanece constante a lo largo del tiempo.

Los modelos mixtos, como el BIOME4 y MAPSS consideran simultáneamente cambios en la distribución de la vegetación y en los flujos de carbono y agua.

Modelo correlacional

Cualquier parte de la tierra cuyos atributos climáticos sean semejantes, aunque no necesariamente iguales, constituye una región climática; esta región puede repetirse con los mismos caracteres en otros lugares muy distantes de la superficie terrestre.

De igual manera las cubiertas vegetales de regiones distantes de la superficie terrestre, aun con composiciones diferenciadas, pueden asemejarse, por ejemplo, en sus formas biológicas y en su comportamiento estacional lo que hace posible su agrupamiento en unos pocos tipos fundamentales.

Los resultados de ambos procesos de generalización espacial - el climático y el de los tipos de vegetación - producen moldes de distribución con coincidencias significativas que son objeto de investigación, en cuanto las asociaciones recurrentes entre una región climática y el tipo de vegetación presente, sugieren la existencia de algún tipo de correlación entre ellos.

A veces esta suposición puede estar errada, por ejemplo, en el caso de especies de larga vida y con capacidad de respuesta lenta, en las cuales la distribución presente podría reflejar el clima de un pasado reciente y no el clima actual.

Los modelos correlativos asumen que la vegetación esta en equilibrio con el clima, pero si este no es el caso, los resultados de la simulación (vegetación potencial) podrían no corresponder a la vegetación actual.

Son particularmente útiles cuando la disponibilidad de datos o el conocimiento es insuficiente para construir un modelo basado en los mecanismos de un proceso.

Modelos mecanísticos

Los modelos mecanísticos en el otro extremo, son reduccionistas, basándose en el conocimiento de los mecanismos de procesos en el sistema modelado.

Los límites entre los biomas no se fundamentan sobre la suposición de la existencia de una correlación entre la distribución actual de la vegetación y el clima sino en restricciones ecofisiológicas.

El principal inconveniente con los modelos mecanísticos es que aunque la bioquímica y fisiología de las plantas es bien conocida no hay un acuerdo general en como modelarla. Por ejemplo, con respecto a la fotosíntesis el modelo de Farquhar et al (1982) y sus variantes ha sido ampliamente utilizada, pero la representación de la respiración, el stress hídrico, el uso de la luz y el “scaling” desde la hoja al dosel varían considerablemente dependiendo del modelo.

Limites ecofisiológicos y empíricos

En todos los modelos, pero mayormente en los correlacionales, se vincula la distribución de la vegetación a ciertos límites que pueden tener un fundamento ecofisiológico o empírico.

En la realidad pocos procesos biológicos pueden ser simulados con modelos puramente mecanísticos y la mayoría requiere de parámetros y suposiciones empíricas.

En este contexto, los modelos simulan la presencia o ausencia de TFPs o Biomas en función de límites ecofisiológicos y/o empíricos.

Limites ecofisiológicos

Los principales factores ambientales que limitan la distribución de plantas incluyen: temperaturas máximas y mínimas, grados día de crecimiento y disponibilidad de agua.

Estos factores afectan la distribución de ciertas plantas a partir de afectar procesos dependientes de la temperatura o la humedad como la aparición de brotes o la resistencia a heladas.

Procesos y escalas de trabajo

A escala continental el clima puede ser considerado el factor dominante en la distribución de la vegetación. A escala mas fina, factores locales incluyendo la topografía y el uso del suelo se vuelven más importantes. Si se continúa afinando la escala empiezan a tomar importancia los factores de interacción biótica y el microclima.

Modelos de vegetación global y cambio climático

A escala global, los modelos de vegetación potencial corridos con escenarios climáticos futuros muestran escenarios de distribución de biomas diferentes en mayor o menor grado dependiendo de la región del globo considerada. Sin embargo, prácticamente todos coinciden en pronosticar para las latitudes altas de Eurasia y América del Norte la expansión de los bosques boreales principalmente a costas de la retracción de la tundra.

1.5 SENSIBILIDAD, VULNERABILIDAD Y ADAPTACION

Impactos; provisión de bienes y servicios ambientales; diseño de políticas; sensibilidad; vulnerabilidad; adaptación; ICLIM; CIRF; límite máximo tolerable; análisis inverso; impactos aceptables; límite de emisiones GEIs.

Impactos del cambio climático sobre los bienes y servicios ambientales

Los impactos del cambio en el clima sobre la distribución, composición y funcionamiento de los biomas modificarán su capacidad de provisión de bienes y servicios ambientales.

Los servicios vinculados a la biodiversidad, servicios estéticos, culturales, ambientales (captura de carbono), provisión de bienes (como plantas farmacéuticas) o recursos genéticos serán directamente afectados por el cambio climático.

Los servicios ambientales hidrológicos podrían verse afectados a raíz de cambios en las funciones hidrológicas de la vegetación, tales como la intercepción de lluvias o la infiltración en el suelo. Por ejemplo, el incremento de los incendios asociado con el aumento de las condiciones secas puede reducir el estrato superficial de sustancias orgánicas. Esto causaría menor infiltración y mayor escorrentía a nivel del bosque, y caudales mínimos o máximos más extremos a nivel de la cuenca. Los cambios en ecosistemas impactarán también el servicio ambiental de regulación de la calidad del agua, especialmente en lo que concierne a la concentración de elementos químicos o biológicos y el transporte de partículas sólidas (erosión).

El diseño de una política que permita minimizar los efectos negativos y maximizar los positivos del cambio en el clima requiere considerar los conceptos de *sensibilidad*, *vulnerabilidad* y *capacidad de adaptación*, que son desarrollados a continuación.

Sensibilidad

Es el grado por el que está afectado un sistema, en sentido perjudicial o en sentido beneficioso, por razón de estímulos relacionados con el clima. Los estímulos relacionados con el clima abarcan todos los elementos del cambio climático, incluido el promedio de características del clima, la variabilidad del clima y la frecuencia y magnitud de casos extremos. El efecto puede ser directo (por ejemplo un cambio del rendimiento de cosechas en respuesta a un cambio del valor medio de la amplitud o de la variabilidad de la temperatura) o indirecto (p. ej., daños causados por un aumento de la frecuencia de inundaciones en la costa por razón de una subida del nivel del mar).

Vulnerabilidad

Es el grado hasta el cual un sistema es susceptible o incapaz de enfrentarse a efectos adversos del cambio climático, incluidas la variabilidad y los extremos del clima. La vulnerabilidad es función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático y de la variación a la que un sistema está expuesto, de su sensibilidad y de su capacidad de adaptación.

Capacidad de adaptación

Es la habilidad de un sistema (humano o natural) de ajustarse al cambio climático para moderar daños, aprovecharse de oportunidades o enfrentarse a las consecuencias.

Se pueden distinguir varios tipos de adaptación, incluida la anticipadora y la reactiva, la pública y privada, o la autónoma y la planificada.

En los sistemas naturales, la adaptación se produce por reacción, mientras que en los sistemas humanos puede también ser previsoras.

La capacidad de adaptación puede resultar de una respuesta autónoma del sistema, por ejemplo un cambio en su fenología, o puede resultar de actividades planeadas de adaptación, por ejemplo un manejo forestal que busca modificar la composición florística del ecosistema.

La adaptación permite reducir los impactos adversos del cambio climático y mejorar los impactos beneficiosos pero tendrá costos y no impedirá todos los daños (impactos residuales o netos).

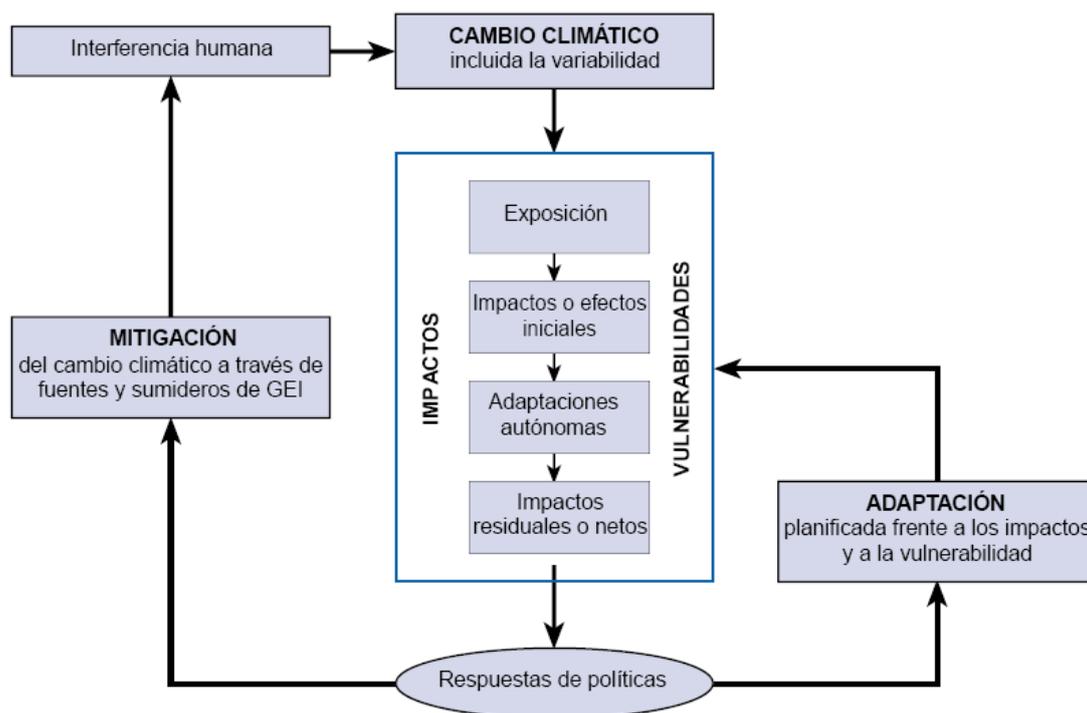


Figura RT-1: Ámbito de la evaluación del Grupo de Trabajo II.

Los sistemas naturales pueden ser especialmente vulnerables al cambio climático dada su limitada capacidad de adaptación.

Para evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas al cambio climático, se necesitan conocer los mecanismos de adaptación autónoma. Los componentes del ecosistema se

pueden adaptar a un cambio, por ejemplo, las plantas de un ecosistema pueden usar el agua de manera más eficiente en un contexto de sequía.

La capacidad de adaptación autónoma del ecosistema depende mucho de su estado y de las otras presiones no climáticas. Por ejemplo, la degradación o la fragmentación de un bosque por presiones humanas reduce su resiliencia al cambio climático, como en el caso de los bosques altamente fragmentados en zonas urbanas o agrícolas y los parches de bosques aislados.

Aunque los bosques se pueden adaptar de manera autónoma a ciertos cambios, es importante ayudar este proceso. Muchas medidas de adaptación se parecen a medidas de conservación de los bosques y buscan reducir las amenazas no climáticas que causan conversión, fragmentación o degradación. A nivel del paisaje, la adaptación tendrá como objetivo evitar la fragmentación, fomentar la conectividad de ecosistemas forestales y desarrollar zonas de amortiguamiento de zonas boscosas, zonas en las cuales se promueve una cierta flexibilidad en el uso del suelo para adaptarse a condiciones cambiantes.

La adaptación buscará mantener una diversidad de ecosistemas representativos en los gradientes ambientales porque proteger diferentes tipos de ecosistemas permite aumentar la probabilidad de que un tipo esté adaptado a las condiciones climáticas futuras. Se deberá también proteger los bosques maduros dado que presentan una cierta resiliencia al cambio climático y proteger las especies clave o especies dentro de los grupos funcionales importantes.

Otras medidas de adaptación incluyen el manejo pro-activo de las plagas, mediante quemas dirigidas o el uso de plaguicidas, o la implementación de técnicas silviculturales para sostener la productividad forestal, por ejemplo mediante técnicas que mantienen una diversidad de especies y de edades. Se puede también mantener la diversidad genética y promover la salud del ecosistema, por ejemplo mediante la restauración usando semillas de plantas de altitudes o latitudes más bajas o de especies más resistentes. La adaptación de los bosques puede también considerar la migración asistida mediante la introducción de especies en nuevas áreas y la protección de especies altamente amenazadas ex-situ en colecciones, jardines botánicos, o zoológicos para evitar su extinción.

La capacidad de adaptación es mayor en las tierras y aguas expuestas a una gestión más intensiva y en la producción de bienes comercializables. Por ejemplo, el aumento de las precipitaciones en la región pampeana, acompañado de mejoras tecnológicas, a causado un proceso de adaptación no planificado sumamente rápido, a través del corrimiento hacia el oeste de la frontera agropecuaria (*Barros y Beraján, 2005*).

Para el decisor político resulta difícil diseñar e implementar políticas en cambio climático, no sólo por la incertidumbre de las propias estimaciones, sino también por la naturaleza mundial e intergeneracional del problema y el efecto sobre el desarrollo

económico y social que puede tener la reasignación de recursos a actividades de adaptación y mitigación¹⁷.

En este sentido, resulta necesario realizar un análisis integral que permita comparar el costo económico, social y ambiental de los impactos del cambio climático con el costo inherente a la implementación de medidas de mitigación y adaptación. A los fines de evaluar este tipo de cuestiones se deben desarrollar análisis que consideren los impactos físicos y económicos integradamente, tal como propone el modelo “Integrated Assessment of Climate Protection Strategies (ICLIPS)”¹⁸.

Integrated Assessment of Climate Protection Strategies (ICLIPS) model

El modelo ICLIPS fue desarrollado con el objeto de evaluar estrategias integrales de protección al cambio climático. El modelo se basa en el enfoque de “ventana tolerable”.

Los decisores políticos que participan de la implementación de políticas en el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático se enfrentan con un objetivo relativamente ambiguo en su artículo 2: “prevenir las interferencias antropogénicas peligrosas sobre el sistema climático” y al mismo tiempo, “permitir el desarrollo económico de una manera sostenible”.

En este aspecto surgen dos cuestiones: 1) el entendimiento de que es una interferencia peligrosa sobre el sistema climático es subjetivo y depende de la interpretación que le da a esta frase cada Parte de la Convención 2) la respuesta debe asegurar el desarrollo económico de una manera sostenible.

EL modelo ICLIPS permite abordar estas dos cuestiones de manera simultánea buscando un límite tolerable de impactos que cumpla con impedir las interferencias peligrosas sobre el cambio climático y asegure el desarrollo económico de manera sostenible.

El funcionamiento del modelo ICLIPS incluye la estimación de “Funciones de Respuesta a los Impactos Climáticos” (CIRF, por sus siglas en inglés).

Funciones de respuesta (CIRF : Climate Impacts Response Functions)

Contrariamente a la mayor parte de los estudios existentes que evalúan la respuesta de la vegetación al cambio climático para un escenario específico, la filosofía de los CIRFs es simular impactos para un amplio rango de escenarios posibles.

A partir de los CIRF también es posible realizar un “análisis inverso de impactos” (*descripto más adelante*).

¹⁷ Las actividades de mitigación incluyen, por ejemplo, el incremento en el uso de energías renovables o las acciones tendientes a aumentar la eficiencia energética que contribuyen a reducir la emisión de GEI a la atmósfera.

¹⁸ Descripto en la publicación especial al respecto de Climate Change número 46 del año 2000.

Los decisores políticos deben demarcar cual es el umbral a partir del cual el cambio climático se percibe como peligroso. Esto se corresponde con un nivel máximo permisible de forzante antropogénica (nivel de emisiones de GEIs). A partir de los “CIRF” se puede determinar el impacto máximo tolerable (por ejemplo, 15% de pérdida del área ocupada por bosques tropicales) e identificar cual es la concentración de CO₂ y el patrón de emisiones posible para no superar ese umbral. Posteriormente, en función de la tasa de emisiones actual se determinan las acciones de mitigación necesarias para que el patrón de emisiones a futuro logre estabilizar la concentración de CO₂ en el nivel identificado previamente.

Cambio climático y establecimiento de límites

Los procesos vinculados al cambio climático comprenden interacciones complejas entre actividades humanas y el sistema climático que se pueden describir en forma de un ciclo con distintos estados:

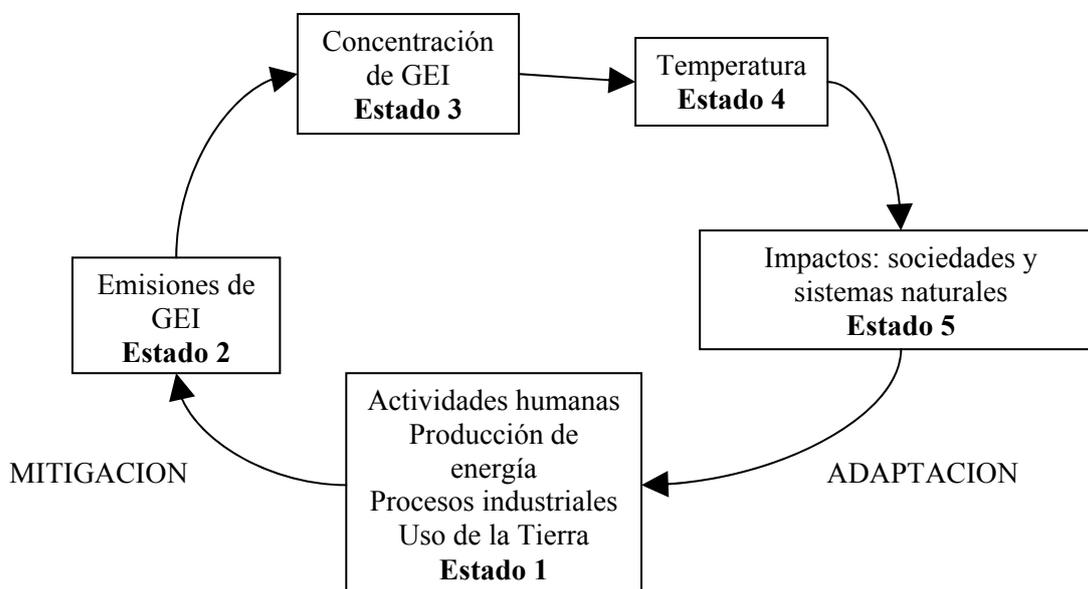


Figura 1.5.1: Adaptada de “Beyond Kyoto, advancing the international effort against climate change, Pew Center on Global Climate Change, 2003”

En teoría sería posible establecer límites en cualquiera de los estados del ciclo de cambio climático.

Cualquier límite, no importa de qué tipo busca como objetivo final limitar los impactos del cambio climático¹⁹ (estado 5) y para ser efectivo, debe influir de alguna manera sobre las actividades humanas (estado 1).

¹⁹ Existen distintas formas de establecer límites, por ejemplo: daño en las zonas costeras, migración de vectores de enfermedades, pérdida de ecosistemas naturales, disminución de la productividad en sistemas manejados, etc.

Cada estado presenta incertidumbres. Por ejemplo, cuanto más cercano se establece el límite con respecto al estado 5, mas clara es su relación o efecto sobre los impactos del clima, pero mas inciertas son las implicancias de la política de mitigación. Por el contrario, un límite fijado sobre el estado 1 puede ser mas fácilmente trasladable a una política de mitigación pero su contribución a minimizar impactos del cambio climático es menos clara.

En términos físicos, el ciclo del cambio climático procede en el sentido de las agujas del reloj partiendo de las actividades y finalizando en los impactos. Sin embargo, considerando que el objetivo final de cualquier estrategia de cambio climático es evitar o reducir los impactos, tiene sentido iniciar el análisis en el estado 5 e ir hacia atrás hasta el estado 1, en un proceso que se denomina “*análisis inverso de impactos*”.

El análisis inverso de impactos, si bien resulta una herramienta de utilidad, en términos de enfocar el establecimiento de límites en función de impactos tolerables, es difícil de implementar a escala global, dada la naturaleza local de los impactos. Un cambio, por ejemplo aumento en la temperatura, que puede ser considerado “peligroso” en una región desértica podría no serlo o inclusive ser benéfico para regiones polares.

2.1 METODOLOGIA GENERAL DE TRABAJO

Modelos de vegetación; climatología actual; construcción de escenarios climáticos futuros; corridas actuales y futuras; validación; calibración; análisis de sensibilidad; análisis de resultados.

Se utilizan los modelos de vegetación BIOME4 y CPTEC-PVM-CIMA (una versión simplificada del CPTEC-PVM) para estudiar el impacto del cambio climático sobre la distribución y estado de la vegetación en Argentina.

La metodología de trabajo se basa en las recomendaciones de la “Guía para el uso de datos de escenarios para la evaluación de los impactos del cambio climático y la adaptación” del IPCC (1999) e incluye las siguientes etapas:

- 1- Corrida control de los modelos de vegetación
- 2- Validación
- 3- Ajustes en los modelos
- 4- Experimentos de sensibilidad
- 5- Construcción de los escenarios de cambio climático y escenarios climáticos futuros
- 6- Corridas con los escenarios climáticos futuros
- 7- Análisis de los resultados

El plan de trabajo original de esta tesis requirió de una serie de ajustes en función de algunos de los aspectos desarrollados a continuación.

Selección del modelo de vegetación y tipo de corrida

Como se mencionó en el capítulo 1.4 los modelos de vegetación dinámicos tienen la capacidad de representar de una manera más realista los procesos ecológicos vinculados a los cambios en la distribución y composición de los biomas. Por otro lado, requieren mayor información de entrada y demandan mayores recursos computacionales para correrlos.

Dada la inexistencia de trabajos previos en este campo en la región, se consideró más apropiado establecer una línea de trabajo que comenzara con la aplicación de un modelo de vegetación más simple, del tipo estático, que pudiera generar un primer escenario “crudo”, dejando para una etapa futura un trabajo más fino utilizando un modelo dinámico²⁰.

Dentro de la variedad de modelos estáticos disponibles se consideraron MAPSS y BIOME3 ya que habían sido utilizados en el reporte sobre “Impactos regionales del cambio climático” (IPCC, 1998) que sirvió de base para elaborar la primera propuesta de trabajo de esta investigación.

²⁰ Probablemente, el más indicado sea el LPJ que es parte de la familia de modelos BIOME.

Con este antecedente, se contacto a los investigadores a cargo de los modelos MAPSS y BIOME4 (una versión actualizada de BIOME3), Ron Neilson y Jed Kaplan, respectivamente. Ambos generosamente facilitaron el código fuente de los modelos (en lenguaje C y FORTRAN respectivamente) y en el caso de BIOME4 también la climatología de Leemans and Cramer (CLIMATE 2.2) y datos de suelo necesarios para realizar las corridas.

Considerando que:

la performance de ambos modelos en la región, conforme al IPCC (1998) era similar;

MAPSS requería conseguir una base de datos (con mucha más información de la que requiere BIOME4) para correrlo; y

El modelo CPTEC-PVM se eligió posteriormente por dos razones:

fue elaborado por científicos de la región (Brasil) lo que aseguraba su preocupación porque el modelo representara bien la vegetación de Sudamérica aún y cuando lo hiciera aceptablemente a escala global.

era un modelo bastante más simple y con una base de funcionamiento más correlacional por lo que también resultaba interesante la comparación con BIOME4 que era un modelo con una orientación más mecanística.

Vale aclarar, que durante los primeros años de esta investigación se analizó el funcionamiento (*resultados no mostrados en este trabajo*) de los modelos bioclimáticos de Holdridge (1967) y Köppen (1936) en la región. Su utilización fue posteriormente descartada frente al mejor desempeño presentado por el CPTEC-PVM.

Desarrollo del CPTEC-PVM-CIMA

Se realizaron modificaciones sobre la versión original del CPTEC-PVM con el objeto de lograr una versión simplificada del modelo, CPTEC-PVM-CIMA, que siguiera representando apropiadamente la distribución de los grandes biomas en Argentina.

Las modificaciones realizadas obedecen a distintas causas, entre las cuales se destacan, la falta de información para aplicar algunas de las fórmulas del modelo original, la intrascendencia de ciertos procesos para la representación de los biomas en Argentina y la necesidad de contar con un modelo simple que utilice la menor cantidad posible de parámetros de entrada.

Requisitos de información de entrada

Ambos modelos requerían información sobre temperatura y precipitación media mensual. BIOME4, adicionalmente requería información sobre radiación y textura del suelo.

Dado que el trabajo implicaba el uso de modelos de vegetación en equilibrio, para correrlos se requerían promedios mensuales²¹ climatológicos. Para ello se analizaron dos climatologías globales (CRU y LEM) disponibles en Internet (*ver capítulo 2.2*).

La utilización de datos generados por organismos locales como el Servicio Meteorológico Nacional o el INTA, resultaba complicada debido al limitado acceso que existe a dicha información. Además, la comparación con estudios hechos en otras partes del mundo se facilitaba si se utilizan bases de datos comunes.

Adicionalmente, para ciertas variables, como la precipitación y temperatura, no se justificaba el esfuerzo de juntar información local, ya que a partir de un primer análisis crudo se observaba una clara coincidencia entre los valores de las dos bases de datos globales, así como, con mapas climatológicos regionales (WMO, 1975).

Por el contrario, la variabilidad en los valores de radiación dependiendo de la climatología consultada y la resolución gruesa de los datos de textura del suelo utilizados en este trabajo, justifican a futuro la construcción de bases de datos en base a información generada localmente²².

Resolución espacial

La resolución espacial de trabajo seleccionada 0,5° lat x 0,5° lon (aprox. 50 km x 50 km) obedeció a:

la calidad de la base de datos con que se contaba para alimentar el modelo. Las climatologías y los escenarios futuros generados por el MM5-CIMA estaban en esta resolución.

la representatividad de los procesos simulados por el modelo en la escala elegida. Como se mencionó previamente en capítulo 1.4, conforme se afina la escala de trabajo la distribución de la vegetación se ve influenciada cada vez en mayor grado por otros factores distintos al clima.

Mapa y clasificación de vegetación

A pesar de existir disponibles distintos mapas de vegetación global (*Bailey, 1986; Olson, 1983; Matthews, 1983*) consideramos más apropiado utilizar el mapa de eco-regiones elaborado por Parques Nacionales (de ahora en mas “mapa de Parques”) que esta basado en la experiencia y trabajo de biogeografos locales (*Cabrera, 1971*).

La elección del mapa tuvo dos implicancias:

²¹ El modelo BIOME4 simula procesos que requieren información de entrada en una escala temporal diaria (como el balance hídrico del suelo). Como los datos de entrada son promedios mensuales el modelo los interpola linealmente a valores diarios.

²² En cuanto a las texturas del suelo una posibilidad es utilizar el Atlas de suelos del INTA (vale aclarar que este trabajo requiere compatibilizar las clases texturales del Atlas con las del modelo). Para la radiación solar existe la opción de utilizar las cartas de radiación de Grossi Gallegos *et al.* (1987).

restringió la ventana espacial de trabajo que originalmente iba a ser la parte sur de Sudamérica²³ a considerar únicamente el territorio de la Argentina.

la clasificación en eco-regiones debió ser compatibilizada con las de los modelos BIOME4 y CPTEC-PVM para hacer los resultados comparables.

Con relación a este último aspecto, la compatibilización de las clasificaciones de vegetación también tenía el objetivo de reducir la cantidad de categorías facilitando de esta manera el análisis de los resultados, tablas y mapas, que se hacía sumamente engorroso con las 27 categorías de BIOME4 y las 15 del CPTEC-PVM.

Además, las corridas control mostraban para ambos modelos desfasajes considerables entre la vegetación simulada y la real, por ejemplo, en la correcta representación de las áreas caracterizadas por formas de vida leñosa o herbácea. Consecuentemente no tenía mucho sentido profundizar el análisis de los resultados en categorías que diferenciaban distintos tipos de bosques cuando los modelos tenían inconvenientes en algunas áreas para simular la correcta presencia de herbáceas (por ejemplo, BIOME4 simulaba bosque en la región pampeana).

En este contexto, se decidió utilizar una clasificación amplia en tres “biomas generales” caracterizados por la forma de vida dominante:

- 1) Sin vegetación a bioma resistente;
- 2) Bosque sabana;
- 3) Pradera.

A pesar de restringir el trabajo a solo tres categorías de biomas generales, la comparación de los resultados utilizando las matrices de confusión para cada eco-región era sumamente engorroso, por lo que se decidió hacer este análisis detallado solo en siete eco-regiones, que en conjunto representan el 80% del territorio nacional: pampa, espinal, monte de sierras, monte de llanuras, estepa patagónica, chaco húmedo y chaco seco.

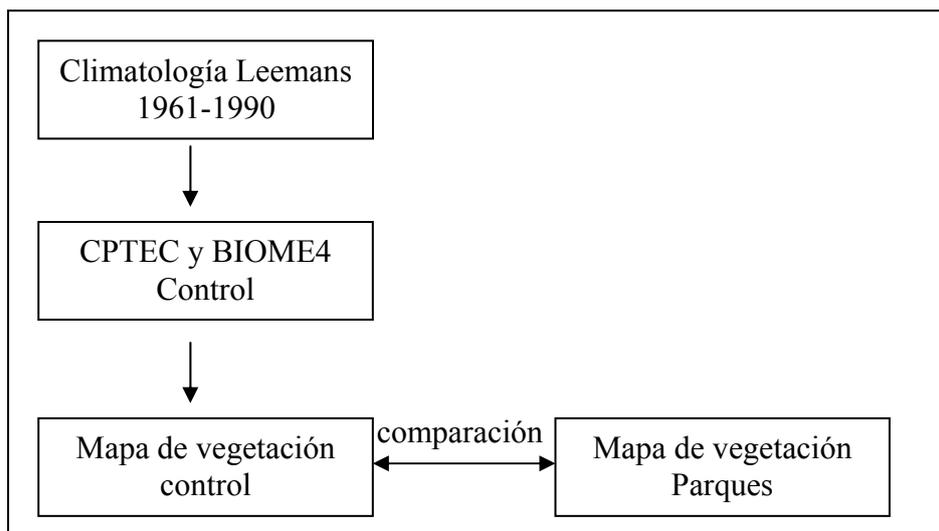
Corridas control de los modelos y ajustes

A partir de las salidas de ambos modelos, que consistían en archivos (.txt) de longitud, latitud y tipo de bioma, se elaboraron mapas²⁴ utilizando el Sistema de Información Geográfica IDRIDI 2.1.

Para evaluar la similitud entre el mapa de vegetación producido por la corrida control de los modelos y el mapa de Parques se generaron matrices de confusión a partir de las cuales se estimó el porcentaje de acuerdo y el estadístico kappa.

²³ Lat N: -13; Lat S: -55; Lon O: -75; Lon E: -40.

²⁴ El mismo procedimiento se utilizó para la elaboración de mapas de otras variables como temperatura, precipitación, radiación, textura del suelo, PPN, IAF, etc.



La distribución de la vegetación generada a partir de las corridas control de BIOME4 (Castillo y Nuñez, 2001, Castillo et al., 2003) y CPTEC-PVM (Castillo y Nuñez, 2006), mostraba discrepancias con el mapa de Parques por lo que se planteaba la necesidad de realizar ajustes en los modelos antes de encarar los experimentos de sensibilidad y los de cambio climático.

Al respecto, había que considerar que los parámetros de los TFPs y los límites para los biomas de ambos modelos habían sido calibrados por sus respectivos autores, comparando las salidas control de los modelos con mapas de vegetación global.

Considerando que la ventana espacial de trabajo elegida, se restringía al territorio Argentino, no podíamos conocer el efecto de los ajustes propuestos sobre el desempeño global de los modelos. Consecuentemente, corríamos el riesgo de que los ajustes que pudiéramos realizar para mejorar la representación en el país pudieran afectar sensiblemente el desempeño de los modelos en otros lugares del globo.

En este contexto, se decidió continuar con las siguientes etapas de trabajo (experimentos de sensibilidad y cambio climático) utilizando los modelos originales sin ajustes. De cualquier manera en los capítulos 2.7, 2.8 y 2.9 se identifican y describen ajustes que mejoran el desempeño de ambos modelos, quedando para un trabajo futuro el efecto de estos ajustes sobre su desempeño global. Vale aclarar, que este trabajo requiere el manejo de bases de datos globales (clima, suelo y vegetación) además de mayor capacidad computacional y tiempo de corridas para obtener resultados.

Análisis de sensibilidad

Se realizaron experimentos de sensibilidad²⁵ en el tipo de bioma presente y la PPN a partir de aumentar o reducir en un 30% una o más variables: temperatura (t+30), precipitación (p+30 y p-30), temperatura y precipitación simultáneamente (tp+30 y t+30p-30) y CO₂.

²⁵ No analizamos la sensibilidad de los modelos a cambios en las propiedades del suelo y en la radiación aunque existen trabajos que describen efectos importantes ante cambios al respecto.

Escenario climático futuro: selección de los modelos climáticos

La elección de los modelos del Haddley Center (HadCM3 y HadAM3P) y el MM5-CIMA para generar los escenarios de cambio climático se basó entre otras, a la existencia de trabajos previos (Carril *et al.*, 1997; Nuñez y Solman, 2000) que indicaban una buena performance de estos modelos en la representación de los patrones climáticos de la región.

Para establecer las condiciones de inicio y de borde para forzar el Modelo MM5-CIMA, el Haddley Center facilitó las salidas de los modelos HadCM3 y HadAM3P resultantes de tres corridas diferentes:

- 1- Corrida control (periodo: 1961-1990)
- 2- Corrida futura utilizando escenario A2 del IPCC (periodo: 2071-2100)
- 3- Corrida futura utilizando escenario B2 del IPCC (periodo: 2071-2100)

Escenarios climáticos de alta resolución generados en el CIMA

Se corrió la versión CIMA del modelo climático regional MM5 (Solman *et al.*, 2006; Nuñez, *et al.*, 2006) en la parte sur de Sudamérica utilizando una resolución horizontal promedio de 40 km para los periodos de tiempo 1981-1990 y 2081-2090 utilizando como condiciones de borde e inicio (temperatura, componentes del viento, vapor, presión de superficie) las dadas por el HadAM3P (con los escenarios del IPCC A2 y B2).

Se corrigió la temperatura y la precipitación generadas por el MM5-CIMA restando y sumando a cada valor el promedio decádico de la climatología de CRU y de la corrida control del MM5-CIMA.

Salidas del MM5-CIMA y variabilidad natural

Se utilizó la metodología descrita por Ruosteenoja *et al.* (2003) para evaluar la significancia estadística de los cambios en la temperatura y precipitación proyectados por el MM5-CIMA con relación a los cambios esperados por la variabilidad natural del clima.

Construcción de los escenarios de cambio climático

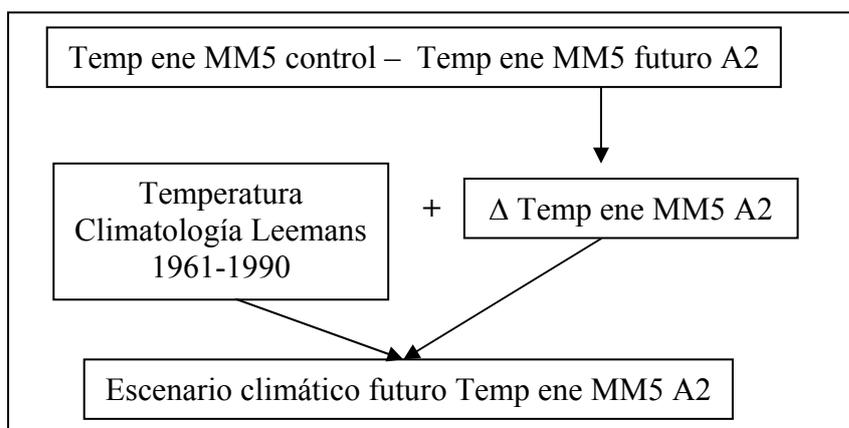
La construcción de escenarios de cambio climático se realizó a partir de estimar las diferencias²⁶ en la temperatura y precipitación de las corridas control y futura²⁷ del MM5-CIMA.

Construcción de los escenarios climáticos futuros

²⁶ El IPCC (1999) recomienda para la temperatura el uso de diferencias mientras que para la precipitación también se pueden usar tasas.

²⁷ Las corridas control y futura corresponden al promedio de 10 años.

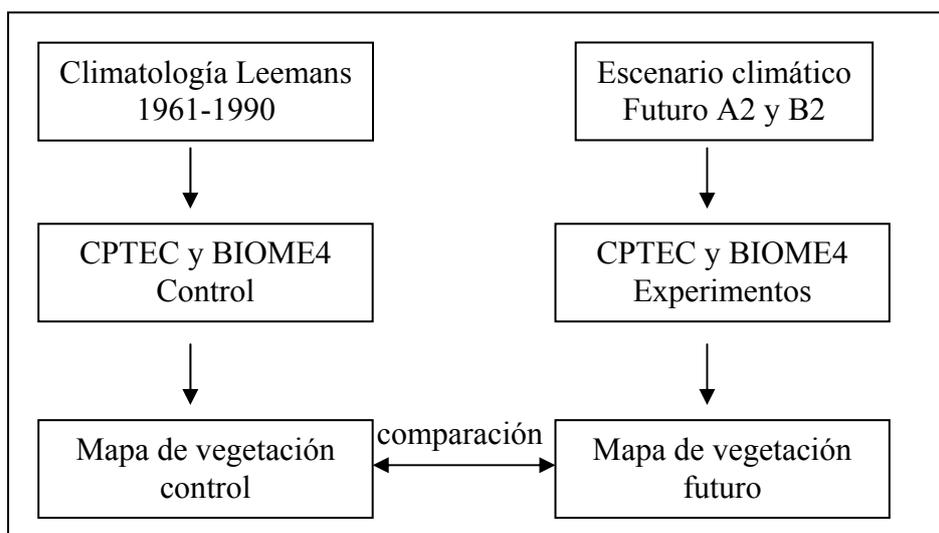
La construcción de los escenarios climáticos futuros se realizó ajustando la climatología actual²⁸ sumándole los Δ precipitación y Δ temperatura (obtenidos de la diferencia entre las corridas control y futura del MM5-CIMA en el paso previo).



Ejemplo de cálculo de un escenario climático futuro para la temperatura media mensual de enero a partir de la corrida del MM5 A2.

Corridas de los modelos de vegetación con escenarios futuros y comparación con la corrida control

Se corrieron los modelos de vegetación utilizando los escenarios climáticos futuros.



Se comparó el mapa de vegetación del escenario futuro con el del escenario control.

A nivel país, las conclusiones obtenidas corresponden a un análisis visual entre los mapas de vegetación presente y futura. Para las siete eco-regiones de interés, mencionadas previamente, el análisis incluyó adicionalmente el estudio de las matrices de confusión.

²⁸ En nuestro caso la de Leemans and Cramer

PPN, IAF y escorrentía: corridas de BIOME4 con escenarios futuros y comparación con la corrida control

Además del cambio en el tipo de bioma, se analizaron en BIOME4 las salidas de PPN, IAF y escorrentía.

Se comparó estadísticamente el promedio de cada variable por eco-región entre el control y los experimentos utilizando “GraphPad InStat version 3.00 for Windows 95, GraphPad Software, San Diego California USA, www.graphpad.com”.

A lo largo de la tesis, en las distintas tablas, seguido del promedio se muestra entre paréntesis el error standard para cada variable.

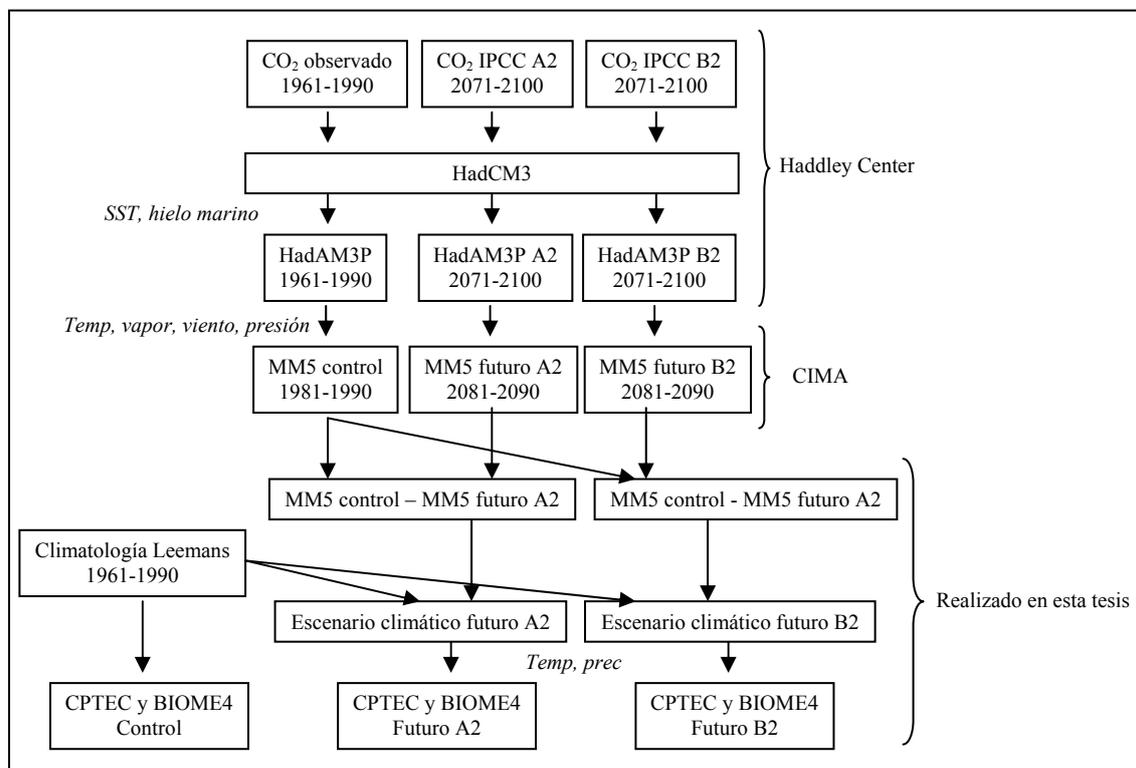
Cuando se cumplían las condiciones se aplicó un anova de un factor (con post-test de Dunnett). De lo contrario, se trataba transformando los datos y cuando seguían sin cumplir se aplicaba una prueba no paramétrica (Kruskal-Wallis).

El nivel de significancia en las tablas se indica como:

- * = $P < 0,05$
- ** = $P < 0,01$
- *** = $P < 0,001$

Análisis por eco-región.

Se realizó un análisis integral de cambios en la precipitación, temperatura, tipo de bioma, PPN, IAF y escorrentía para las siete eco-regiones de interés.



Esquema de la metodología de trabajo utilizada

Estimación de una función de respuesta de impacto climático y elaboración de un ejercicio de análisis inverso de impactos.

Se estimó una “función de respuesta de impacto climático” para la PPN del Chaco Seco utilizando la metodología descrita en Ferenc et al. (2000).

Posteriormente se realizó un *ejercicio ilustrativo* de “análisis inverso de impactos”.

2.2 BASES DE DATOS DE ENTRADA

Climatología de CRU y de LEM; texturas de suelo; agua disponible; conductividad hidráulica; precipitación, temperatura y radiación media mensual; temperatura mínima absoluta;

Introducción:

Trabajos previos han evaluado la sensibilidad de los modelos de vegetación a los datos de entrada encontrando diferencias significativas en las salidas. Bunkei *et al.* (2004) utilizaron dos bases de datos climáticos, NCAR y JWA, para correr el modelo “Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPS)” y analizaron la PPN simulada en una región de Japón. En promedio, la base de datos del NCAR resultó en una PPN 15% inferior a la corrida del mismo modelo usando los datos de JWA.

La radiación solar es quizás la variable ambiental que registra la mayor variabilidad entre las diferentes fuentes de información. En ausencia de “estres hídrico”, la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) conjuntamente con la disponibilidad de nutrientes suelen ser los factores limitantes para el crecimiento de la vegetación. Aber (2000) comparó el impacto de cinco bases de datos de radiación sobre la PPN generada por el modelo PnET-II en el este de los Estados Unidos. La PPN simulada por el modelo varió en un rango de 12 a 21 %.

La distribución de la vegetación esta fuertemente influenciada por las propiedades físicas del suelo. Estas afectan su distribución a lo largo del perfil y su accesibilidad para las plantas. Bachelet (1998) mostró diferencias significativas en las salidas de distribución de vegetación producidas por el modelo MAPSS dependiendo de la base de datos de suelo utilizada (FAO o NRCS) para correrlo.

Existen distintas climatologías y bases de datos de suelos globales que difieren en su representación regional, entre otras, por la cantidad y localización de los puntos de monitoreo, la metodología de medición utilizada, el periodo durante el cual se realizaron mediciones y el tipo de interpolación utilizada para completar las grillas.

En este trabajo se comparan dos climatologías globales, LEM (Leemans and Cramer, 1991) y CRU (Hulme and Jones, 1999), que han sido ampliamente utilizadas en estudios de impactos del cambio climático sobre la vegetación.

Además se describe la metodología utilizada por los autores del modelo para obtener la disponibilidad de agua en el suelo y la conductividad hidráulica necesarias para correr el modelo BIOME4.

Materiales y métodos:

Se aplicó una mascara para filtrar de los datos globales los correspondientes a la Argentina. En algunos casos fue necesario alterar la grilla original y se hizo a partir de una interpolación al punto más cercano en longitud y latitud. En ciertos casos también fue necesario cambiar las unidades.

La comparación entre las bases de datos se basó en un análisis visual de los mapas de distribución de las variables y en una comparación estadística de los promedios espaciales por eco-región para cada variable.

Descripción de la base de datos: IIASA Mean Monthly Values of Temperature, Precipitation, and Cloudiness on a Global Grid (Leemans and Cramer, 1991).

La base de datos consiste en: a) temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$) b) precipitación media mensual (mm/mes) c) “sunshine hours” (%).

Los datos están en una grilla global de resolución 30 minutos. La resolución temporal abarca el periodo 1931-1960²⁹.

Los registros meteorológicos³⁰ (mas de 2500 estaciones) utilizados como fuente para la construcción de la base de datos incluyen: 1) World Weather Records, U.S. Weather Bureau. 2) The Climate Atlas of Walter and Lieth. 3) Müller: Selected Climatic Data for Vegetation Science, based on: a) UK Meteorological Office records. b) World Survey of Climatology (Landsberg). 4) Bradley: Precipitation and Temperature Data for the Northern Hemisphere. 5) Selected weather data for Europe from the UK Meteorological Office. 6) Thornthwait and Mather's Temperature and Precipitation data. 7) Soviet Temperature and Precipitation data (Siberia). 8) Chinese Temperature and Precipitation data (NE China).

Esta base de datos ha sido previamente utilizada en un gran número de estudios biogeográficos y ecológicos (Salomon & Leemans, 1990; Prentice et al, 1992; Cramer and Salomon, 1993; Leemans and Salomon 1993, Paruelo et al. 1996).

Descripción de la base de datos: CRU (Hulme and Jones, 1999).

La base de datos incluye, entre otras: a) temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C} \cdot 10$) B) precipitación media mensual (mm/día $\cdot 10$) c) radiación media mensual (W/m²).

Los datos están en una grilla global de resolución de 0,5 grados de longitud y latitud. La resolución temporal abarca el periodo 1961-1990.

Los registros meteorológicos³¹ (mas de 19800 estaciones para precipitación) utilizados como fuente para la construcción de la base de datos incluyen, entre otras: 1) National meteorological agencies 2) WMO 1961-90 global standard normals 3) CRU global datasets of station time series 4) CIAT South American database.

²⁹ Existe una versión moderna de (Leemans and Cramer, 1991) denominada CLIMATE 2.2, que incluye datos para el periodo 1901 a 1996.

³⁰ Fueron interpolados a una grilla de 0,5 grados de longitud y latitud usando “triangular network followed by smooth surface fitting”.

³¹ Los datos meteorológicos fueron interpolados a una grilla de 0,5 grados de longitud y latitud usando “thin-plate splines”.

Conversión de radiación solar (W/m²) a fracción de horas luz (“sunshine hours %”).

La radiación solar en CRU esta en unidades de W/m². Para comparar con los datos de la base de datos de Leemans and Cramer se transformó a “fracción de horas de luz” a partir de la fórmula de Angstrom (FAO, 1998):

$$R_s = Q_0 \text{ zz} (c + d n_i)$$

Donde,

R_s = radiación solar que alcanza la superficie de la tierra

$Q_0 \text{ zz}$ = radiación extraterrestre (función de la constante solar, latitud y día del año)

$C=0,25$ y $d=0,5$ son constantes empíricas. Friend (1996) calculó los valores de c y d usados aquí de una regresión de la tasa de radiación potencial medida vs el porcentaje de las horas de luz posibles máximo de un set de 161 estaciones de la base de datos de Muller (1982).

n_i = proporción de máxima cantidad de horas de luz

Formula para calcular la temperatura mínima absoluta

La temperatura mínima absoluta, requerida por BIOME4, se calculo a partir de los datos de temperatura media mensual siguiendo Prentice et al. (1992).

$$\text{Tem min abso annual} = (0.006 * \text{cold}^2) + (1.316 * \text{cold}) - 21.9$$

Donde,

Cold= temperatura media mensual mínima del año

Descripción de la base de datos de suelo:

Los datos de suelo fueron generados a partir del mapa de suelo de la FAO (1974) basándose en la información de textura de suelo de Zobler (1986).

La capacidad de retención de agua en el suelo (whc o awc, por sus siglas en inglés) y la conductividad hidráulica se estimaron a partir de las texturas del suelo (Haxeltine y Prentice, 1996; Prentice et al., 1992).

La capacidad de retención de agua corresponde a la diferencia entre el contenido volumétrico de humedad del suelo en la capacidad de campo (CC) y en el punto de marchites permanente (PMP). Se asumió que la CC y el PMP corresponden a potenciales mátricos de 100 y 4500 cm respectivamente. La ecuación (1) de Cosby et al. (1984) se utilizo para obtener los valores de contenido de agua a estos dos potenciales. De esta manera se derivaron los valores para los tipos texturales.

El parámetro K (k_1 y k_2 para cada capa del suelo) fue calibrado para dar magnitudes y rangos de percolación consistentes con las clases de textura del suelo. La disponibilidad

total de agua en el suelo (“total available water-holding capacity”, Ta_whc) fue calculada a partir de multiplicar la whc por profundidad de la capa en el suelo (300 mm o 1200 mm).

whc = capacidad de campo – punto de marchitamiento permanente.

Ta_whc = whc * profundidad de la capa del suelo

textura	k1 (mm/hora)	k2 (mm/hora)	whc	Ta_whc300 (mm)	Ta_whc1200 (mm)
coarse	5	4	0,11	33	132
medium	4	4	0,15	45	180
fine	3	4	0,12	36	144
medium-coarse	4,5	4	0,13	39	156
fine-coarse	4	4	0,115	34,5	138
fine-medium	3,5	4	0,135	40,5	162
fine-medium-coarse	4	4	0,127	38,1	152,4
organic	9	4	0,3	90	360
ice	0,2	4	0,1	30	120

Resultados:

Temperatura anual: los promedios por eco-región son muy parecidos en las dos climatologías. CRU presenta valores ligeramente superiores a la de LEM en todas las eco-regiones excepto en Monte de sierra y de llanuras. Como es esperable, en ambos casos se registran las temperaturas superiores en el Chaco seco y húmedo, intermedias en el espinal, pampa y monte de sierras y las menores en el monte de sierras y la estepa patagónica.

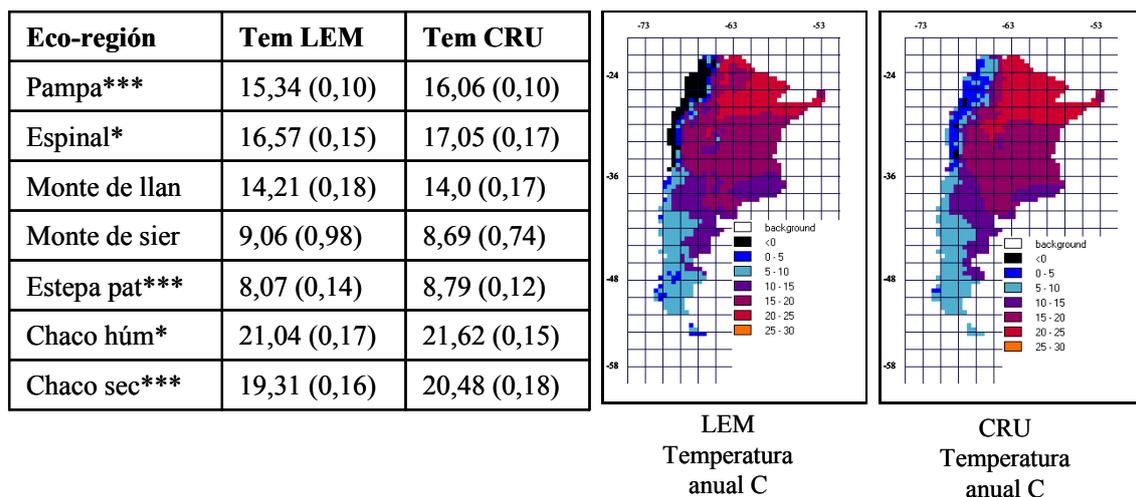


Figura 2.2.1: promedio regional (error standard) y mapa de distribución de la temperatura anual (°C) de la climatología de LEM y CRU.

Precipitación anual: los promedios por eco-región son muy parecidos en las dos climatologías. LEM presenta valores ligeramente superiores a la de CRU en todas las eco-regiones excepto en la estepa patagónica. Como es esperable, en ambos casos se registran los valores de precipitación anual superiores en el Chaco húmedo, intermedios en el espinal, pampa y chaco seco y los menores en el monte de sierras, monte de llanuras y estepa patagónica.

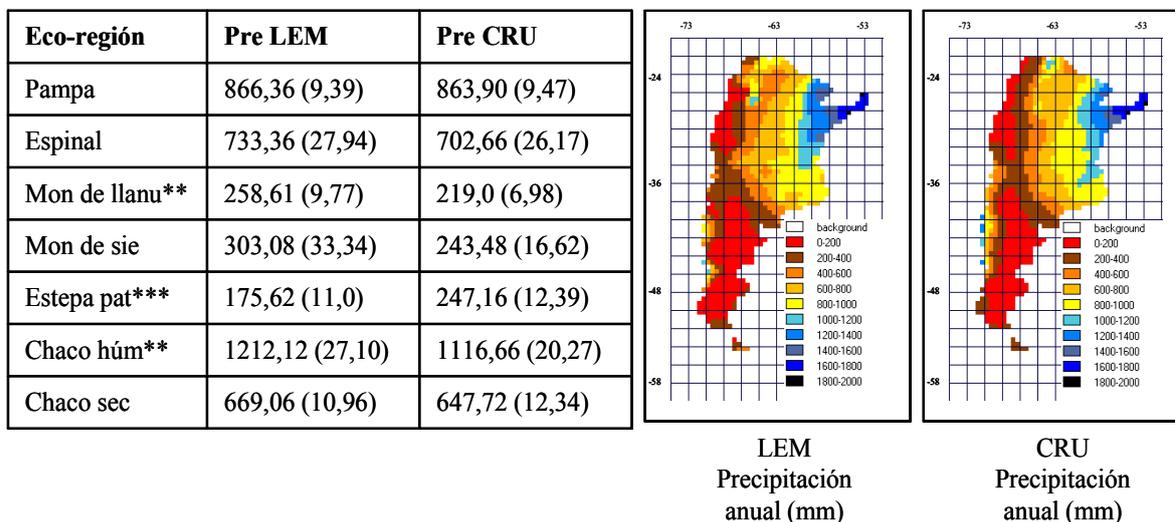


Figura 2.2.2: promedio regional (error standard) y mapa de distribución de la precipitación anual (mm) de la climatología de LEM y CRU.

Radiación: los valores de radiación anual (%) son siempre superiores en LEM.

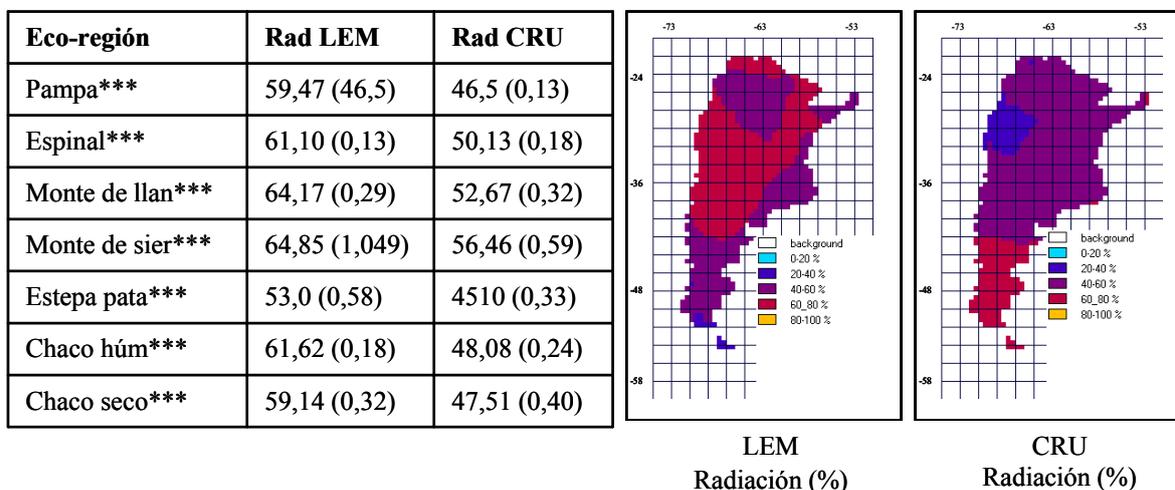


Figura 2.2.3: promedio regional (error standard) y mapa de distribución de la radiación anual (%) de la climatología de LEM y CRU.

Análisis de la base de datos del suelo

Suelo: de las nueve texturas de Zobler presentes en la base de datos global, en la Argentina solo se encuentran representadas tres. Para las siete eco-regiones de interés, un 39% del área es de texturas gruesas, un 34% de textura media y un 25% de texturas finas. En el monte de sierras predominan las texturas gruesas, en el chaco húmedo la

fina y en la estepa la media. El resto de las eco-regiones presenta una distribución en la que predominan dos tipos texturales.

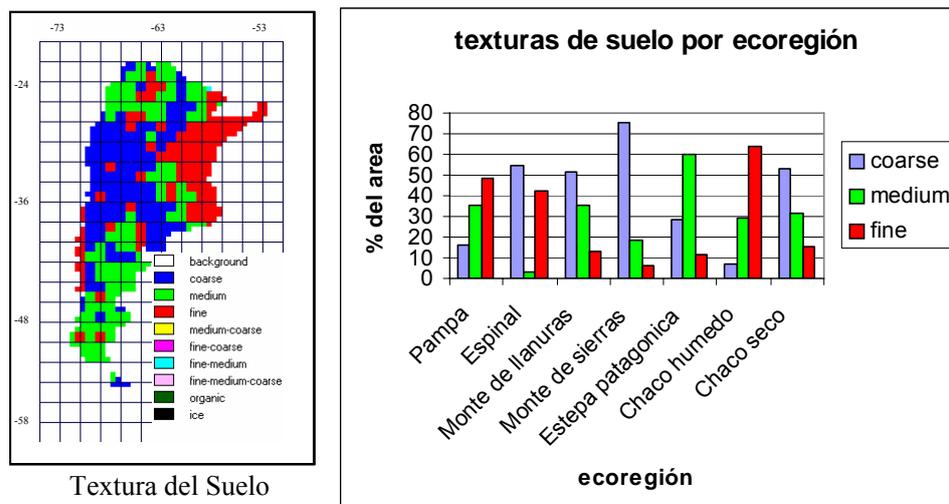


Figura 2.2.4: mapa de texturas de suelo y porcentaje del área regional ocupada por las texturas: coarse, medium y fine.

Conclusiones y perspectivas a futuro:

La climatología de CRU y la de LEM son similares para la región y consistentes con otras bases de datos regionales (WMO, 1975). Se decidió utilizar la climatología de LEM ya que ha sido ampliamente citada en la bibliografía por lo que se facilita la comparación con otros estudios.

Existen diferencias mayores en la radiación (en parte podrían deberse al proceso de conversión de W/m² a % de horas de luz³²). Las diferencias entre los datos de las climatologías justifican a futuro la construcción de bases de datos en base a información generada localmente³³.

Se deberá analizar la representatividad en la región de la formula utilizada para calcular la temperatura mínima absoluta anual a partir de la temperatura del mes mas frío del año.

La escasa diversidad de texturas del suelo encontradas en la Argentina (3 de las 9 posibles) merece un estudio mas detallado en cuanto a la representatividad de la base de datos global utilizada y su posibilidad de ser reemplazada por datos locales³⁴.

³³ En cuanto a las texturas del suelo una posibilidad es utilizar el Atlas de suelos del INTA (vale aclarar que este trabajo requiere compatibilizar las clases texturales del Atlas con las del modelo). Para la radiación solar existe la opción de utilizar las cartas de radiación de Grossi Gallegos *et al.* (1987).

³⁴ Atlas de suelos de la República Argentina (INTA, 1990).

ANEXO:

Promedio estacional de temperatura y precipitación estacional de LEM

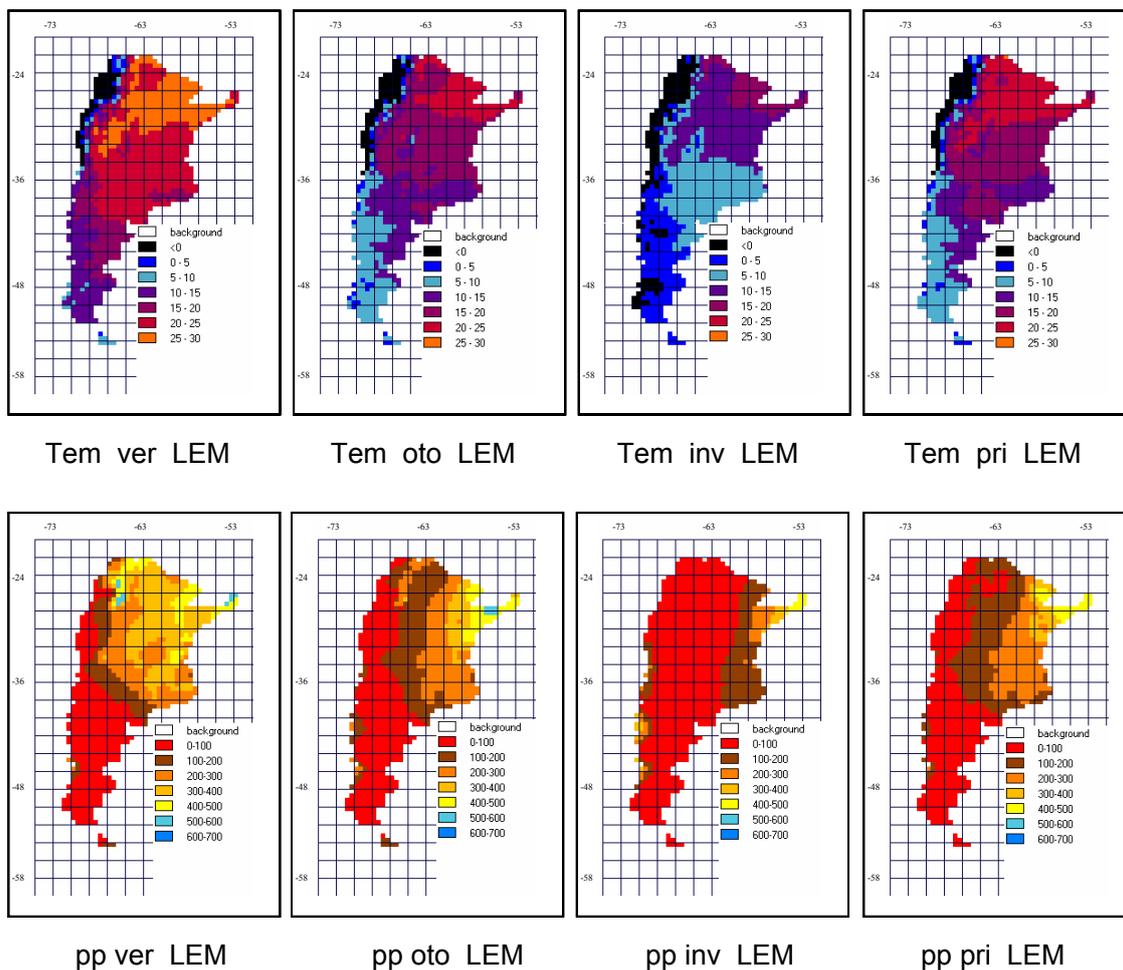


Figura 2.2.5: precipitación y temperatura promedio estacional de la climatología LEM

2.3 MODELO CPTEC-PVM Y CPTEC-PVM-CIMA

Funcionamiento del modelo; versión original y simplificada; CPTEC-PVM-CIMA; balance hídrico de Willmot y de Thornthwaite; índices climáticos; valores límite de biomas; algoritmo de clasificación.

Introducción:

El CPTEC-PVM (Oyama y Nobre, 2004) es un modelo biogeográfico de vegetación potencial en equilibrio desarrollado³⁵ con el propósito de acoplarlo asincrónicamente al modelo de Circulación General CPTEC/COLA para estudiar estados de equilibrio clima-vegetación en el nordeste de Brasil.

Los índices climáticos utilizados por el modelo para clasificar los biomas son: temperatura media mensual mínima (Tc), número de días con temperatura superior a 0 °C (G0), número de días con temperatura superior a 5 °C (G5), un índice de humedad (H) y un índice de estacionalidad de la humedad en el suelo (D). Para el cálculo de H y D utiliza un balance hídrico basado en Willmott (1985).

Para un conjunto dado de índices climáticos el CPTEC-PVM predice el Bioma en equilibrio con esas condiciones siguiendo un algoritmo de clasificación (*ver anexo a este capítulo*) basado en valores límite máximos y mínimos para dichos índices.

De manera general, sobre condiciones ambientales severas (bajos valores de G0, G5 o H) el modelo predice hielo y desiertos.

Cuando las condiciones se tornan un poco menos severas (valores mayores de G0, G5 y H pero Tc bajas) permite la existencia de biomas extremos como tundra, semidesierto y o "larch".

Conforme las temperaturas siguen aumentando aparecen biomas extratropicales. Cuando el índice hídrico es alto, bosque templado, mixto o de coníferas y cuando es bajo praderas.

A medida que las temperaturas mínimas aumentan aparecen los biomas tropicales. Al igual que en los biomas extratropicales, cuando el índice hídrico es alto aparecen los bosques tropicales y cuando es bajo ocurren en orden decreciente de índice hídrico las sabanas y la catinga.

La determinación de los valores límite de los biomas se basó en referencias de la literatura (Prentice et al., 1992) y en un proceso de optimización³⁶, comparando contra un mapa de vegetación global, para minimizar el error en la asignación de los biomas.

³⁵ En el "Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais"

³⁶ Los límites se ajustaron trabajando con una resolución de 2 grados, que es superior a la que se usa en este trabajo (0,5 grados). Adicionalmente, testearon la performance del modelo en distintas resoluciones, encontrando que los valores óptimos para los límites dependen de la resolución horizontal de trabajo (*comunicación personal, Oyama*).

Por ejemplo, para la elección del valor de H que separa los desiertos de otros biomas, se considera que el H será un límite superior para los desiertos e inferior para el resto de los biomas. El procedimiento consiste en elegir un valor de H que minimice el número de puntos de desierto arriba de ese valor o el número de puntos de los otros biomas debajo de ese valor. A partir de este procedimiento, se determina que el bioma que genera más error en este caso, es el semidesierto, por lo que se hace una segunda etapa de ajuste del valor H solo considerando estos dos biomas (desierto y semidesierto).

Para el caso del bioma bosque templado, fue necesario establecer un límite superior para el Tc restringiendo de esta manera la aparición de bosques templados en la pampa³⁷. El valor máximo elegido Tc = 6 para el bosque templado permite la aparición de praderas en la mayor parte de la región pampeana.

El modelo CPTEC-PVM ha sido utilizado en diversos trabajos.

Cook y Vizy (2006) acoplaron el CPTEC-PVM a un modelo climático regional para representar escenarios de clima y vegetación en el “Last Glacial Maximum”, aproximadamente 21 000 años atrás.

Cardoso *et al.* (2006) incorporaron al modelo un régimen de disturbios del fuego que logró mejorar la representación de las sabanas.

El CPTEC-PVM es capaz de representar correctamente la distribución de los grandes biomas a escala global (*Oyama y Nobre, 2004*) con una muy buena representación de los bosques tropicales y los desiertos; una buena representación de los bosques de coníferas, la sabanas, los semidesiertos y la tundra; una representación regular de los bosques templados, las praderas y la catinga; y una representación pobre del bosque mixto.

En la escala regional de Sudamérica, el modelo fue capaz de reproducir las praderas de la pampa a diferencia de la mayor parte de los modelos de vegetación que predicen la existencia de bosques en esta región (*Oyama y Nobre, 2004*).

El valor del estadístico kappa³⁸ para la simulación global y para América del Sur es de 0,58 indicando un acuerdo “bueno³⁹” entre el mapa de vegetación simulado y el real.

Otros modelos globales como BIOME (*Prentice et al., 1992*) y una versión simplificada del modelo de Holdridge (*Monserud y Leemans, 1992*) obtuvieron valores de kappa inferiores (0,49 y 0,43 respectivamente).

En este capítulo se describe la elaboración del CPTEC-PVM-CIMA, una versión simplificada del modelo CPTEC-PVM. Adicionalmente se compara el desempeño del

³⁷ La eco-región presenta un valor de H alto, por lo que sin esta limitante el modelo simula bosques.

³⁸ Es un indicador del acuerdo entre el mapa de vegetación simulado y el real. A mayor valor de kappa mejor acuerdo entre mapas.

³⁹ En base a la tabla cualitativa de Kappa descrita en Monserrud (1992).

balance hídrico utilizado en la versión simplificada con una base de datos global de parámetros del balance hídrico (*J. Willmott and Kenji Matsuura, 2001*).

Modelo CPTEC-PVM

Datos de entrada: precipitación y temperatura media mensual.

Salidas: Biomas (15 categorías)

Funcionamiento:

Para cada punto de grilla:

- 1) se corre el balance hídrico
- 2) se calculan índices climáticos y
- 3) se aplica el algoritmo de clasificación de biomas.

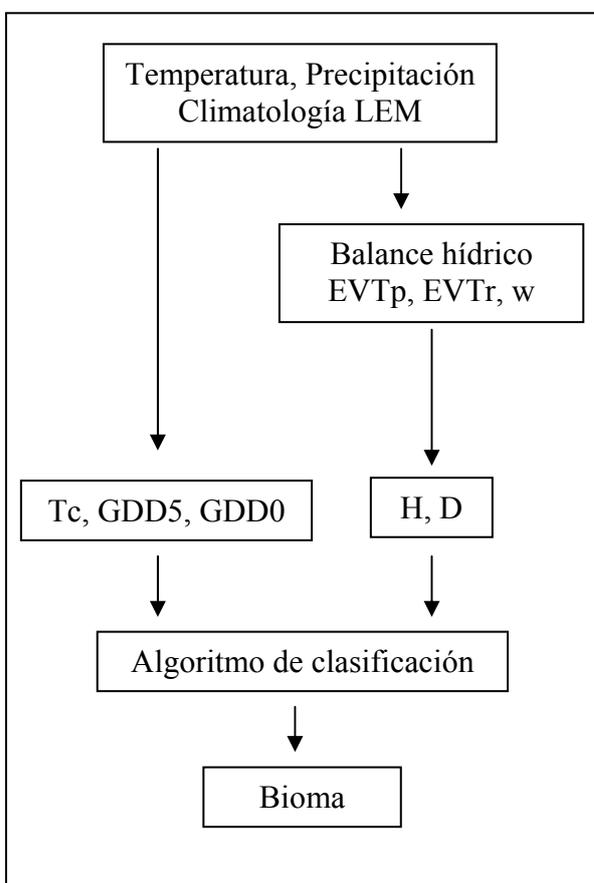


Figura 2.3.1: esquema general de funcionamiento del CPTEC-PVM

Indices climáticos

$$T_c = \min \{T_i\}, i=1...12$$

$$G0 = \sum_{i=1}^{12} n_i F(T_i-0)$$

$$G5 = \sum_{i=1}^{12} n_i F(T_i-5)$$

$$H = \sum_{i=1}^{12} g_i * E_i * (1 / \sum_{i=1}^{12} g_i * E_{max})$$

donde, E_i = evapotranspiración actual; E_{max} = Evapotranspiración máxima y g_i toma valor 0 si el suelo esta congelado y 1 si no lo esta.

$$D = (1 - \sum_{i=1}^{12} F(0.5 - W_i)) / 6$$

donde,

$$F(x) = x \text{ si } x \geq 0$$

$$F(x) = 0 \text{ si } x < 0$$

$$W_i = (\text{almacenaje de agua en el suelo} / \text{disponibilidad de agua en el suelo})$$

Materiales y métodos:

Se realizaron modificaciones sobre la versión original del CPTEC-PVM con el objeto de lograr una versión simplificada del modelo que siga representando apropiadamente la distribución de los grandes biomas en Argentina.

Las modificaciones realizadas obedecen a distintas causas, entre las cuales se destacan, la falta de información para aplicar algunas de las fórmulas del modelo original, la intrascendencia de ciertos procesos para la representación de los biomas en Argentina⁴⁰ y la necesidad de contar con un modelo simple que utilice la menor cantidad posible de parámetros de entrada.

El balance hídrico de la versión original del modelo es más complejo y tiene en cuenta entre otras, los procesos de almacenamiento y derretimiento de la nieve, la temperatura

⁴⁰ Muchos de los procesos incluidos en CPTEC-PVM surgen de la necesidad de usarlo globalmente. Por ejemplo, los procesos vinculados al congelamiento del suelo o la precipitación en forma de nieve en general, son importantes para definir el bioma presente, solo en latitudes altas del hemisferio norte.

del suelo, una función de escurrimiento y una formulación mas detallada de la evapotranspiración⁴¹.

El cálculo del balance hídrico, los índices climáticos y el algoritmo de clasificación de biomas de la versión simplificada del modelo CPTEC-PVM se implementó a través de rutinas FORTRAN en base a la descripción del modelo original en Oyama (2002) y las modificaciones indicadas en la tabla a continuación.

MODIFICACIONES REALIZADAS SOBRE LA VERSION ORIGINAL DEL MODELO CPTEC-PVM

<i>Modelo versión original CPTEC-PVM</i>	<i>Modelo versión simplificada CPTEC-PVM-CIMA</i>
Balance hídrico basado en Willmott (1985).	Balance hídrico de Thornthwaite (1948).
La precipitación mensual es distribuida uniformemente a lo largo del mes y el balance hídrico se corre diariamente.	El Balance hídrico se corre mensualmente.
Disponibilidad de agua en el suelo = 500 mm.	Disponibilidad de agua en el suelo = 100 mm.
Evapotranspiración actual (Ei) calculada por la ecuación de Penman-Monteith cuando los factores de estrés debidos al déficit de vapor de agua y al grado de saturación del agua en el suelo son considerados. La EVT potencial cuando solo se considera el factor de estrés debido al déficit de vapor de agua. La EVT máxima (Emax) cuando ninguno de los factores de estrés es considerado.	Evapotranspiración potencial (EVTp) calculada por la ecuación de Thornthwaite 1948. Evapotranspiración real (EVTr) calculada a partir del balance hídrico de Thornthwaite 1948.
Precipitación en forma de lluvia o nieve dependiendo de la temperatura mensual.	Solo considera precipitación en forma de lluvia.
Cuando la temperatura del suelo es menor a $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, la infiltración cesa y el agua en el suelo no esta disponible.	No considera la temperatura del suelo, el agua infiltra y esta disponible independientemente de la temperatura del suelo.
Calcula el índice hídrico H a partir de los valores mensuales de la Evapotranspiración actual (Ei), la máxima (Emax) y el gi.	Calcula el índice hídrico H a partir de los valores mensuales de la Evapotranspiración real (EVTr) y potencial (EVTp).

⁴¹ El uso de la evapotranspiración de Thornthwaite, se justifica porque en Argentina las temperaturas medias mensuales en general son inferiores a los $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. En esta franja de temperaturas, la formulación de evapotranspiración original del modelo CPTEC-PVM produce valores semejantes a los de la fórmula de Thornthwaite (*comunicación personal, Oyama*).

$H = \prod_{i=1}^{12} g_i * E_i * (1 / \prod_{i=1}^{12} g_i * E_{max})$	$H = EVTr * (1 / EVTp)$
---	-------------------------

Tablas 2.3.2: comparación entre la versión original y simplificada del CPTEC-PVM

Se comparó el desempeño del balance hídrico del CPTEC-PVM-CIMA con los valores de la base de datos: “Terrestrial Water Balance Data Archive: Regridged Monthly Climatologies (Version 1.02), 2001. J. Willmott and Kenji Matsuura, Center for Climatic Research Department of Geography University of Delaware”.

Resultados:

En la comparación visual, los mapas de déficit y exceso generados por el balance hídrico de Thornthwaite (LEM) y el de Willmott (WIL) resultan similares.

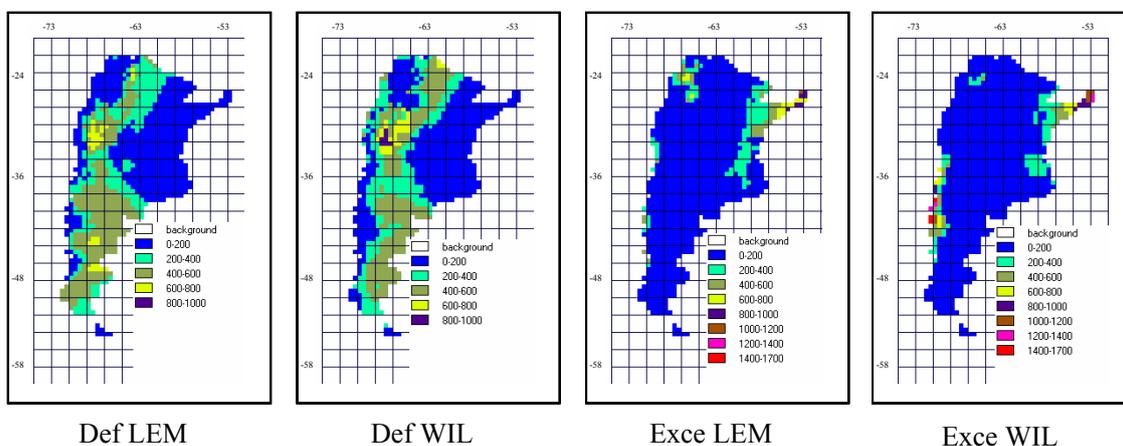


Figura 2.3.3: mapas de distribución de déficit y exceso anuales a partir de LEM y WIL.

Los promedios espaciales por eco-región indican diferencias mayores en el exceso y sobre todo en el chaco húmedo, monte de sierras y estepa patagónica que deberán ser analizados a futuro con mayor detalle.

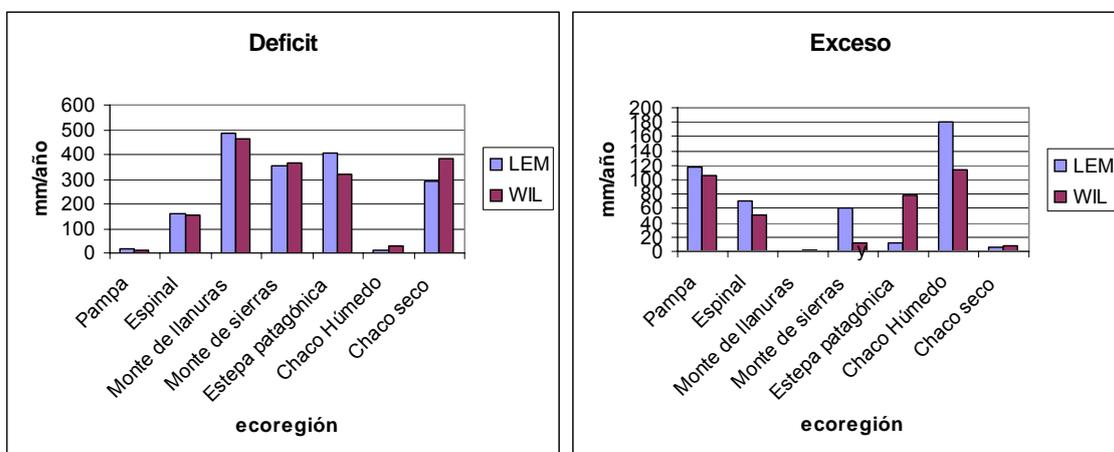


Tabla 2.3.4: comparación del promedio por eco-región del déficit y exceso anuales a partir de LEM y WIL.

En la comparación visual, los mapas de EVTr y EVTp de Thornthwaite (LEM) y Willmott (WIL) resultan similares.

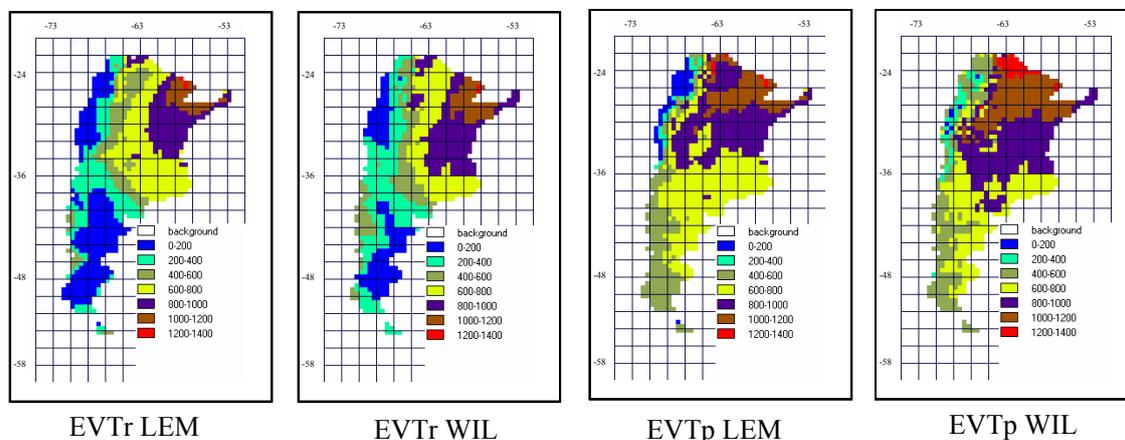


Figura 2.3.5: mapas de distribución de EVTr y EVTp anuales a partir de LEM y WIL.

Los promedios espaciales por eco-región también presentan valores similares.

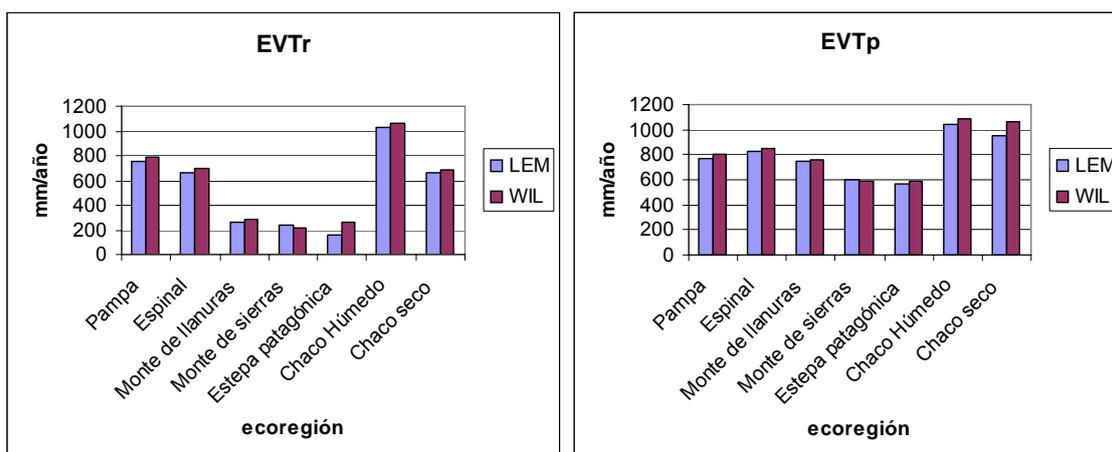


Tabla 2.3.6: comparación del promedio por eco-región de la EVTr y EVTp a partir de LEM y WIL.

Conclusiones y perspectivas a futuro:

La similitud encontrada en la EVTp, EVTr, déficit y exceso simulados por el CPTEC-PVM-CIMA y los valores correspondientes en la base de datos de Willmott sugiere un funcionamiento similar en los esquemas de balance hídrico del suelo.

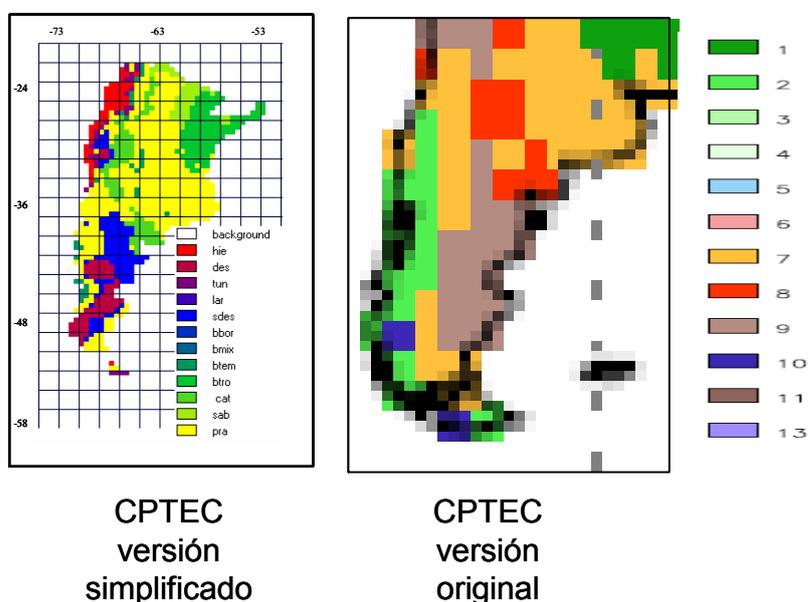
Considerando que la versión original del modelo también produjo resultados similares en la comparación con la misma base de datos (Oyama, 2002) podemos inferir que de manera general, las modificaciones implementadas no alterarían sensiblemente, los resultados del balance hídrico de la versión original del modelo.

De cualquier manera, para reafirmar este concepto debería:

realizarse una comparación directa con la salida del balance hídrico de la versión original del CPTEC-PVM.

comparar los valores de H y D, estimados por el CPTEC-PVM-CIMA y la versión original de modelo, ya que su cálculo depende directamente de los valores de EVT y humedad del suelo calculados por el balance hídrico. Para el cálculo de H, además de las diferencias que pudiera haber en los valores de salida del balance hídrico, hay que considerar las diferencias por aplicar una fórmula diferente a la propuesta en la versión original del modelo.

A pesar de las dos cuestiones planteadas previamente, la comparación visual entre el mapa de biomas generado por la versión simplificada (sin ajustes) y la original del CPTEC-PVM⁴², indica un grado de acuerdo razonable a partir del cual se podría inferir un funcionamiento similar entre ambas versiones del modelo.



1= Btro; 2=Btem; 3=Bmix; 4=Bbor; 5=Lar; 6=Sav; 7=Pra; 8=Cat; 9=Sdes; 10=Tun; 11=Des; 13=Hie.

Figura 2.3.7: mapas de distribución de biomas para la versión original y simplificada del CPTEC-PVM.

⁴² Mapa extraído de Oyama (2002), fig. 4.8, pag: 75

Anexo

ALGORITMO DE CLASIFICACION DEL MODELO CPTEC-PVM

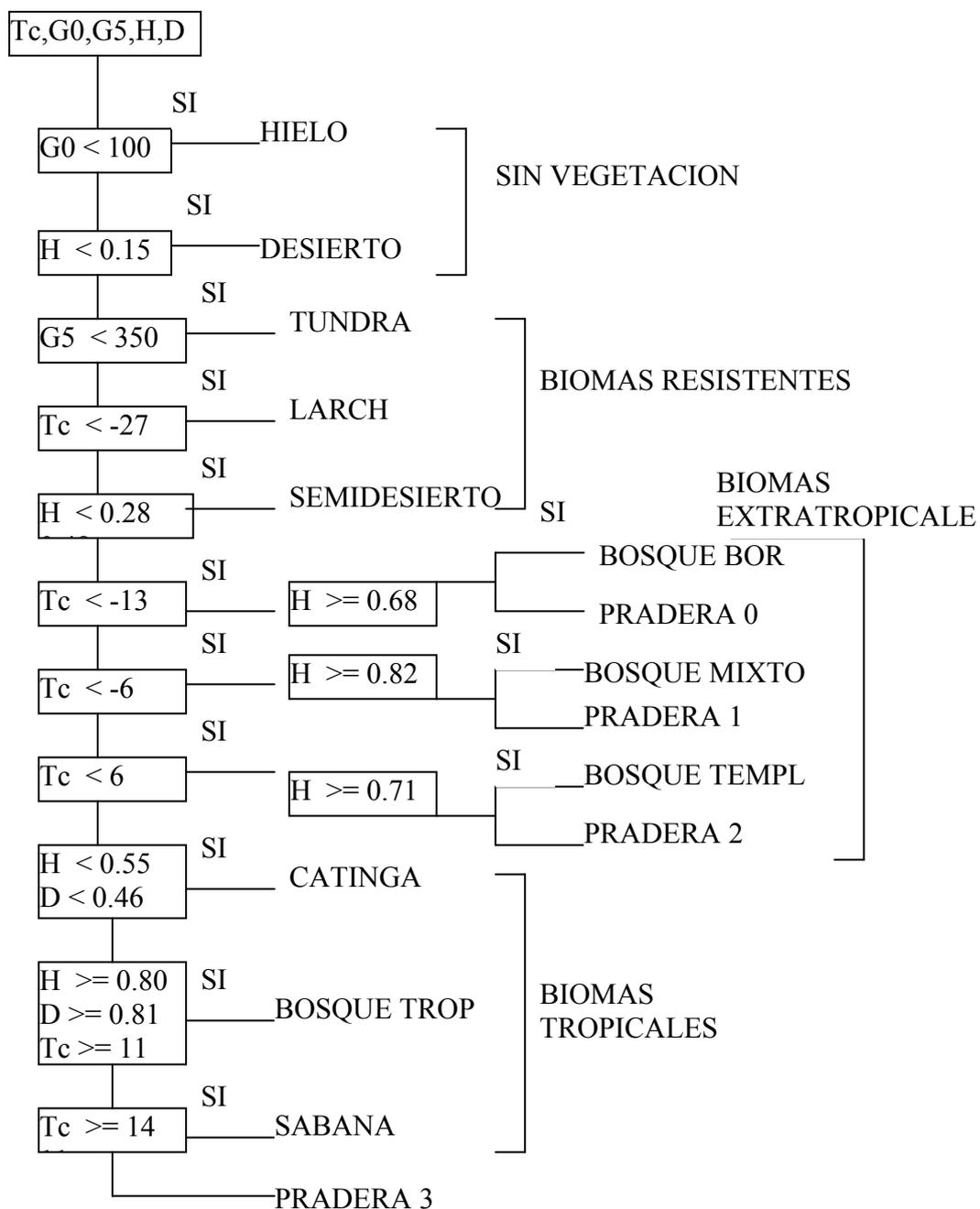


Figura 2.3.8: algoritmo de clasificación de biomas del CPTEC-PVM

2.4 BIOME4

Familia de modelos BIOME; funcionamiento de BIOME4; datos de entrada; índices climáticos; tipos funcionales de plantas presentes y dominantes; IAF y PPN óptima; rutina de competencia; firedays; greendays; valores límite de TFP; clasificación de biomas; sensibilidad de la PPN a cambios en temperatura, estrés hídrico, radiación (APAR) y dióxido de carbono en BIOME3.

Introducción:

BIOME4 es un modelo mixto (biogeográfico-biogeoquímico) estático de vegetación potencial en equilibrio.

Historia y desarrollo de la familia de modelos BIOME

El modelo BIOME fue desarrollado a principios de 1990 por I. Colin Prentice, Wolfgang Cramer, Sandy Harrison, Rik Leemans, Robert Monserud and Salomon (*Prentice et al, 1992*).

El modelo se construyó sobre la base teórica desarrollada por Box (1981) y Woodward (1987). Box definió un modelo que incorpora aproximadamente 100 tipos funcionales de plantas (TFPs) con tolerancias climáticas derivadas a partir de la precipitación, temperatura y radiación. También estableció una jerarquía de dominancia que permite a ciertos TFP dominar en ciertas condiciones climáticas. Box interpreta el concepto de bioma como entidades que emergen a partir de la interacción de TFPs y condiciones climáticas. Bajo este concepto los biomas pueden formarse, disolverse y reformarse en base a cambios en el clima.

BIOME es un modelo de equilibrio de vegetación potencial que simula la distribución de biomas a escala global. Utiliza solo algunos tipos funcionales de plantas y variables, una jerarquía de dominancias (como en el modelo de Box) y límites ambientales para cada TFP definidos en función de restricciones fisiológicas (como en el modelo de Woodward).

Las restricciones ambientales son asignadas en base a datos fisiológicos actuales, siempre que sea posible. En los casos en que los datos fisiológicos no están disponibles, límites empíricos son definidos a partir de la base de datos de Olson et al. (1983).

Las variables que maneja el modelo son: la temperatura mínima absoluta, GDD5, GDD0, temperatura del mes más calido y coeficiente de Priestley-Taylor (EVTreal/EVTpot).

La jerarquía de dominancia es una construcción artificial utilizada para determinar que TFP será más abundante en cada lugar bajo las condiciones ambientales vigentes.

La jerarquía de dominancias se aplica una vez que las restricciones ambientales han determinado el TFP puede establecerse en cada punto de grilla.

Para testear la calidad de la simulación realizada por BIOME, se utilizó la base de datos de vegetación del “Oak Ridge National Laboratory” Olson et al. (1983).

Eventualmente BIOME fue actualizado y mejorado primero en el modelo BIOME2 y luego en el BIOME3 (Haxeltine & Prentice, 1996). Este modelo a diferencia de su predecesor incorpora procesos biogeoquímicos.

BIOME3 incluye flujos de carbono y agua para cada TFP. La competencia entre los TFPs es simulada utilizando la productividad primaria neta (PPN) como índice de competición.

A través del cálculo del índice de área foliar (LAI) y la PPN, BIOME3 es capaz de simular los efectos del cambio en la concentración de CO₂ atmosférico sobre la fisiología de las plantas.

Después de determinar que TFPs pueden estar presentes en un lugar utiliza el modelo acoplado de flujos de carbono y agua y un algoritmo de optimización para determinar el máximo IAF y PPN para cada TFP en ese punto de grilla.

Después de que se estimó el IAF y PPN óptimos para cada TFP potencialmente presente en el lugar, se seleccionan los TFPs dominantes leñoso y herbáceo a través de elegir los que tienen la máxima PPN. Después se designa el TFP con la más alta PPN como el dominante en ese lugar.

La salida de BIOME3 incluye el TFP dominante y secundario (el segundo mayor) en cada punto de grilla así como el IAF (m²/m²) y PPN (gC/m²) para el ecosistema en ese lugar. Con esta información se ensamblan los biomas.

BIOME3 no modela mecanísticamente la dinámica del fuego y la competencia por la luz, pero lo hace empíricamente a través de la exclusión de herbáceas si el promedio anual de la humedad del suelo es mayor a 75% o si la precipitación anual es mayor a 220 mm.

BIOME3 no modela el ciclo de nitrógeno y consecuentemente la PPN y el IAF no están restringidos por esta variable.

La evolución de BIOME3 a BIOME4 (Kaplan et al., 2003) no es tan importante como la que hubo de BIOME a BIOME3.

Como diferencia principal BIOME4 agrega un módulo para calcular el fraccionamiento isotópico de carbono durante la fotosíntesis y tiene un conjunto de TFPs actualizados (recalibrados y expandido).

El modelo más reciente de la familia BIOME es un modelo dinámico de vegetación global denominado LPJ “Lund-Potsdam-Jena Model”.

Contrariamente a sus predecesores LPJ incluye una representación explícita de la estructura de la vegetación, dinámica (establecimiento y mortalidad) y competencia entre distintas poblaciones de TFPs.

Antecedentes BIOME4

BIOME4 ha sido utilizado en numerosos estudios de modelización de distintas características de la vegetación.

Kaplan *et al.* (2002) lo usaron para determinar la humedad del suelo, PPN y producción potencial de CH₄ en humedales durante el “Last Glacial Maximum (LGM)”.

Vavrus and Harrison (2003) examinaron los efectos del cambio en la circulación atmosférica, inducidos por la dinámica del hielo marino, en la distribución de la vegetación en el ártico.

Engelstaeder *et al.* (2003) utilizaron BIOME4 para estudiar el efecto de la cobertura de la vegetación en la frecuencia de tormentas de polvo.

Diffenbaugh *et al.* (2003) acoplaron BIOME4 al modelo regional REGCM2 para evaluar el efecto del incremento en la concentración de CO₂ en la interacción superficie-atmósfera en zonas costeras.

Zajac (2004), estudio las respuestas a cambios en la concentración atmosférica de dióxido de carbono, de la distribución de biomas, índice de área foliar, productividad primaria neta y escorrentía simuladas por BIOME4.

Harrison *et al.* (2003) utilizaron BIOME4 para investigar los cambios en la distribución de biomas cuando el CO₂ varía desde 180 -1300 ppm.

Ravindranath *et al.* (2006) utilizaron BIOME4 para analizar el impacto del cambio climático sobre los bosques en la India.

Modelo BIOME4

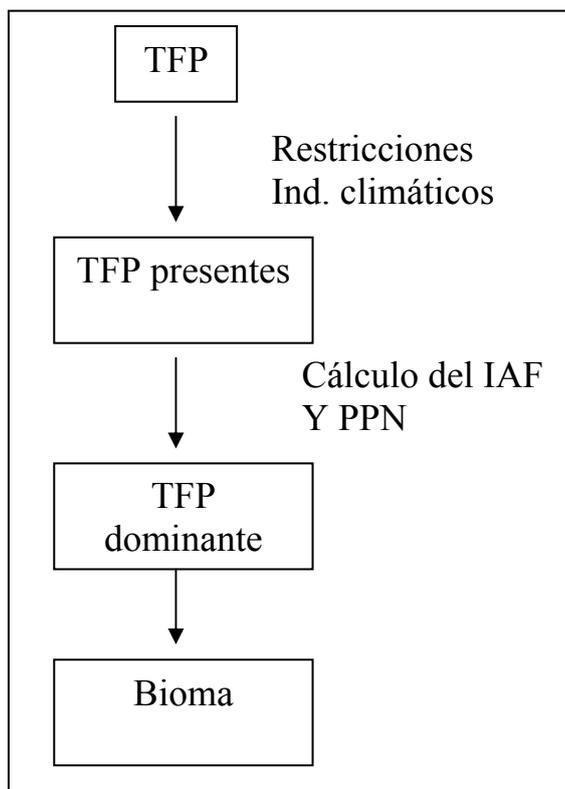
Datos de entrada: Temperatura media mensual, precipitación media mensual, porcentaje de horas de luz y temperatura mínima absoluta anual. Además requiere conductividad hidráulica y agua disponible en el suelo (estimadas a partir de la textura del suelo) para las capas de 0-30 cm y 30-170 cm.

Tipos de Salidas: el modelo tiene una variedad de salidas, entre otras, parámetros del balance hídrico, TFPs dominantes y subdominantes, IAF, PPN y biomas.

Versión del modelo: biome4.f - 4.2b1 – (22.10.99)

Funcionamiento general del modelo:

- 1- **Determinación de TFP presentes:** comienza seleccionando de un set global de Tipos Funcionales de Plantas (TFP) las que podrían estar potencialmente presentes en una celda de grilla sobre la base de restricciones ecofisiológicas (derivadas fundamentalmente de la temperatura).
- 2- **Estimación del IAF y PPN óptimo:** usando un modelo de flujos de carbono y agua, y un algoritmo de optimización, calcula el máximo IAF y PPN sostenible para cada TFP entre los que fueron seleccionados como posibles para estar en el sitio en la etapa previa.
- 3- **Selección del TFP dominante y subdominante:** La competencia entre los distintos TFPs presentes es simulada usando la PPN óptima para cada TFP como un índice de competitividad. En general, el TFP que presenta la máxima PPN es seleccionado como dominante en el lugar, aunque a veces otros factores como los disturbios naturales (simulados en el modelo a través de una rutina del fuego) pueden alterar la dominancia.
- 4- **Determinación del Bioma en base al TFP y parámetros ambientales:** BIOME4 determina el bioma presente en la celda de grilla, en función de los TFPs que se establecieron, los TFP dominantes y subdominantes y de otros parámetros climáticos y ecológicas estimados por el modelo (como los GDD5, los “greendays”, “woodynpp”, etc.).



Funcionamiento detallado del modelo:

Determinación de TFP presentes:

BIOME4 estima a partir de los datos de entrada de temperatura media mensual los siguientes índices climáticos:

- temperatura del mes mas frío
- temperatura del mes mas cálido
- temperatura mínima absoluta anual
- días grado superiores a 0 °C
- días grado superiores a 5 °C
- profundidad de la nieve

En función de los índices climáticos estimados para cada celda de grilla, BIOME4 determina los tipos funcionales de plantas (TFPs) que pueden estar presentes. Cada TFP está sujeto a distintas restricciones que le permiten desarrollarse solo en los lugares donde las condiciones climáticas les son apropiadas (*ver tabla 2.4.6*).

¿Como determina el modelo cual es el TFP presente?

Si el índice climático estimado para el sitio se encuentra dentro de su rango climático tolerable, el TFP se encuentra presente en el sitio. Por ejemplo: el TFP 3 (*en la tercera columna de la tabla 2.4.6*) se encuentra en un dada celda solo si la temperatura mínima del mes mas frío esta entre -8.0 °C (*fila 3 de la tabla 2.4.6*) y 5 °C (*fila 4 de la tabla 2.4.6*). Si, por ejemplo, el índice climático de temperatura mínima del mes mas frío en la celda es igual a 0 °C, el TFP 3 puede estar presente en ese lugar, siempre y cuando, el resto de los índices climáticos (ej. GDD5, GDD0, etc.) también estén dentro de su rango de tolerancia.

Para algunos TFPs existen rangos no definidos (*ND en tabla 2.4.6*). En estos casos, se considera que no existe una correlación entre ese índice climático y la distribución del TFP. Por ejemplo, la presencia en una celda dada del TFP 1 (*columna 1 de la tabla 2.4.6*) que no tiene definido un rango para temperatura del mes más frío (*filas 1 y 2 de la tabla 2.4.6*), será independiente del valor de este índice climático.

Al finalizar esta etapa existen tres resultados posibles sobre una celda determinada:

no está presente ningún TFP, consecuentemente el BIOMA=0

está presente un único TFP. En base a las reglas para clasificar biomas se asigna el bioma correspondiente.

están presentes más de un TFP. La rutina de competencia determina cual es el dominante.

Selección del TFP dominante y subdominante

En la rutina de competencia el TFP leñoso que logra la máxima PPN, es generalmente considerado el dominante excepto en los casos en que las herbáceas o una mezcla de

herbáceas y árboles son dominantes, debido a restricciones vinculadas a la humedad del suelo o el régimen de fuegos.

En ambientes húmedos, los árboles tienden a formar doseles cerrados que excluyen a las herbáceas a través de la competencia por la luz. Además, la frecuencia de fuegos tiende a ser menor⁴³. A través de estos dos mecanismos, los ambientes húmedos tienden a favorecer el establecimiento de leñosas y a excluir a las herbáceas.

El fuego y la competencia por la luz no son tratados mecanísticamente en BIOME4. En lugar de eso, los efectos son modelados empíricamente excluyendo las herbáceas si el promedio anual porcentual⁴⁴ de la disponibilidad de agua en el suelo para la leñosa dominante en la celda es superior a 75% o si la precipitación anual supera los 2200 mm.

Al finalizar la rutina de competencia existen dos resultados posibles:

esta presente un único TFP dominante en el lugar

están presentes un TFP dominante y alguno otro sub-dominante (esto podría pasar por ejemplo, en el caso de las sabanas donde los árboles son dominantes y las herbáceas sub- dominantes).

Los flujos biogeoquímicos calculados por el modelo, generalmente corresponden al TFP dominante para cada celda de la grilla. De cualquier manera, en el caso de sabanas tropicales y otras comunidades mixtas de herbáceas y árboles, algunas variables como la PPN se les asigna un promedio ponderado entre la PPN de las herbáceas y los árboles.

Determinación del Bioma en base al TFP y parámetros ambientales

El modelo determina el bioma (27 en total) presente en un dado sitio considerando (*ver tabla 2.4.8*):

la presencia de determinados tipos funcionales de plantas, dominantes y/o subdominantes

en combinación con otras características,

climáticas (temperatura mínima absoluta anual en el lugar, GDD5, GDD0, etc.)

ecológicas (greendays, PPN, IAF, etc.)

Por ejemplo, el bioma "warm mixed forest" (*ver tabla 2.4.8*) esta presente en una celda dada cuando el TFP dominante es el "temperate deciduous tree" y además se cumple que los $gdd5 > 3000$ y la temperatura media del mes mas frío > 3 °C.

⁴³ Los fuegos frecuentes tienden a favorecer la dominancia de las herbáceas sobre las leñosas.

⁴⁴ En el Punto de Marchitez Permanente es 0% y en Capacidad de Campo es 100%.

Estimación del Índice de Área Foliar y la Productividad Primaria Neta óptima.

La estimación del área foliar en una celda dada, comprende un proceso de optimización entre los beneficios de incrementar el área foliar, en términos de lograr una mayor captación de luz, y los costos que el aumento de la superficie de transpiración pueden tener sobre el balance hídrico de la planta.

Haxeltine *et al.* (1996) sugirieron que los beneficios y costos se pueden expresar a través de la PPN y que la optimización descrita arriba es conceptualmente equivalente a maximizar la PPN con respecto al área foliar.

Adicionalmente, la PPN obtenida para un cierto valor de área foliar debe también ser suficiente para satisfacer requerimientos mínimos de asignación de biomasa a las distintas estructuras de la planta. Esta restricción adicional, es importante en ambientes donde la PPN y el área foliar están limitados por otros factores distintos de la disponibilidad de agua.

Sobre la base de esta lógica, el modelo calcula la PPN y el área foliar óptima para cada TFP que puede estar potencialmente presente en la celda. Esto se logra calculando la PPN a lo largo de un rango de áreas foliares. El área foliar que da la mayor PPN y además satisface las condiciones de asignación de biomasa, se selecciona como el área foliar óptima para ese TFP en esa celda.

Los valores simulados de la PPN capturan los efectos de la competencia por el agua y las diferencias en fisiología de las plantas C3 y C4, pero no la competencia por la luz o el régimen de disturbios del fuego.

Procesos representados por el modelo para la estimación de la PPN

Fotosíntesis bruta: se estima como una función de: la radiación⁴⁵; temperatura; concentración atmosférica de CO₂; longitud del día y conductancia del canopeo.

El esquema fotosintético se basa en la versión simplificada del modelo de Farquhar realizada por Collatz *et al.* (1991). Se utilizó un algoritmo de optimización para predecir, para cada mes, el valor de la capacidad de la Rubisco (en la ausencia de estrés hídrico) que da la máxima tasa neta fotosintética diaria. El algoritmo se basa en la hipótesis que el contenido de nitrógeno y la actividad de la Rubisco en las hojas varía estacionalmente y con la posición del canopeo de manera tal de maximizar la fotosíntesis neta (Haxeltine and Prentice, 1996). El proceso de optimización depende del hecho que tanto la tasa máxima de fotosíntesis bruta así como la tasa de respiración de la hoja se incrementan con la actividad de las enzimas fotosintéticas (entre otras, la Rubisco) en los cloroplastos.

Fotosíntesis C3 y C4: considera TFP que siguen caminos metabólicos C3 o C4.

⁴⁵ APAR (Absorbed photosynthetically active radiation)

Fotosíntesis neta: para estimarla se considera la fotosíntesis bruta y la respiración de la hoja.

Conductancia del canopy: La conductancia del canopy se calcula como una función de la tasa potencial fotosintética y el estrés hídrico. Este último reduce la fotosíntesis a través de una reducción en la conductancia del canopy.

Fenología: los TFP se clasifican en: perenne (“evergreen”), caducifolia por temperatura (“summergreen”) y caducifolia por lluvias (“raingreen”). Para los primeros se asume un área foliar constante a lo largo de todo el año. Para los otros dos tipos fenológicos el área foliar desarrollada depende de la temperatura y la humedad del suelo respectivamente.

Evapotranspiración actual: La evapotranspiración actual (AET) es calculada diariamente como el mínimo de una función de provisión (humedad del suelo) y una tasa de evapotranspiración⁴⁶.

Hidrología del suelo: El suelo es representado en dos capas de 0 a 30 cm y de 30 a 170 cm. El contenido de humedad del suelo es actualizada todos los días en función de los procesos de precipitación, percolación, derretimiento de la nieve y la tasa de evapotranspiración.

Respiración de la planta: Los costos de respiración de la planta se calculan a partir de los costos de respiración de las hojas, costos de mantenimiento de tejidos, costos de respiración de raíces finas y costos de respiración asociados al crecimiento.

Los distintos TFPs que considera el modelo responden de manera diferente a cada uno de estos procesos mencionados previamente en función de ciertos parámetros específicos para cada uno de ellos (*ver tabla 2.4.7*).

Sensibilidad de la PPN a cambios en la temperatura, precipitación, radiación y dióxido de carbono en el modelo BIOME3

Adams *et al.* (2004) compararon los esquemas para representar la PPN y su sensibilidad a cambios en la 1) temperatura 2) dióxido de carbono 3) stress hídrico 4) radiación de distintos modelos de vegetación, incluyendo BIOME3⁴⁷.

PPN y temperatura

El modelo muestra una respuesta parabólica entre 0 y 40 °C. Por debajo de 0 °C presenta PPN negativo que se vuelve cero cuando la temperatura continua decreciendo. El máximo esta en aproximadamente 20 °C. Arriba de 40 °C predice PPN negativa.

⁴⁶ Usando una parametrización simple de la capa límite adaptada de Monteith (1995).

⁴⁷ Si bien BIOME4 presenta ciertas modificaciones con respecto a BIOME3, las curvas de respuesta deberían ser similares.

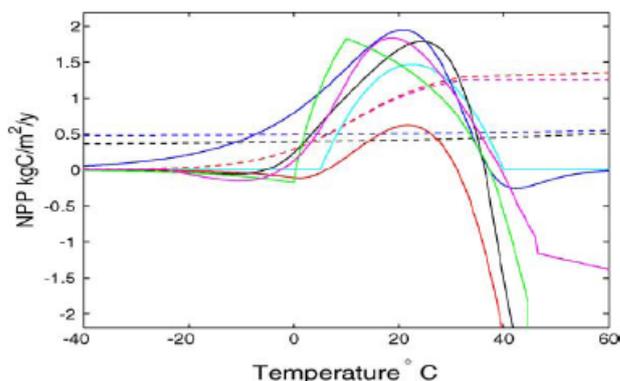


Fig. 6. Temperature response of net primary productivity when other variables are held constant at: $C_a = 350$ ppmv, $W = 1$, $I = 120$ W/m²: (dashed magenta line) Miami, (dashed red line) King et al. (1997), (dashed blue line) Polglase and Wang #1, (dashed black line) King et al. (1995) #1, (cyan line) Svirezhev and von Bloh, (red line) Lenton, (blue line) simple TRIFFID, (black line) TRIFFID, (green line) DEMETER, (magenta line) BIOME3.

Figura 2.4.1: respuesta de la PPN a la temperatura para el modelo BIOME3

PPN y dióxido de carbono

La PPN presenta una respuesta de incremento, aunque saturante, al aumento en la concentración de CO₂ atmosférico.

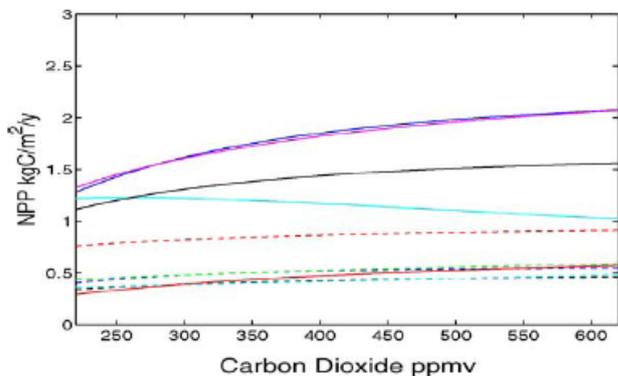


Fig. 7. Response of net primary productivity to atmospheric carbon dioxide levels when other variables are held constant at: $T = 15$ °C, $W = 1$, $I = 120$ W/m²: (dashed red line) King et al., 1997, (dashed blue line) Polglase and Wang #1, (dashed green line) Polglase and Wang #2, (dashed black line) King et al., 1995 #1, (dashed cyan line) King et al., 1995 #2, (cyan line) Svirezhev and von Bloh, (red line) Lenton, (blue line) simple TRIFFID, (black line) TRIFFID, (magenta line) BIOME3.

Figura 2.4.2: respuesta de la PPN a la concentración de CO₂ para el modelo BIOME3

PPN y estrés hídrico

BIOME3 muestra una respuesta saturante con respecto al contenido de humedad del suelo.

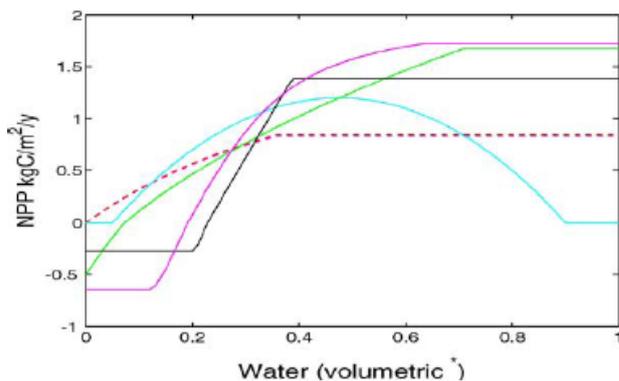


Fig. 8. Response of net primary productivity to water stress when other variables are held constant at: $T = 15^{\circ}\text{C}$, $C_a = 350\text{ppmv}$, $I = 120\text{W/m}^2$: (dashed magenta line) Miami/King et al., 1997, (cyan line) Svirezhev and von Bloh, (green line) DEMETER, (black line) TRIFFID, (magenta line) BIOME3.

Figura 2.4.3: respuesta de la PPN al estrés hídrico para el modelo BIOME3

PPN y APAR (Radiación)

La PPN incrementa casi linealmente con la PAR hasta saturación en aprox. 180W/m^2 .

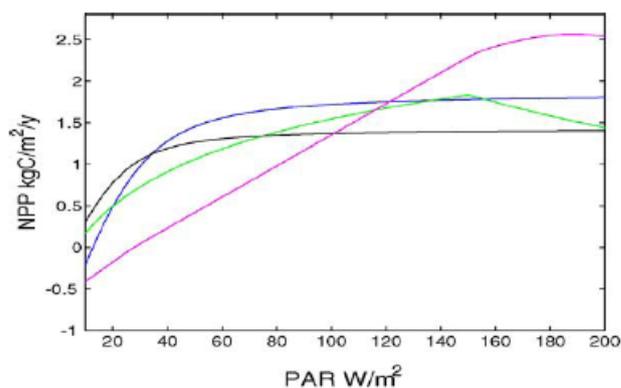


Fig. 9. Response of net primary productivity to photosynthetically active radiation levels when other variables are held constant at: $T = 15^{\circ}\text{C}$, $C_a = 350\text{ppmv}$, $W = 1$: (blue line) simple TRIFFID, (green line) DEMETER, (black line) TRIFFID, (magenta line) BIOME3.

Figura 2.4.4: respuesta de la PPN a la radiación para el modelo BIOME3

Anexo tablas:

VALORES LIMITE PARA EL ESTABLECIMIENTO DE TFPs													
NUMERO DE IDENTIFICACION DE TIPO FUNCIONAL DE PLANTA (PFT)*													
	TET	TDDT	TBET	TDI	CCT	BET	BDT	TEM G	TRO G	WD	TUN	HER	LICH
l-tcm				-15	-2	-32.5							
u-tcm						-2	5						
l-min	0	0	-8						-3	-45			
u-min			5	-8	10		-10	0					
l-gdd5			1200	1200	900			550		500			
u-gdd5													
l-gdd0											50	50	
u-gdd0													
l-twm	10	10	10		10				10	10			
u-twm						21	21				15	15	15
l-snow											15		
u-snow													

Límite superiores (u=upper) y inferiores (l= lower): l-tcm and u-tcm= temperatura media del mes más frío;l-min and u-min= temperatura mínima absoluta mensual; l-gdd5 and u-gdd5= días grado de crecimiento superiores a 5 deg C;l-gdd0 and u-gdd0= días grado de crecimiento superiores a 0 deg C ;l-twm and u-twm=temperatura del mes más cálido;l-snow and u-snow= profundidad de la capa de nieve.

(**TET**) TROPICAL EVERGREEN TREES; (**TDDT**)TROPICAL DROUGHT-DECIDUOUS TRESS (RAINGREENS); (**TBET**) TEMPERATE BROADLEAVED EVERGREEN TREES; (**TDI**) TEMPERATE DECIDUOUS TREES; (**CCT**) COOL CONIFER TREES; (**BET**) BOREAL EVERGREEN TREES; (**BDT**) BOREAL DECIDUOUS TREES; (**TEMG**) C3/C4 TEMPERATE GRASS PLANT TYPE; (**TROG**) C4 TROPICAL GRASS PLANT TYPE; (**WD**)C3/C4 WOODY DESERT PLANT TYPE; (**TUN**) TUNDRA SHRUB TYPE; (**HERB**) COLD HERBACEOUS TYPE; (**LICH**) LICHEN/FORB TYPE.

Tabla 2.4.5: valores límite para el establecimiento de TFPs en BIOME4.

Tabla 2.4.6: parámetros de TFPs en BIOME4

Atributo	TET	TDD T	TBE T	TDT	CCT	BET	BDT	TEM G	TRO G	WD	TUN	HER	LICH
Fenología	eg	rg	eg	sg	eg	eg	sg	rg	rg	eg	eg	sg	eg
Gmin (mm/seg)	0.5	0.5	0.2	0.8	0.2	0.5	0.8	0.8	0.8	0.1	0.8	0.8	0.8
Emax (mm/dia)	10.0	10.0	4.8	10.0	4.8	4.5	10.0	6.5	8.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Sl leafout (%)		0.6						0.3	0.3				
Sl leafdrop (%)		0.5						0.2	0.2				
R30 (%)	0.69	0.70	0.67	0.65	0.52	0.83	0.83	0.83	0.57	0.53	0.93	0.93	0.93
Lm (meses)	18	9	18	7	30	24	24	8	10	12	8	8	8
GDD5				200			200						
GDD0								100				25	
Rs	si	si	si	si	si	si	si	no	no	si	si	no	si
C4	no	no	no	no	no	no	no	si	si	si	no	no	no
Optratio	0,95	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,65	0,65	0,7	0,9	0,75	0,8
Kk	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	0,3	0,6
TpC3 (°C)	10	10	5	4	3	0	0	4,5	10	5	-7	-7	-12
TpC4 (°C)								10	10	10			
Tcurve	1	1	1	1	0,9	0,8	0,8	1	1	1	0,6	0,6	0,5
Rfact	0,8	0,8	1,4	1,6	0,8	4	4	1,6	0,8	1,4	4	4	4
Alloc	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1	1	1	1	1	1,5
Fire (%)	25	20	40	33	40	33	33	40	40	33	33	33	33

(**TET**) TROPICAL EVERGREEN TREES; (**TDDT**) TROPICAL DROUGHT-DECIDUOUS TREES (RAINGREENS); (**TBE**) TEMPERATE BROADLEAVED EVERGREEN TREES; (**TDT**) TEMPERATE DECIDUOUS TREES; (**CCT**) COOL CONIFER TREES; (**BET**) BOREAL EVERGREEN TREES; (**BDT**) BOREAL DECIDUOUS TREES; (**TEMG**) C3/C4 TEMPERATE GRASS PLANT TYPE; (**TROG**) C4 TROPICAL GRASS PLANT TYPE; (**WD**) C3/C4 WOODY DESERT PLANT TYPE; (**TUN**) TUNDRA SHRUB TYPE; (**HERB**) COLD HERBACEOUS TYPE; (**LICH**) LICHEN/FORB TYPE.

Explicación de la tabla:

Fenología: evergreen (eg); summergreen (sg); raingreen (rg)

Gmin (mm/seg) = conductancia del canopeo mínima

Emax (mm/dia) = tasa de transpiración diaria máxima

Sl leafout and leafdrop (%) = umbral de humedad del suelo para leaf-out (raingreen leaves appear) and leaf-drop of the raingreen phenology expresadas como porcentaje de la capacidad de campo.

R30 (%) = Proporción de las raíces de las plantas en la capa superior del suelo (30 cm)

Lm (meses) = longevidad de la hoja esperada

GDD5 = numero de gdd5 to grow a full canopy

GDD0 = numero de gdd0 to grow a full canopy

Rs = presencia de sapwood respiration

C4 = Presencia de pathway fotosintético C4

Optratio = la tasa maxima posible ci/ca

kk = Beer's law extinction coefficient

TpC3 y TpC4 (°C): temperatura mínima mensual para fotosíntesis C3 o C4

Tcurve: respuesta relativa de la fotosíntesis a la temperatura

Rfact: respuesta relativa de la respiración de mantenimiento a la temperatura

Alloc: asignación mínima relativa

Fire (%): porcentaje de la humedad del suelo en función de la CC para lo cual se asigna un día de fuego.

Tabla 2.4.7: clasificación de biomas en BIOME4	
TIPO DE BIOMA	REQUISITOS
27)BARREN	OPTPFT=6 Y GDD5>900 Y TCM>-19 Y PRESENT(4)
26)CUSHION FORB LICHEN MOSS TUNDRA	OPTPFT=13
25)PROSTRATE SHRUB TUNDRA	OPTPFT=11 Y GDD0<200
24)DWARF SHRUB TUNDRA	OPTPFT=11 Y 200<GDD0<500
23)SHRUB TUNDRA	OPTPFT=11 Y GDD0>500
22)STEPPE TUNDRA	A-OPTPFT=12 B-OPTPFT=8 Y GDD0<800
21)DESERT	A-OPTPFT=10 Y GRASSLAI<=1 B-OPTNPP<=100 Y OPTPFT<=5 o=9 o=10 C- OPTNPP<=100 Y OPTPFT= 8 Y SUBPFT NO ES 6 o 7
20)TEMPERATE GRASSLAND	OPTPFT=8 Y GDD0>800
19)TROPICAL GRASSLAND	OPTPFT=9
18)BOREAL PARKLAND	OPTPFT=14 ???? Y WOODPFT=7 o 6
17)OPEN CONIFER WOODLAND	OPTPFT=14 ???? Y WOODPFT=5
16)TEMPERATE BROADLEAVED SAVANNA	OPTPFT=14 Y WOODPFT=4
15)TEMPERATE SCLEROPHYLL WOOLAND	OPTPFT=14 ???? Y WOODPFT=3
14)TEMPERATE XEROPHYTIC SHRUBLAND	OPTPFT=10 Y GRASSLAI>1 Y TMIN<0
13)TROPICAL XEROPHYTIC SHRUBLAND	A-OPTPFT=10 Y GRASSLAI>1 Y TMIN>=0 B-OPTPFT=14 ???? Y WOODPFT<=2 Y WOODLAI<=4
12)TROPICAL SAVANNA	OPTPFT=14 ???? Y WOODPFT<=2 Y WOOLAI>4
11)DECIDUOUS TAIGA/MONTANE FOREST	OPTPFT=7 Y GDD5<=900 Y TCM<=-19
10)EVERGREEN TAIGA/MONTANE FOREST	OPTPFT=6 Y GDD5<=900 Y TCM<=-19
9)COLD MIXED FOREST	A-OPTPFT=6 Y GDD5<=900 Y TCM<=-19 Y PRESENT(4) B-OPTPFT=7 Y SUBPFT=5 (o 6?????) C-OPTPFT=7 Y GDD5>900 Y TCM>-19 D-OPTPFT=4 Y PRESENT(6) Y TCM<=15 E-OPTPFT=5 Y SBPFT=7
8)COOL CONIFER FOREST	OPTPFT=6 Y GDD5>900 Y TCM>-19
7)COOL MIXED FOREST	OPTPFT=4 Y PRESENT(6) Y TCM>-15
6)WARM MIXED FOREST	A-OPTPFT=3 B-OPTPFT=4 Y >PRESENT(3) O (5) Y GDD5>3000 Y TCM>3 (!TMIN=-21) C-OPTPFT=5 Y PRESENT(3)
5)TEMPERATE CONIFER FOREST	A-OPTPFT=5 Y (SUBPFT=4 Y NPPDIF<50) B-OPTPFT=5
4)TEMPERATE DECIDUOUS FOREST	A-OPTPFT=7 Y SUBPFT=4 B-OPTPFT=4 Y >GDD5<=3000 Y TCM<=3
3)TROPICAL DECIDUOUS FOREST	OPTPFT=2 Y GREEDAYS <=250
2)TROPICAL SEMI-DECIDUOUS FOREST	OPTPFT=2 Y GREENDAYS>250
1)TROPICAL EVERGREEN FOREST	A-OPTPFT=1 B-OPTPFT=2 Y GREENDAYS>300

2.5 CORRIDAS CONTROL Y VALIDACION DE LOS MODELOS

Salidas de los modelos CPTEC-PVM-CIMA y BIOME4; comparación con el mapa de eco-regiones de Parques; matriz de confusión; porcentaje de acuerdo; estadístico kappa; compatibilización de sistemas de clasificación de biomas; biomas generales; bosque-sabana; sin vegetación - bioma resistente; pradera.

Introducción:

En este capítulo se analizó la representación de la distribución de la vegetación⁴⁸ simulada por los modelos CPTEC-PVM-CIMA y BIOME4 alimentados con la climatología de LEM (corridos control).

Las salidas de los modelos se compararon con el mapa de eco-regiones elaborado por Parques Nacionales (2001).

El mapa de regiones naturales o eco-regiones⁴⁹ de Parques fue elaborado en base a elementos de juicio múltiples: unidades de paisaje, geomorfología, hidrología, suelos, vegetación y el clima.

La comparación entre los mapas simulados y el mapa real de distribución de la vegetación, se basó en primera instancia en un análisis visual, que posteriormente se complementó con un análisis estadístico utilizando matrices de confusión, el porcentaje de acuerdo y el estadístico *kappa*.

Matriz de confusión:

La matriz de confusión⁵⁰ tiene como propósito estimar el número de puntos correctamente cartografiados dentro de un conjunto de datos.

En nuestro caso, la matriz es construida a partir de la presencia de tipos de vegetación estimados por el modelo (en las columnas) y la presencia real de vegetación correspondiente al mapa de eco-regiones (en las filas).

En este trabajo, se utilizan matrices de confusión para comparar la distribución de la vegetación simulada por los modelos en las corridas control:

con la vegetación real del mapa de Parques Nacionales (*en este capítulo*)

⁴⁸ Como se mencionó en la introducción, a lo largo de este trabajo se utilizan indistintamente los términos “vegetación” y “bioma”.

⁴⁹ Territorio geográficamente definido en el que dominan determinadas condiciones geomorfológicas y climáticas relativamente uniformes y recurrentes, caracterizado por una fisonomía vegetal de comunidades naturales y seminatural que comparten un grupo considerable de especies dominantes, una dinámica y condiciones ecológicas generales y cuyas interacciones son indispensables para su persistencia a lo largo del tiempo.

⁵⁰ Denominada también tabla de contingencia o matriz de error.

con los escenarios de sensibilidad y los escenarios climáticos futuros (*capítulos 2.10 y 2.14*).

La matriz es utilizada para estimar el porcentaje de acuerdo y el estadístico *Kappa*.

Porcentaje de acuerdo:

El porcentaje de acuerdo⁵¹, estima el porcentaje de celdas de grilla en donde existe acuerdo entre los mapas.

Estadístico Kappa (k)

El estadístico *k* al igual que el porcentaje de acuerdo se utiliza como indicador de la similitud entre dos mapas, pero a diferencia de este último discrimina el porcentaje de acuerdo esperado estadísticamente por azar.

Se estima a partir de una matriz de confusión donde:

$$k = (p_o - p_e) / (1 - p_e)$$

A= matriz de confusión

$p_o = \sum a_{ii}/n$ = proporción de puntos de grilla en acuerdo en los mapas

$p_e = \sum r_i c_i / n^2$ = proporción de puntos de grilla en acuerdo en los mapas esperable por azar

a_{ii} = datos en la diagonal principal de la matriz A

r_i = suma de cada fila *i* de A

c_i = suma de cada columna *i* de A

n = numero total de puntos de grilla

También se puede calcular un *k* para cada categoría de la matriz a partir de:

$$k = (a_{ii}/n - r_i c_i/n^2) / ((r_i + c_i) / 2n - r_i c_i/n^2)$$

El rango de valores posibles de kappa es de -1 a 1, pero usualmente el valor está entre 0 y 1. Monserud y Leemans (1992) transformaron los valores cuantitativos de *kappa* en niveles cualitativos de grado de acuerdo entre mapas:

Kappa	Grado de acuerdo entre mapas
< 0,05	Inexistente
0,05 – 0,20	Muy bajo
0,20 – 0,40	Bajo
0,40 – 0,55	Regular
0,55 – 0,70	Alto
0,70 – 0,85	Muy alto
0,85 – 0,99	Excelente
> 0,99	Perfecto

⁵¹ En inglés, “overall accuracy”.

El valor de kappa depende del número de categorías (*Maclure & Willet, 1987*). Cuanto mayor es el número de categorías mayor es el potencial para que exista desacuerdo entre los mapas y consecuentemente mas bajo es el valor de *kappa*.

El estadístico Kappa ha sido utilizado para comparar cuantitativamente bases de datos de categorías, particularmente mapas de vegetación y cobertura de tierra (*Bakkenes et al., 2002; Pontius et al., 2001*).

Materiales y métodos:

Corridas control

Se corrieron los modelos CPTEC-PVM-CIMA y BIOME4 utilizando la climatología de LEM y se analizaron las salidas de distribución de biomas.

Elaboración del mapa en formato raster de Parques Nacionales

Se utilizo el mapa digitalizado y georreferenciado (Gauss – Kruguer faja 3) obtenido de la Administración de Parques Nacionales. Se realizó una transformación a coordenadas geodésicas (DATUM WGS84) y posteriormente se rasterizo⁵².

Comparación con el mapa de Eco-regiones de Parques

Para compatibilizar las categorías de biomas utilizadas por el CPTEC-PVM, el mapa de eco-regiones de Parques y los tipos funcionales de plantas⁵³ utilizados por BIOME4, se realizó una reclasificación en tres grandes “biomas generales”:

- sin vegetación – bioma resistente
- bosque-sabana
- pradera.

En los anexos I y II a este capítulo se adjuntan tablas comparando las salidas de los modelos con sus clasificaciones originales de vegetación y las eco-regiones de Parques Nacionales. El análisis de dicha información, fue de utilidad en el proceso de asignación de cada tipo de vegetación a un “bioma general” que resultó en las tablas adjuntas a continuación.

<i>Reclasificación en biomas generales</i>	<i>Eco-regiones Parques nacionales</i>
<i>Sin vegetación a bioma resistente</i>	-ESTEPA PATAGONICA -PUNA -ALTOS ANDES -MONTE DE LLANURAS Y MESETAS

⁵² El procesamiento digital se realizo utilizando “ERDAS” e “IDRISI”.

⁵³ También se considero reclasificar las categorías de biomas definidos en BIOME4 pero considerando que en la comparación con el mapa de Parques el kappa ($k=0,23$) era inferior a la comparación reclasificando los TFPs ($K=0,32$) se optó por esta última alternativa. De cualquier manera, en el anexo se adjunta un mapa de la corrida control de BIOME4 con la clasificación de biomas utilizada por el modelo.

	-MONTE DE SIERRAS Y BOLSONES
<i>Bosque – sabana</i>	-ESPINAL -CHACO HUMEDO -CHACO SECO -SELVA PARANENSE -BOSQUES PATAGONICOS -ESTEROS DEL IBERA -CAMPOS Y MALEZALES -SELVA DE LAS YUNGAS -DELTA E ISLAS DEL PARANA
<i>Pradera</i>	-PAMPA

Tabla 2.5.1: reclasificación de eco-regiones de Parques en biomas generales.

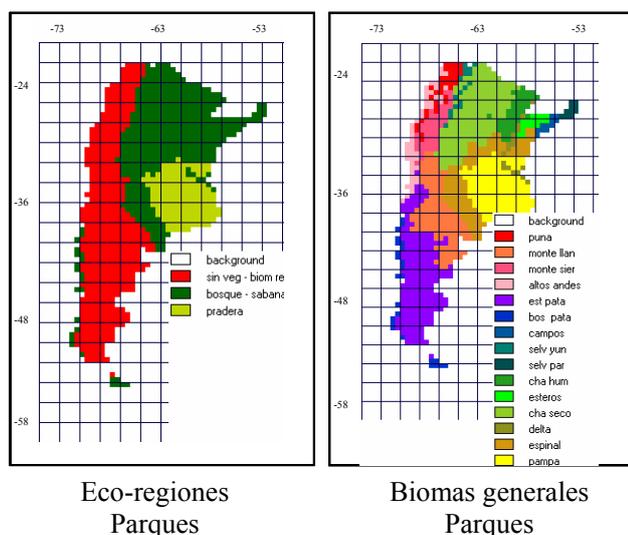


Figura 2.5.2: mapas de distribución de biomas de Parques (eco-regiones y biomas generales)

Reclasificación en Biomas Generales	BIOMAS CPTEC-PVM
<i>Sin vegetación a bioma resistente</i>	-HIELO -DESIERTO -TUNDRA -LARCH -SEMIDESIERTO
<i>Bosque –sabana</i>	-BOSQUE BOREAL -BOSQUE MIXTO -BOSQUE TEMPLADO -BOSQUE TROPICAL -CATINGA -SABANA
<i>Pradera</i>	-PRADERA

Tabla 2.5.3: reclasificación de biomas del CPTC-PVM en biomas generales.

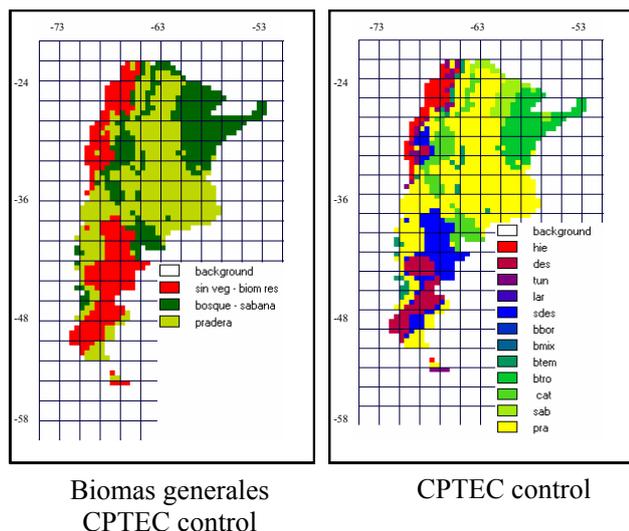


Figura 2.5.4: mapas de distribución de biomas de CPTEC-PVM (biomas originales y biomas generales)

Reclasificación en Biomas Generales	Tipos Funcionales de Plantas BIOME4
<i>Sin vegetación a bioma resistente</i>	-C3/C4 WOODY DESERT PLANT TYPE -TUNDRA SHRUB TYPE -COLD HERBACEOUS TYPE -LICHEN/FORB TYPE -ICE
<i>Bosque – sabana</i>	-TROPICAL EVERGREEN TREES -TROPICAL DROUGHT-DECIDUOUS TRESS -TEMPERATE BROADLEAVED EVERGREEN TREES -TEMPERATE DECIDUOUS TREES -COOL CONIFER TREES -BOREAL EVERGREEN TREES -BOREAL DECIDUOUS TREES -SAVANNA
<i>Pradera</i>	-C3/C4 TEMPERATE GRASS PLANT TYPE -C4 TROPICAL GRASS PLANT TYPE

Tabla 2.5.5: reclasificación de TFP de BIOME4 en biomas generales.

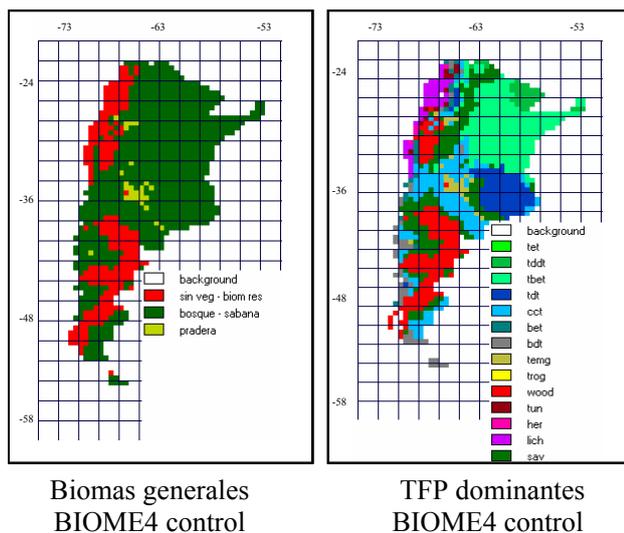


Figura 2.5.6: mapas de distribución de TFPs y biomias generales de BIOME4.

Resultados:

Del análisis visual de los mapas, se observa que BIOME4 sobre expresa la vegetación de tipo leñoso mientras que el CPTEC-PVM-CIMA sobre expresa las herbáceas.

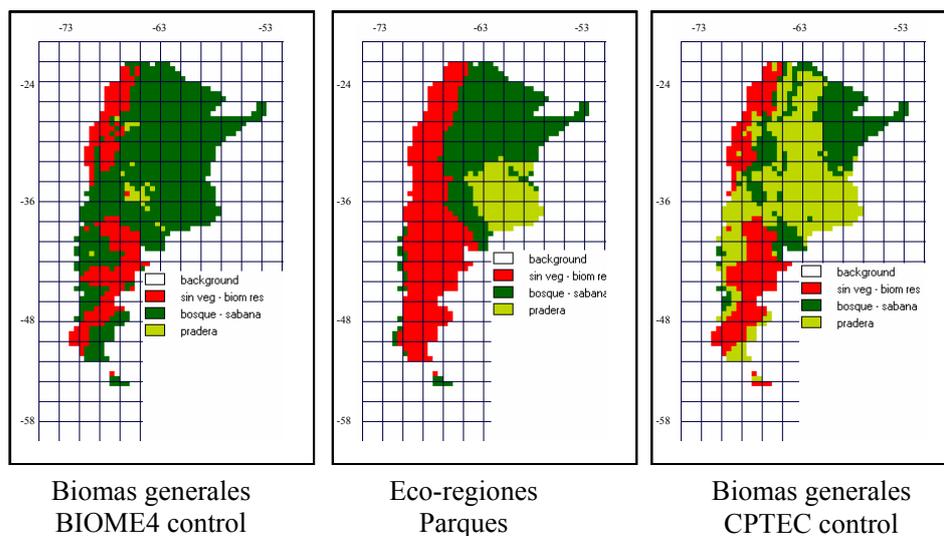


Figura 2.5.7: mapas de distribución de biomias generales de Parques y salidas control de BIOME4 y CPTEC-PVM-CIMA.

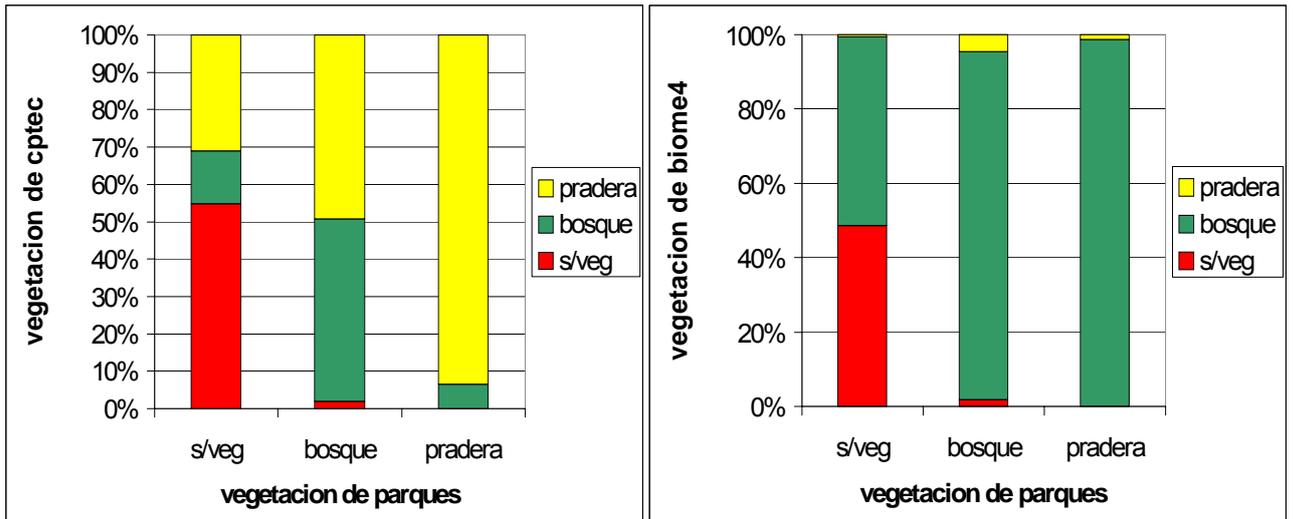


Figura 2.5.8: comparación biomas generales de Parques, BIOME4 y CPTEC.

	BIOME4					CPTEC			
Parques	s/veg	bosque	pradera	total	Parques	s/veg	bosque	pradera	total
s/veg	235	245	3	483	s/veg	265	68	150	483
bosque	8	426	21	455	bosque	9	222	224	455
pradera	0	152	2	154	pradera	0	10	144	154
total	243	823	26	1092	total	274	300	518	1092

Tabla 2.5.9: matriz de confusión Parques vs BIOME4 y vs CPTEC-PVM-CIMA.

BIOME4 presenta un porcentaje de acuerdo superior al de CPTEC-PVM-CIMA. En cuanto al estadístico *kappa*, es superior para CPTEC-PVM-CIMA.

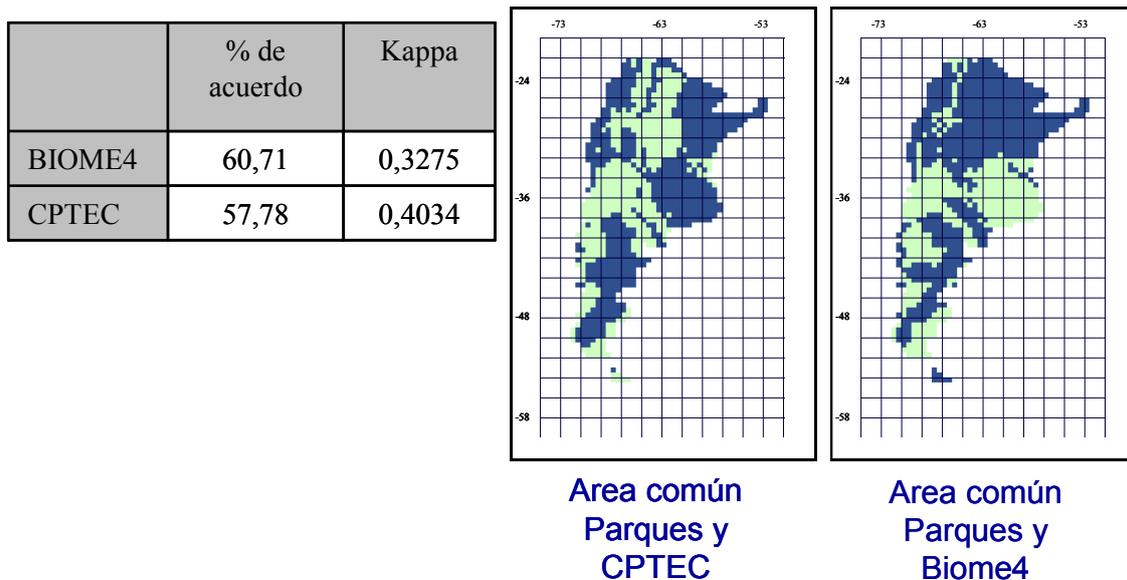


Figura 2.5.10: mapas de distribución de “biomas generales” en común entre Parques, BIOME4 y CPTEC-PVM.

Análisis por categoría de bioma general:

El porcentaje de acuerdo y el estadístico *kappa* discriminado por categoría, está en línea con los resultados anteriores que indicaban una sobre expresión de bosques en BIOME4 y de praderas en CPTEC-PVM.

	% de acuerdo y <i>Kappa</i>					
	Sin veg – biom re		Bosque - sabana		Pradera	
BIOME4	48,65	0,49	93,62	0,28	1,29	-0,01
CPTEC	54,86	0,55	48,79	0,38	93,50	0,26

Tabla 2.5.11: % de acuerdo y estadístico *kappa* por “bioma general” comparando Parques con BIOME4 y CPTEC-PVM.

Análisis por eco-región

Ambos modelos simulan 100% de acuerdo en Chaco Húmedo. El porcentaje de acuerdo, como era esperable, es mejor en las eco-regiones con cobertura boscosa para BIOME4 y en las que tienen cobertura herbácea en CPTEC.

	% de acuerdo CPTEC	% de acuerdo BIOME4
chaco húmedo	100	100
espinal	33	85
chaco seco	39	97
monte sierras	42	59
Pampa	93	1
monte llanuras	39	47
estepa patagónica	56	37

Tabla 2.5.12: % de acuerdo por eco-región comparando Parques con BIOME4 y CPTEC-PVM.

Conclusiones y perspectivas a futuro:

Los resultados señalan una coherencia comparable a los obtenidos por otros investigadores de Europa y Estados Unidos. A pesar de que en escala global este tipo de modelos ha generado resultados más que aceptables, en escalas espaciales menores requieren ajustes. En particular América del Sur ha resultado siempre una región difícil de representar.

En BIOME4 el principal desfasaje entre la vegetación real y la simulada en Argentina es la sobreestimación del área ocupada por formas de vida de tipo leñoso mientras que en CPTEC-PVM-CIMA es a la inversa.

La incorrecta simulación de bosques en la pampa es un problema compartido por muchos modelos de vegetación (*Prentice, 1992; Neilson y Marks, 1994; Foley, 1996*) y biogeoquímicos que sobreestiman la PPN en esta región. La causa de esta discrepancia

no esta clara, pero podría estar conectada con la presencia de condiciones especiales del suelo, tasas extremadamente altas de evapotranspiración que no son completamente captadas por estos modelos o aspectos vinculados a la estacionalidad, entre otras explicaciones posibles.

Si bien el CPTEC-PVM-CIMA representa acertadamente praderas en la región pampeana, no logra establecer correctamente los límites con la eco-región del espinal.

El cono sur meridional, ha sido mencionado con frecuencia por presentar dificultades diversas para ensamblar la vegetación natural con las condiciones climáticas. Tal vez, buena parte de estos problemas tenga su origen en el hecho de que los sistemas fitoclimáticos pioneros, al menos los mas difundidos, fueron deducidos a partir de las condiciones dominantes en los países del hemisferio norte, y los límites determinados para sus paisajes no se adecuaron a los matices de la realidad climática y biológica de la región sudamericana.

La solución mas adecuada no consistió en revisar estos modelos teóricos, sino en considerar la realidad de la región un caso anómalo producido por factores extraclimáticos.

Este trabajo, cuenta entre sus objetivos, ajustar los modelos de vegetación utilizados para que produzcan una distribución de la vegetación más cercana a la realidad de la región.

En el siguiente capítulo se desarrollan posibles explicaciones a las discrepancias encontradas así como propuestas de ajustes.

Anexo I tablas:

Modelo CPTEC-PVM vs eco-regiones de parques nacionales

1. Biomás de CPTEC-PVM-CIMA vs eco-regiones de Parques

CPTEC-PVM-CIMA no simula en Argentina los biomás BMIX, BBOR y LAR por lo que no se incluyen en la tabla

Parques	CPTEC								
	HIE	DES	TUN	SDES	BTEM	BTRO	CAT	SAB	PRA
campos						100,00			
bos pata		20,00	16,00		24,00				40,00
altos andes	72,92		12,50		2,08				12,50
Est pata	0,47	30,33		25,59	2,84				40,76
monte llanu		0,72		38,41			31,16		29,71
monte sier	2,04	6,12	16,33	18,37	10,20		18,37		28,57
puna	48,65		27,03	5,41	10,81				8,11
selva yun							5,88	17,65	76,47
selva par						100,00			
cha hum						86,67		13,33	
esteros						76,47		23,53	
cha seco					2,58	1,03	16,49	19,59	60,31
delta						66,67			33,33
espinal					2,54	22,03	9,32		66,10
pampa					0,65	5,84			93,51

Tabla 2.5.13: porcentaje del área de la eco-región de Parques ocupado por los distintos biomás simulados por CPTEC-PVM-CIMA.

2. Biomás de CPTEC-PVM-CIMA vs Parques reclasificado en biomás generales

Parques	CPTEC								
	HIE	DES	TUN	SDES	BTEM	BTRO	CAT	SAB	PRA
sin veg – biom re	11,39	14,08	4,97	24,43	3,31	0,00	10,77		31,06
bosque - sabana		1,10	0,88		3,08	24,84	9,67	11,21	49,23
pradera					0,65	5,84			93,51

Tabla 2.5.14: porcentaje del área de los biomás generales de Parques ocupado por los distintos biomás simulados por CPTEC-PVM-CIMA.

3. Eco-regiones de Parques vs CPTEC-PVM-CIMA reclasificado en biomás generales

Parques	CPTEC		
	s/veg	bosque	pradera
campos		100,00	
bos pata	36,00	24,00	40,00

altos andes	85,42	2,08	12,50
est pata	56,40	2,84	40,76
monte llanu	39,13	31,16	29,71
monte sier	42,86	28,57	28,57
puna	81,08	10,81	8,11
selva yun		23,53	76,47
selva par		100,00	
cha hum		100,00	
esteros		100,00	
cha seco		39,69	60,31
delta		66,67	33,33
espinal		33,90	66,10
pampa		6,49	93,51

Tabla 2.5.15: porcentaje del área de las eco-regiones de Parques ocupado por los biomas generales simulados por CPTEC-PVM-CIMA.

4. Biomas generales de CPTEC vs biomas generales de Parques

Parques	CPTEC			
	s/veg	Bosque	pradera	total
<i>sin veg – biom re</i>	265	68	150	483
<i>bosque - sabana</i>	9	222	224	455
<i>pradera</i>	0	10	144	154
Total	274	300	518	1092

Tabla 2.5.16: celdas de grilla biomas generales de Parques vs biomas generales simulados por CPTEC-PVM.

Parques	CPTEC			
	s/veg	bosque	pradera	total
<i>sin veg – biom re</i>	54,87	14,08	31,06	100
<i>bosque - sabana</i>	1,98	48,79	49,23	100
<i>pradera</i>	0	6,49	93,51	100

Tabla 2.5.17: porcentaje del área de biomas generales de Parques ocupado por los biomas generales simulados por CPTEC-PVM.

Anexo II tablas:

Modelo BIOME4 vs eco-regiones de Parques Nacionales

1. Tipos Funcionales de Plantas (TFPs⁵⁴) dominantes de BIOME4 vs eco-regiones de Parques.

Biome4 no simula en Argentina los biomas TROG y TET por lo que no se incluyen en la tabla.

Parques	BIOME4												
	TDDT	TBET	TDT	CCT	BET	BDT	TEMG	WD	TUN	HER	LICH	SAV	ICE
campos		100											
bos pata				4,0	8,0	64,0		24,0					
altos andes				4,2	12,5	6,3			4,2	2,1	58,3		12,5
est pata			0,5	22,7	0,9	10,4	0,5	34,1				27,5	3,3
monte llanu		1,4		23,9				47,1				27,5	
monte sier				10,2	14,3	4,1	4,1	46,9	8,2	2,0	2,0	8,2	
puna				8,1	13,5	8,1	0,0	2,7	16,2	5,4	43,2	2,7	
selva yun	11,8	29,4	17,6	17,6			5,9					17,6	
selva par	30,0	70,0											
cha hum	46,7	53,3											
esteros		100,											
cha seco	5,2	49,5	1,0	8,8		1,0	2,1	0,5				32,0	
delta	5,6	94,4											
espinal		41,5	0,0	38,1			13,6	0,8				5,9	
pampa		16,9	57,8	9,7			1,3					14,3	

Tabla 2.5.18: porcentaje del área de la eco-región de Parques ocupado por los distintos TFPs dominantes simulados por BIOME4.

2. Tipos Funcionales de Plantas (TFPs) dominantes de BIOME4 vs biomas generales de Parques.

Parques	BIOME4												
	TDDT	TBET	TDT	CCT	BET	BDT	TEMG	WD	TUN	HER	LICH	SAV	ICE
sin veg – biom re		0,41	0,21	18,8	4,14	6,21	0,62	33,3	2,48	0,83	9,32	20,9	2,69
Bosque - sabana	8,13	49,6	1,10	14,5	0,44	3,96	4,62	1,76				15,8	
pradera		16,8	57,7	9,7			1,3					14,2	

⁵⁴ (TET) TROPICAL EVERGREEN TREES; (TDDT) TROPICAL DROUGHT-DECIDUOUS TREES (RAINGREENS); (TBET) TEMPERATE BROADLEAVED EVERGREEN TREES; (TDT) TEMPERATE DECIDUOUS TREES; (CCT) COOL CONIFER TREES; (BET) BOREAL EVERGREEN TREES; (BDT) BOREAL DECIDUOUS TREES; (TEMG) C3/C4 TEMPERATE GRASS PLANT TYPE; (TROG) C4 TROPICAL GRASS PLANT TYPE; (WD) C3/C4 WOODY DESERT PLANT TYPE; (TUN) TUNDRA SHRUB TYPE; (HERB) COLD HERBACEOUS TYPE; (LICH) LICHEN/FORB TYPE.

Tabla 2.5.19: porcentaje del área de los biomas generales de Parques ocupado por los distintos TFPs dominantes simulados por BIOME4.

3. *Biomás generales simulados por BIOME4 vs eco-regiones de Parques.*

Parques	BIOME4		
	s/veg	bosque	Pradera
campos		100,00	
bos pata	24,00	76,00	
altos andes	77,08	22,92	
est pata	37,44	62,09	0,47
monte llanu	47,10	52,90	
monte sier	59,18	36,73	4,08
puna	67,57	32,43	
selva yun		94,12	5,88
selva par		100,00	
cha hum		100,00	
esteros		100,00	
cha seco	0,52	97,42	2,06
delta		100,00	
espinal	0,85	85,59	13,56
pampa		98,70	1,30

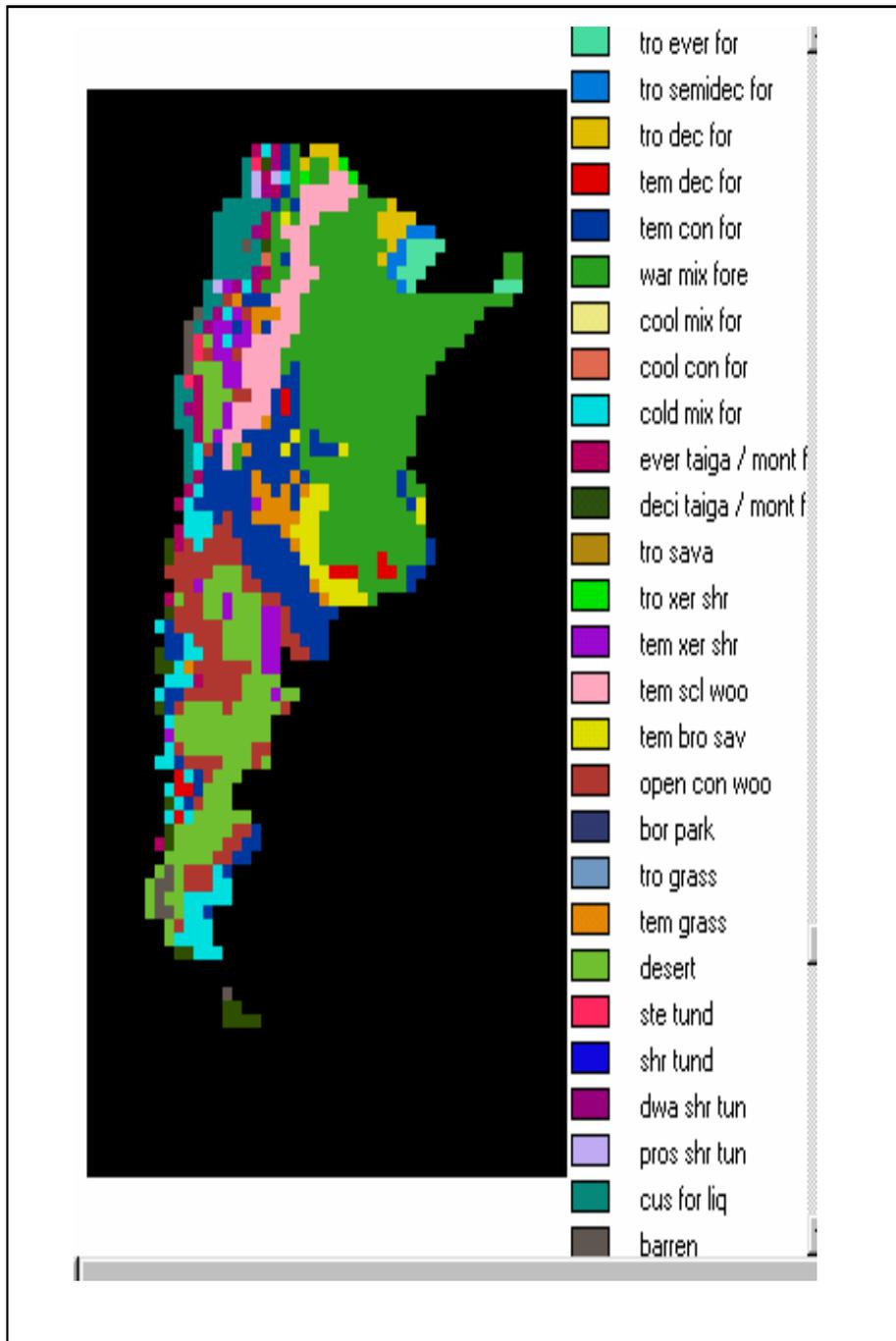
Tabla 2.5.20: porcentaje del área de las eco-regiones de Parques ocupado por los biomas generales simulados por BIOME4.

4. *Biomás generales simulados por BIOME4 vs biomas generales de Parques*

Parques	BIOME4			
	s/veg	bosque	pradera	Total
<i>sin veg – biom re</i>	235	245	3	483
<i>Bosque - sabana</i>	8	426	21	455
<i>pradera</i>	0	152	2	154
Total	243	823	26	1092

Tabla 2.5.21: celdas de grilla biomas generales de Parques vs biomas generales simulados por BIOME4.

ANEXO: MAPA DE DISTRIBUCION DE BIOMAS ORIGINALES DEL MODELO BIOME4



BIOME4 biomas control

Ver referencias de biomas en la tabla 2.4.8

2.6 CORRIDAS CONTROL DEL IAF Y PPN

Productividad Primaria Neta; Índice de Área Foliar; estado de la vegetación; validación; teledetección; mediciones a campo.

Introducción:

La productividad primaria neta (PPN) y el índice de área foliar (IAF) son buenos indicadores del estado de la vegetación en un lugar y tiempo determinado.

A los efectos de este trabajo, son de utilidad para entender la suma de efectos, algunos de ellos antagónicos, del cambio en el clima y el aumento en el CO₂ atmosférico sobre los distintos procesos fisiológicos vinculados al crecimiento y mantenimiento de las plantas.

Índice de área foliar (IAF):

El IAF consiste en la suma de toda la superficie foliar por unidad de superficie de terreno⁵⁵.

La regulación de la transpiración y la asimilación de CO₂, ocurren fundamentalmente a nivel de la superficie de la hoja. Consecuentemente, la fenología de la hoja, definida como el patrón de variación de la magnitud del área foliar a lo largo de un dado ciclo, tiene un efecto sobre los flujos de carbono y agua entre la vegetación y la atmósfera.

La fenología de la hoja depende del tipo de hoja (perenne o caducifolia) y de factores ambientales como el fotoperiodo, la temperatura, el estrés hídrico y la concentración atmosférica de CO₂.

El índice de área foliar es un indicador de la fenología de las plantas.

El área foliar, medida a través del índice de área foliar (IAF), determina la cantidad de radiación solar fotosintéticamente activa absorbida. Esta última, se encuentra estrechamente relacionada con la productividad primaria neta (PPN) de un ecosistema.

Análisis correlacionales y biogeográficos sugieren que el IAF está estrechamente vinculado al balance de agua y el contenido de nutrientes del sitio (*Scheffer et al., 2005; Woodward, 1987*).

Un incremento en el área foliar no siempre representa un cambio en el IAF, ya que este último está determinado por otros factores además del tamaño de la hoja, como el número de hojas y su orientación (*Lawlor, 1995*)

Productividad primaria neta (PPN):

⁵⁵ Expresada, por ejemplo, en m² follaje / m² terreno.

Es la biomasa o energía disponibles después de sustraer de la Productividad Primaria Bruta las pérdidas por respiración y otros procesos metabólicos vinculados al mantenimiento y crecimiento de las estructuras de las plantas.

La PPN⁵⁶ depende de la fracción de energía solar radiante visible captada por los cloroplastos y puede ser limitada por variables ambientales extrínsecas (radiación, temperatura, humedad del suelo, nutrientes, etc.) o intrínsecas (IAF, orientación y edad de las hojas, contenido de clorofila, tipo de metabolismo fotosintético, etc.).

Validación:

El proceso de validación de las salidas de IAF⁵⁷ y PPN de BIOME4 requiere de la aplicación de una serie de metodologías de campo y del uso de imágenes satelitales.

Existe una variedad de metodologías de campo para estimar la PPN, cuyo uso depende del ecosistema a estudiar. Por ejemplo, en ecosistemas forestales se suelen utilizar ecuaciones de regresión que intentan cuantificar las relaciones entre la biomasa con algún otro parámetro de fácil medición, como el diámetro del tronco a la altura del pecho, de manera que los aumentos de diámetro se asocian a cambios en biomasa en los procesos productivos. En el caso de los ecosistemas herbáceos la metodología es más sencilla ya que se pueden utilizar métodos de cosecha.

Por otro lado, la teledetección, el uso de sensores remotos a bordo de satélites para evaluar propiedades de la superficie terrestre, constituye una herramienta metodológica cada vez más utilizada en la validación de las salidas de modelos de vegetación.

Con distinto grado de certeza, se puede conocer mediante sensores remotos muchas características y procesos trascendentales de los sistemas ecológicos. Por ejemplo, se puede estimar la cantidad de área foliar, la radiación fotosintética absorbida, la evapotranspiración, el nivel de estrés hídrico, la eficiencia en el uso de la radiación, etc.

Adicionalmente es posible estimar la PPN a partir de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa proveniente del sol que es absorbida por la vegetación, y la eficiencia en el uso de la radiación (Monteith, 1972).

No obstante, la aparente sofisticación que se le atribuye a los sensores remotos, vale recalcar que estos no son más precisos que los instrumentos de medición directa a campo mencionados previamente. La ventaja que tienen es su posibilidad de hacer estimaciones en numerosas áreas simultáneamente y con mucha mayor frecuencia que la que permiten los métodos directos.

Materiales y métodos:

Se analizaron las salidas de IAF⁵⁸ y PPN de la corrida control de BIOME4 (capítulo 2.5)

⁵⁶ Expresada, por ejemplo en gC/m² año.

⁵⁷ Existen una serie de métodos directos e indirectos para estimar el IAF (Jonckheere et al., 2004).

⁵⁸ Expresado como múltiplo de 100.

Resultados:

Las salidas de PPN son coherentes y consistentes con otros trabajos (Raich et al., 1991).

	IAF ₁₀₀ (m ² /m ²)	PPN (gC/m ²)
Pampa	343,23 (4,86)	1324 (12,54)
espinal	249,87 (8,06)	1093 (35,19)
mont llan	134,72 (3,05)	418 (16,03)
mont sier	123,67 (11,79)	320 (27,91)
est pat	108,35 (5,22)	243 (10,84)
cha hum	389,73 (8,08)	1624 (22,47)
cha sec	225,32 (5,14)	1033 (15,76)

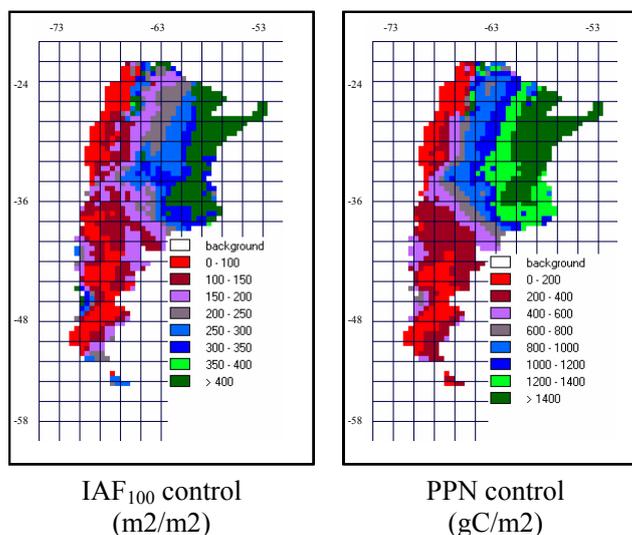


Figura 2.6.1: promedio regional (error standard) y mapa de distribución del IAF₁₀₀ y la PPN anuales de la corrida control de BIOME4.

Como era de esperar, la PPN de las eco-regiones boscosas (chaco húmedo, espinal y chaco seco) es mayor que las de las eco-regiones de monte y la estepa.

La PPN de la pampa es muy alta para una pradera, pero vale recordar que el modelo sin ajustes simula erróneamente un bosque en esta región.

Los valores de PPN obtenidos son comparables con valores obtenidos en campo y a partir del modelo biogeoquímico TEM.

Bioma	PPN (gC/m2 año)			
	TEM	Lieth (1973)	Whittaker (1975)	Olson (1983)
Tropical evergreen forest	1020	1000	1000	840
Tropical deciduous forest	890	750	-----	600
Temperate forest	600	500	625	630
Xeromorphic forest	500	400	350	385
Savanna	975	300	450	515
Grassland	310	312,5	300	395
Arid shrubland	100	35	20	80

Tabla 2.6.2: PPN de biomas globales. Adaptada de Raich et al., (1991). Los valores originalmente estaban en expresados en términos de materia orgánica y se convirtieron asumiendo un contenido de 50% de carbono en la materia orgánica.

Adicionalmente, Haxeltine & Prentice (1996) compararon la PPN simulada por BIOME3 con un grupo de mediciones de campo⁵⁹. La comparación mostró un grado de acuerdo bueno entre la PPN simulada y medida, con un coeficiente de correlación de 0,74 (N=61 y P<0,001).

Los mismos autores también compararon los valores de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación verde (FPAR⁶⁰) simulados por BIOME3 con valores observados obtenidos a partir de imágenes satelitales⁶¹ (base de datos ISLSCP, Sellers et al., 1996).

El resultado de la regresión lineal entre los valores observados y simulados mostró un buen grado de acuerdo, con un coeficiente de correlación de 0,76 (N=14441, P<0,001).

Los valores de IAF simulados por el modelo son comparables a los descriptos por otros autores (*Asner et al., 2003*).

Conclusiones y perspectivas a futuro:

A futuro, se debería considerar:

la validación de las salidas anuales del IAF y la PPN a partir de una combinación técnicas de teledetección y mediciones a campo en la región.

el análisis de la performance del modelo simulando la variación estacional de ambas variables.

el análisis de correlaciones entre la distribución de variables climáticas y la de la PPN y el IAF.

⁵⁹ Con el inconveniente de que el modelo simula la PPN promedio de una grilla de 0,5° y las mediciones son específicas de un sitio particular

⁶⁰ La “FPAR” está vinculado al valor del IAF.

⁶¹ Un problema obvio en la comparación es que los valores simulados por el modelo corresponden a vegetación natural potencial mientras que los observados están influenciados por la agricultura y el cambio en el uso del suelo. El otro problema es que las observaciones corresponden al promedio de 2 años mientras que el FPAR simulado por el modelo es un promedio climatológico (30 años).

2.7 AJUSTES SOBRE LOS MODELOS

CPTEC-PVM-CIMA y BIOME4; ajustes; límites ecofisiológicos y empíricos; parámetros de tipos funcionales de plantas; modificación o incorporación de procesos a los modelos..

Las diferencias encontradas en la simulación de la distribución de vegetación de los modelos y el mapa de eco-regiones de Parques, se pueden deber a:

la calidad y representatividad de las bases de datos utilizadas para correr los modelos

el proceso de compatibilización de los distintos sistemas de clasificación a biomas generales

cuestiones propias de los modelos

Los dos primeros aspectos, ya fueron desarrollados previamente en los capítulos 2.2 y 2.5 respectivamente, por lo que en este capítulo nos concentraremos en analizar el tercer aspecto.

Las posibilidades de realizar ajustes sobre los modelos incluyen:

Ajustes sobre los límites ecofisiológicos o empíricos: por ejemplo, aumentar el valor límite máximo del índice hídrico en el CPTEC-PVM para el establecimiento de un semi-desierto en un sitio determinado (*ver capítulo 2.8*) o establecer un nuevo límite para ciertos TFP leñosos en BIOME4 (*ver capítulo 2.9*).

Ajustes sobre parámetros⁶²: por ejemplo, la capacidad de campo en el modelo CPTEC-PVM o la profundidad de raíces⁶³ de los TFP en BIOME4

Ajustes sobre procesos: por ejemplo, en BIOME4, en lugar de distribuir uniformemente la precipitación media mensual a valores diarios⁶⁴ distribuirla considerando información sobre la frecuencia de días con lluvia y el promedio de intensidad por evento.

Incorporar nuevos procesos: por ejemplo, competencia por el agua entre herbáceas y leñosas en los primeros estadios de vida.

⁶² Hallgren and Pitman (2000) estudiaron la sensibilidad en la salida de la distribución de biomas de BIOME3 frente a cambios en los parámetros de los Tipos Funcionales de Planta.

⁶³ El tratamiento de las raíces está sumamente simplificado en los modelos de vegetación (*Jackson et al., 2000*). La incorporación de la información de la base de datos de distribución de biomasa de raíces a escala global (*Jackson et al., 1996, 1997*) tentativamente, podría mejorar la performance del modelo.

⁶⁴ Que luego son utilizados por el módulo del balance hídrico del suelo.

Conclusiones y perspectivas a futuro

Los modelos fueron originalmente calibrados, por sus respectivos autores, comparando las salidas control con mapas de vegetación global y haciendo hincapié en que representen bien el lugar de origen⁶⁵ y aceptablemente el resto del mundo.

Los ajustes a realizar, deberían lograr que el modelo tenga una buena representación de nuestra región y funcione, al menos, de manera aceptable en el resto del mundo.

En este sentido, en los dos capítulos siguientes se describen ajustes que mejoran la performance del CPTEC-PVM-CIMA y BIOME4 en Argentina.

⁶⁵ Desafortunadamente los lugares de origen de la mayor parte de los modelos están en el hemisferio norte por lo que la representación del hemisferio sur ha sido siempre deficiente.

2.8 AJUSTES EN EL MODELO CPTEC-PVM-CIMA

CPTEC-PVM-CIMA; sobre expresión de praderas; ajustes en el algoritmo de clasificación de biomas; índice hídrico; índice de estacionalidad; temperatura mínima; kappa; porcentaje de acuerdo.

Introducción:

Como se mencionó previamente el principal desfase entre la simulación del CPTEC-PVM-CIMA y el mapa de vegetación real de Parques es la sobre expresión de las praderas.

A tal efecto, se implementaron ajustes sobre el algoritmo de clasificación de biomas del modelo que lograron mejorar sensiblemente su desempeño en Argentina.

Materiales y métodos:

La determinación de los ajustes a realizar sobre los valores límite del algoritmo de clasificación de biomas (*Figura 2.8.3*), es producto del análisis de la corrida control del modelo y de la distribución de valores de los índices climáticos en Argentina.

1) Corrida control: la representación de biomas originales del CPTEC-PVM-CIMA discriminados por eco-región (*Tabla 2.8.7*) indicaba la existencia de praderas en el:

monte de llanuras, monte de sierras y estepa, donde debería existir un bioma resistente;

chaco seco y el espinal, donde debería existir un bosque-sabana.

2) Distribución de valores de los índices climáticos: se observaban diferencias en los valores de los índices en las distintas eco-regiones (*Tabla 2.8.1* y *Figura 2.8.2*).

	gdd0	gdd5	Tc (°C)	h	d
pampa	5601	3776	8,68	0,97	0,85
espinal	6034	4209	9,05	0,79	0,47
mont llan	5157	3345	6,2	0,34	0,16
mont sie	3568	2170	1,07	0,44	0,31
estepa	2952	1457	1,1	0,28	0,3
cha hum	7657	5832	15,3	0,98	0,89
cha sec	7040	5217	12,1	0,69	0,25

Tabla 2.8.1: Promedios por eco-región de los índices climáticos utilizados por el CPTEC-PVM-CIMA.

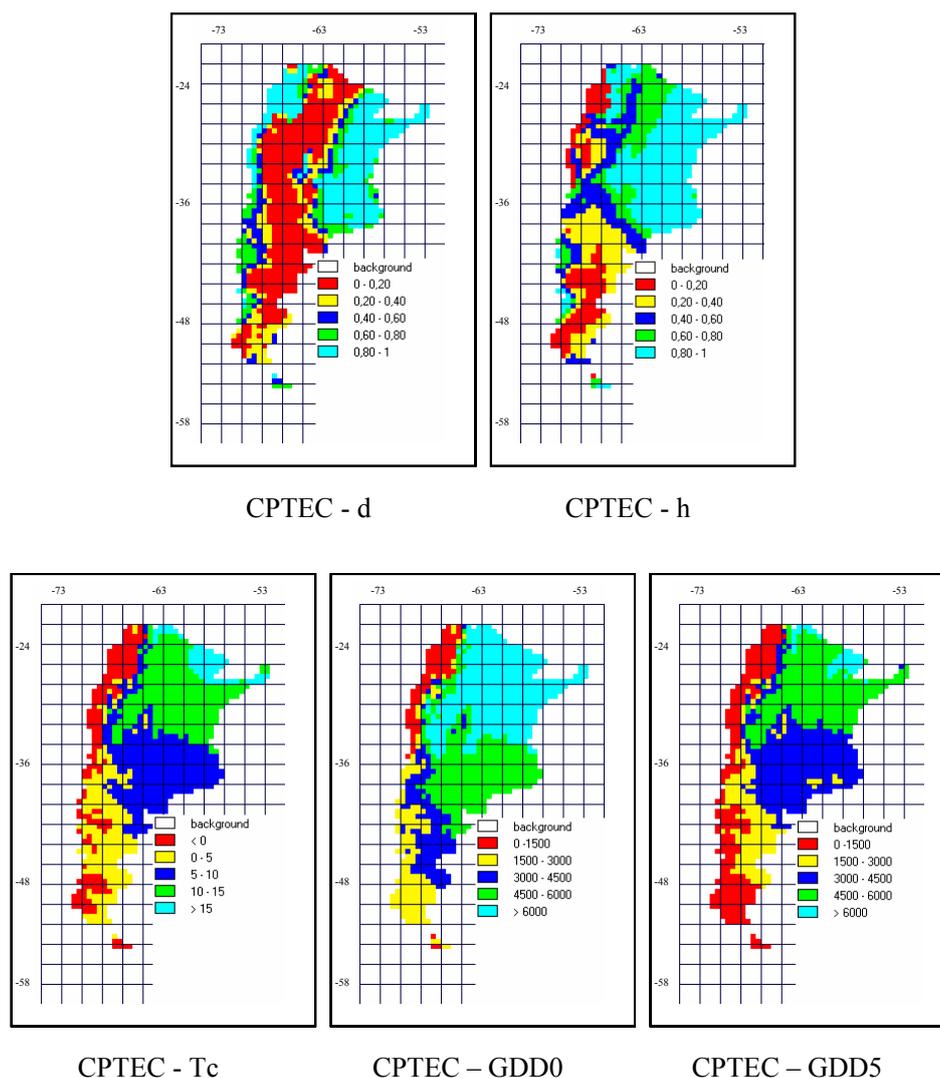


Figura 2.8.2: mapas de distribución de índices climáticos del CPTEC-PVM-CIMA.

En función 1 y 2, se realizaron ajustes en los siguientes valores límite del algoritmo de clasificación (Figura 2.8.3):

- 1- Se incrementó el índice hídrico (H) máximo para el establecimiento de un semidesierto en un punto de grilla de 0.28 a 0.48.

Justificación: Considerando los valores promedio de H en la estepa (0,28), monte de llanuras (0,34) y monte de sierras (0,44) el ajuste debía incrementar la representación de la categoría bioma resistente en las tres eco-regiones.

- 2- Se redujo la Temperatura mínima (Tc) de 14 a 11 °C para el establecimiento de una sabana en un punto de grilla.

Justificación: Considerando que en el espinal simulaba pradera 3 cuando debía simular bosque-sabana y que el Tc promedio del espinal era (9,05) era bastante inferior al Tc=14 que fija el algoritmo como mínimo para el establecimiento de

la sabana, disminuir dicho límite debía incrementar el área de bosque-sabana sobre el espinal. Si bien esto podía afectar negativamente la representación de la pampa (ya que aumentaba el potencial de establecimiento de bosque) lo haría en menor grado dado que el Tc promedio es aún inferior (8,68).

- 3- Se eliminó el requisito de que el índice hídrico (H) fuera menor a 0.55 para el establecimiento de la catinga en un punto de grilla.

Justificación: considerando que en el chaco seco el promedio de $h=0,69$ y que en el algoritmo se si $h < 0,55$ permitía catinga, eliminar este límite aumentaba el potencial de establecimiento de bosque en la región.

ALGORITMO DE CLASIFICACION DEL MODELO CPTEC-PVM-CIMA AJUSTADO

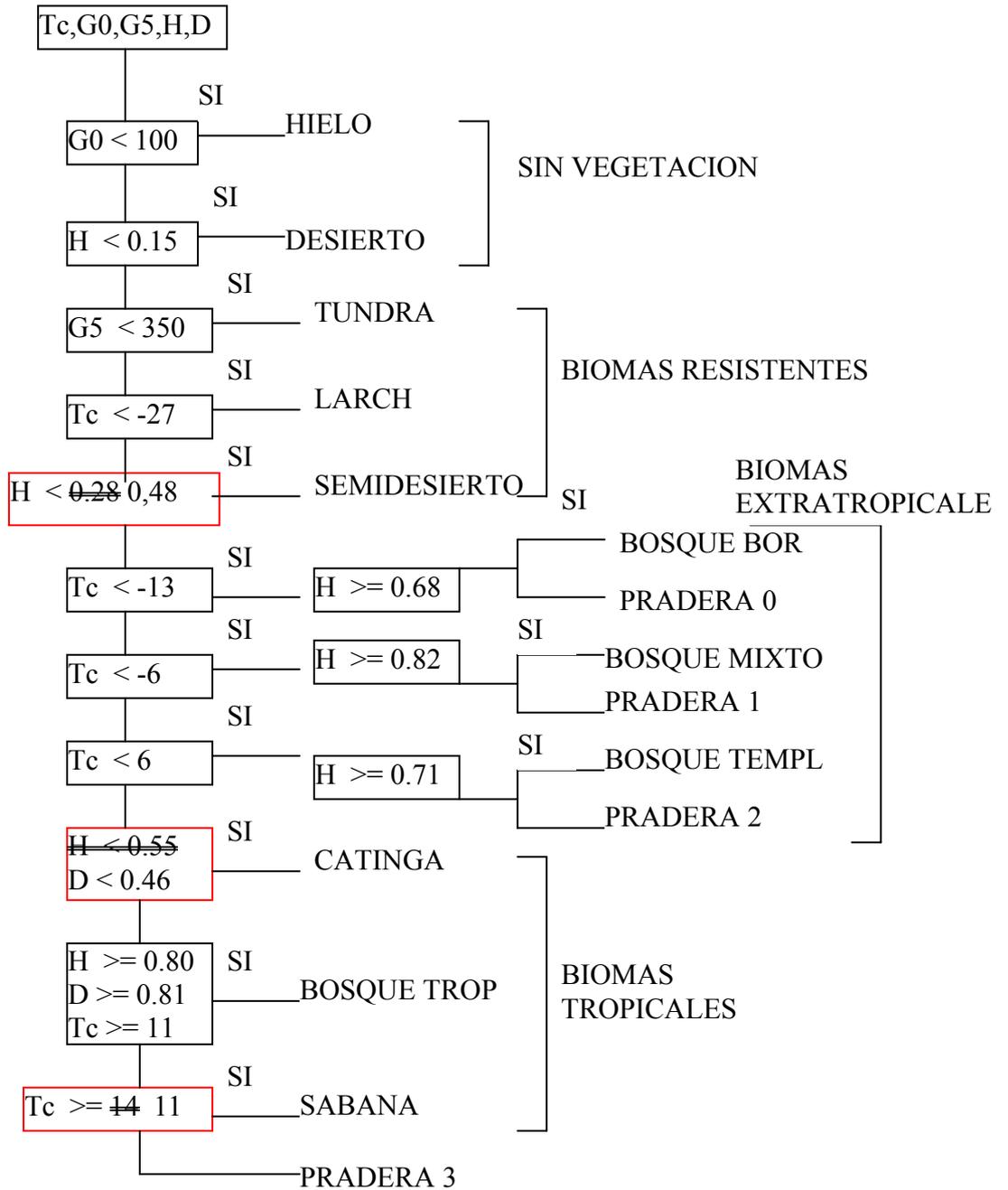
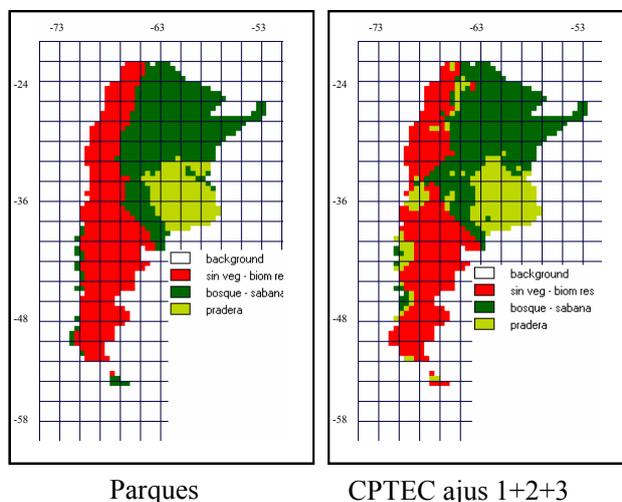


Figura 2.8.3: algoritmo de clasificación de biomas del CPTEC-PVM-CIMA ajustado

Resultados:

Los ajustes en los límites del algoritmo de clasificación del modelo mejoraron la salida llevándola de un porcentaje de acuerdo del 57% a un 84% y de un kappa de 0,40 a 0,75.



<i>Biomias Generales</i>	<i>Original</i>		<i>Ajuste 1</i>		<i>Ajuste 1+2</i>		<i>Ajuste 1+2+3</i>	
	<i>k</i>	%	<i>k</i>	%	<i>k</i>	%	<i>k</i>	%
<i>Sin vegetación - bioma resistente</i>	0,55	54	0,79	84	0,79	84	0,79	84
<i>Bosque – sabana</i>	0,38	48	0,42	44	0,64	67	0,76	83
<i>Pradera</i>	0,26	93	0,37	93	0,52	92	0,65	87
<i>Total</i>	0,40	57	0,54	69	0,67	78	0,75	84

Figura 2.8.4: mapas de distribución de “biomas generales” de Parques y CPTEC-PVM-CIMA ajustado.

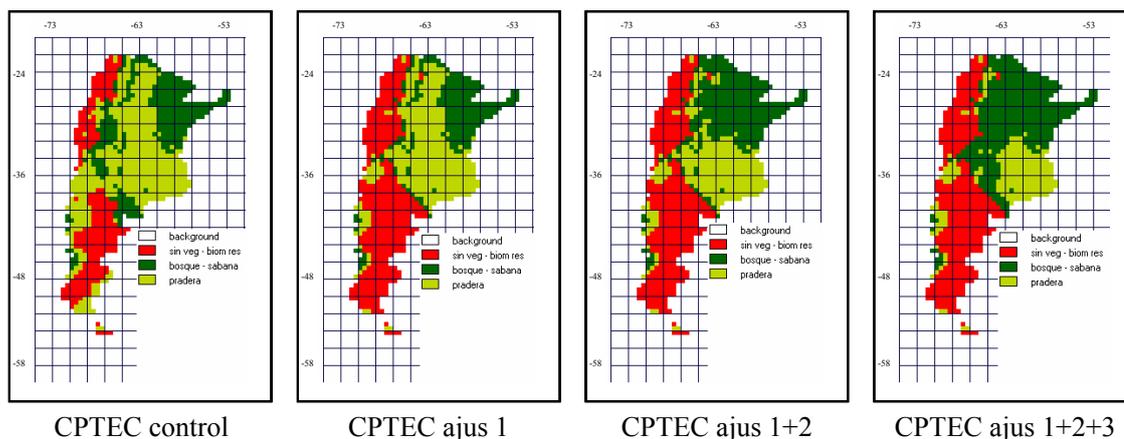


Figura 2.8.5: mapas de distribución de “biomas generales” de CPTEC-PVM-CIMA: control, ajuste 1, ajuste 1+2, ajuste 1+2+3.

El análisis del porcentaje de acuerdo discriminado por eco-región indica mejoras en el espinal, chaco seco, monte de llanura, monte de sierras y estepa.

El ajuste 1 produce las mejoras más importantes en el monte de sierras, monte de llanuras y estepa, reemplazando las praderas y en menor medida la Catinga y Sabana por un Semidesierto (*ver tablas 2.8.7 y 2.8.8*).

El ajuste 1+2 y 1+2+3 mejora la representación del chaco y el espinal, reemplazando las praderas por sabana en el espinal y por catinga y sabanas en el chaco seco.

El chaco húmedo fue siempre bien representado e insensible a los ajustes.

<i>Eco-regiones</i>	<i>Original</i>	<i>Ajuste 1</i>	<i>Ajuste 1+2</i>	<i>Ajuste 1+2+3</i>
	%	%	%	%
<i>Chaco húmedo</i>	100	100	100	100
<i>Espinal</i>	33	31	44	81
<i>Chaco seco</i>	39	32	75	89
<i>Monte de sierras</i>	42	83	83	83
<i>Pampa</i>	93	93	92	87
<i>Monte de llanuras</i>	39	87	87	87
<i>Estepa</i>	56	81	81	81

Tabla 2.8.6: porcentaje de acuerdo por eco-región de Parques con CPTEC-PVM-CIMA: control, ajuste 1, ajuste 1+2, ajuste 1+2+3.

Conclusiones y perspectivas a futuro:

El ajuste de los valores límite para semidesierto, sabana y catinga en el algoritmo de clasificación de biomas del modelo, logró una mejora considerable en su rendimiento pasando de un $kappa=0,40$ en el control a un $kappa= 0,75$ con los ajustes 1+2+3.

A futuro, resultaría interesante utilizar redes neuronales, algoritmos genéticos u alguna otra técnica de procesamiento paralelo que permita la optimización conjunta de los valores límite para la asignación de los biomas.

ANEXO TABLAS

	Clasificación CPTEC PVM CIMA															
	H	D	T	L	SD	BB	BM	Bte	BTr	C	S	P0	P1	P2	P3	
<i>Espinal</i>								3	26	11				6	72	
<i>Chaco Humedo</i>									39		6					
<i>Chaco seco</i>								5	2	32	38				117	
<i>Pampa</i>								1	9						144	
<i>Monte de llanura</i>	1	1			52					43				33	8	
<i>Monte de sierras</i>	1	3	8		9			5			9			14		
<i>Estepa</i>	6	63			54			6						82		
<i>Selva paranaense</i>									10							
<i>Bosque patagónico</i>	2	5	3					6						9		
<i>Puna</i>	18		10		2			4						2	1	
<i>Esteros del Iberá</i>									13		4					
<i>Campos</i>									11							
<i>Selva de la Yunga</i>										1	3			1	12	
<i>Delta</i>	1								12						5	
<i>Altos Andes</i>	35		6					1						6		

Hielo=H; Desierto=D; Tundra=T; Larch=L ;Semidesierto=SD; Bosque Boreal=BB; Bosque mixto=BM; Bosque Templado=BTe; Catinga=C; Bosque tropical=BTr; Sabana=S; Pradera=P0, P1, P2 y P3.

Tabla 2.8.7: corrida control de biomas originales CPTEC-PVM-CIMA sin ajustes comparada con eco-regiones de Parques.

	Clasificación CPTEC-PVM-CIMA														
	H	D	T	L	SD	BB	BM	Bte	BTr	C	S	P0	P1	P2	P3
<i>Espinal</i>					4			3	26	59	8			5	13
<i>Chaco Humedo</i>									39	1	5				
<i>Chaco seco</i>					14			5	2	152	15				6
<i>Pampa</i>								1	9	9	1				134
<i>Monte de llanura</i>	1	1			118					14				4	
<i>Monte de sierras</i>	1	3	8		29			5						3	
<i>Estepa</i>	6	63			103			6						33	
<i>Selva paranaense</i>									10						
<i>Bosque patagónico</i>	2	5	3		3			6						6	
<i>Puna</i>	18		10		2			4						2	1
<i>Esteros del Iberá</i>									13		4				
<i>Campos</i>									11						
<i>Selva de la Yunga</i>					1					6	5			1	4
<i>Delta</i>	1								12						5
<i>Altos Andes</i>	35		6		2			1						4	

Hielo=H; Desierto=D; Tundra=T; Larch=L ;Semidesierto=SD; Bosque Boreal=BB; Bosque mixto=BM; Bosque Templado=BTe; Catinga=C; Bosque tropical=BTr; Sabana=S; Pradera=P0, P1, P2 y P3.

Tabla 2.8.8: corrida control de biomas originales CPTEC-PVM-CIMA con ajustes 1+2+3 comparada con eco-regiones de Parques.

2.9 AJUSTES EN BIOME4

Sobreexpresión de bosques; ajustes; nuevos límites para el establecimiento de TFP leñosos; greendays; runoff; kappa; porcentaje de acuerdo; mejoras en la representación de la pampa y la estepa patagónica.

Introducción:

Como se mencionó previamente, la principal discrepancia entre la corrida control de BIOME4 y el mapa de vegetación de Parques es una sobre expresión de los TFP leñosos, en particular en la pampa y en menor grado en la estepa patagónica.

Se utilizó la siguiente metodología para determinar los ajustes a realizar con el fin de mejorar la representación del modelo en la pampa y la estepa patagónica.

- 1- De la *tabla 2.5.18* se determinaron los TFPs dominantes y el área ocupada (número de celdas de grilla) por ellos en cada eco-región.
- 2- Se verifico que los TFPs que debían en teoría dominar la eco-región (TEMg, en la pampa y WD en la estepa patagónica) tuvieran el potencial de ocupar toda el área en base a las restricciones ecofisiológicas que impone el modelo (*tabla 2.9.5 y figura 2.9.8*). En ambos casos, los TFPs podían ocupar la totalidad del área de la eco-región.
- 3- Del paso anterior se deducía que el problema no era que los TFPs no pudiera estar en el sitio, sino que eran descartados en la competencia con otros TFP que también podían estar en el sitio y eran dominantes. En este contexto había dos tipos de ajustes posibles:

Alterar parámetros de los TFPs: por ejemplo, reducir el porcentaje de raíces en la capa profunda del suelo de los TFPs leñosos (*tabla 2.4.7, fila 6*), favoreciendo en la competencia por el agua a las herbáceas y de esta manera potenciando su posibilidad de dominar.

Fijar nuevas restricciones que limitaran la aparición de los TFPs que dominaban sobre los que debían estar.

En este trabajo, se siguió el segundo procedimiento imponiendo dos nuevas restricciones basadas en los “greendays” y el “runoff” calculados por el modelo en su rutina de “balance hídrico del suelo”.

Definición de “días verdes” (“Greendays”)

El modelo calcula los “greendays” anuales (*Haxeltine y Prentice, 1996*) determinando diariamente la cobertura foliar de la vegetación.

Define la cobertura foliar de la vegetación máxima (maxfvc) como:

$$\text{maxfvc} = 1 - e^{-(kk(\text{pft}) * \text{maxlai})}$$

Donde,

kk= un coeficiente de extinción de la Ley de Beer específico para cada TFP (*tabla 2.4.7*)

maxlai = es el máximo IAF que puede sostener el TFP en ese sitio.

Considera además tres tipos de fenologías posibles:

Perennes (Evergreen): TET, TBET, CCT, BET, WD, TUN, LICH⁶⁶

Caducifolias (Summergreen): TDDT, TEMg, TROg

Caducifolias (Raingreen): TDT, BDT, HER

Para los evergreen considera que la cobertura de la vegetación es constante e igual a la máxima (maxfvc) para todo el año.

Para los summergreen y los raingreen, la cobertura foliar es en general menor a la máxima posible.

En el primer caso, la cobertura de la vegetación es función de la temperatura y los GDD5, mientras que en el segundo es función de la humedad del suelo.

El modelo estima la cobertura de la vegetación para cada día del año y calcula los greendays para un dado TFP e un sitio determinado como:

Si la cobertura foliar de la vegetación > 0

entonces,

$$\text{greendays} = \text{greendays} + 1$$

Escorrentía (runoff)

La escorrentía anual se calcula (*Haxeltine y Prentice, 1996*) a partir de la humedad del suelo y el índice de conductividad hidráulica.

⁶⁶ (**TET**) TROPICAL EVERGREEN TREES; (**TDDT**) TROPICAL DROUGHT-DECIDUOUS TREES (RAINGREENS); (**TBET**) TEMPERATE BROADLEAVED EVERGREEN TREES; (**TDT**) TEMPERATE DECIDUOUS TREES; (**CCT**) COOL CONIFER TREES; (**BET**) BOREAL EVERGREEN TREES; (**BDT**) BOREAL DECIDUOUS TREES; (**TEMG**) C3/C4 TEMPERATE GRASS PLANT TYPE; (**TROG**) C4 TROPICAL GRASS PLANT TYPE; (**WD**) C3/C4 WOODY DESERT PLANT TYPE; (**TUN**) TUNDRA SHRUB TYPE; (**HERB**) COLD HERBACEOUS TYPE; (**LICH**) LICHEN/FORB TYPE.

Ajuste 1: mejora la representación de la pampa.

Materiales y métodos:

La *tabla 2.5.18* indica el porcentaje ocupado por cada TFP⁶⁷ simulado por BIOME4 en la eco-región de la pampa, a saber: TBET (16,9%); TDT (57,8%); CCT (9,7%); TEMg (1,3%) y SAV (14,3%).

Considerando que en la pampa esperamos encontrar el bioma general “*pradera*” y que según la reclasificación establecida en la *tabla 2.5.5* es equivalente al establecimiento del TFP “C3/C4 temperate grass plant type, (TEMg)”, el ajuste a realizar debería incrementar el área ocupada por este TFP en detrimento del resto en la eco-región pampeana.

Aumentar el área ocupada por el TEMg requería primero analizar si este se podía establecer en toda el área correspondiente a la eco-región o si la rutina del modelo que impone límites para la presencia de TFP en un sitio dado (*tabla 2.4.6*) restringía su presencia en alguna parte.

El resultado del análisis fue que el TEMg (TFP 8) podía establecerse en toda el área pampeana (*tabla 2.9.5* y *figura 2.9.8*).

En este contexto, procedimos a buscar algún índice ambiental que mostrara diferencias entre la eco-región pampeana y el resto de las eco-regiones, pero en particular con la del espinal.

Analizamos los índices utilizados por la rutina de restricción eco-fisiológica de BIOME4, *tabla 2.9.6*, pero no encontramos ningún índice que fuera sensiblemente diferente en la región pampeana.

Analizamos otras variables, *tabla 2.9.7*, encontrando que los “greendays” de la pampa (266) eran inferiores a los de todas las demás eco-regiones⁶⁸. Consecuentemente fijar un límite mínimo de 266 “greendays” para el establecimiento de un TFPs leñoso limitaría su presencia en la pampa. En realidad la restricción solo había que imponerla sobre los TFPs que podían estar presentes en la pampa, TBET, TDT y CCT.

Metodología:

Se realizó una corrida de BIOME4 y se obtuvo el promedio por eco-región de los “greendays”, *tabla 2.9.7*.

⁶⁷ (**TBET**) TEMPERATE BROADLEAVED EVERGREEN TREES; (**TDT**) TEMPERATE DECIDUOUS TREES; (**CCT**) COOL CONIFER TREES; (**TEMG**) C3/C4 TEMPERATE GRASS PLANT TYPE; (**SAV**) SAVANA.

⁶⁸ Excepto el bosque patagónico pero los TFPs que se restringieron TBET, TDT y CCT no eran dominantes allí así que no debería verse afectada

Se modificó el código fuente de BIOME4 introduciendo una restricción adicional a la presencia de los tipos funcionales de planta TBET, TDT y CCT en un sitio cuando los “greendays” eran inferiores a 266.

Se corrió nuevamente el modelo con la nueva restricción y evaluaron cambios en el estadístico *kappa*, indicando un mejor grado de acuerdo entre la distribución de biomas producida por la corrida control del modelo y el mapa de parques.

Se realizaron corridas adicionales modificando el valor límite de “greendays” a: 230, 250 y 300.

Resultados:

De los cuatro valores de “greendays” testeados se selecciono, en función de su impacto sobre el estadístico *kappa*, el valor límite mínimo de 250 para el establecimiento en un sitio determinado de los tipos funcionales de planta TBET, TDT y CCT.

	Greendays			
	230	250	266	300
Kappa global	0.4066633	0.5094761	0.5068995	0.5056128

Tabla 2.9.1: kappa vs ajustes en “greendays” de BIOME4.

Ajustes 2: mejora la representación de la estepa patagónica.

Materiales y métodos:

La *tabla 2.5.18* indica el porcentaje ocupado por cada TFP⁶⁹ simulado por BIOME4 en la estepa patagónica, a saber: TDT (0,5%); CCT (22,7%); BET (0,9%); BDT (10,4%); TEMg (0,5%); WD (34,1%); SAV (27,5%); ICE (3,3%).

Considerando que en la estepa patagónica esperamos encontrar el bioma general “*sin vegetación a bioma resistente*” y que según la reclasificación establecida en la *tabla 2.5.5* es equivalente al establecimiento del TFP “C3/C4 woody desert plant, (WD)”, los ajustes a realizar deberían incrementar el área ocupada por este TFP en detrimento del resto en la estepa patagónica.

Aumentar el área ocupada por el WD requería primero analizar si este se podía establecer en toda el área correspondiente a la eco-región o si la rutina del modelo que impone límites para la presencia de TFP en un sitio dado (*tabla 2.4.6*) restringía su presencia en alguna parte.

El resultado del análisis fue que el WD (TFP 10) podía establecerse en toda el área patagónica (*tabla 2.9.5 y figura 2.9.8*).

El ajuste 1 aplicado previamente no solo minimizaba el establecimiento de TBET, TDT y CCT en la pampa sino también en la estepa patagónica.

Consecuentemente el problema se limitaba a hallar algún índice ambiental que restringiera la presencia del tipo funcional de planta BDT en la estepa pero no afectara su presencia en los bosques patagónicos (donde correctamente el modelo lo establecía como dominante).

En este contexto, procedimos a buscar algún índice ambiental que mostrara diferencias entre la estepa patagónica y el resto de las eco-regiones, pero en particular con los bosques patagónicos.

Analizamos los índices utilizados por la rutina de restricción eco-fisiológica de BIOME4, *tabla 2.9.6*, pero no encontramos ninguno que fuera sensiblemente diferente en la estepa patagónica.

Analizamos otras variables, *tabla 2.9.7*, encontrando que el “runoff” de la estepa patagónica (17 mm/año) era inferior al de todas las demás eco-regiones, en particular al de los bosques patagónicos (139 mm/año).

⁶⁹ (**TDT**) TEMPERATE DECIDUOUS TREES; (**CCT**) COOL CONIFER TREES; (**BET**) BOREAL EVERGREEN TREES; (**BDT**) BOREAL DECIDUOUS TREES; (**TEMG**) C3/C4 TEMPERATE GRASS PLANT TYPE; (**WD**)C3/C4 WOODY DESERT PLANT TYPE; (**SAV**) SAVANA; (**ICE**) ICE.

Consecuentemente fijar un límite mínimo⁷⁰ de 20 mm/año de “runoff” para el establecimiento del tipo funcional de planta BDT limitaría su presencia en la estepa patagónica.

Metodología:

Se realizó una corrida de BIOME4 y se obtuvo el promedio por eco-región del “runoff”, tabla 2.9.7.

Se modificó el código fuente de BIOME4 introduciendo una restricción adicional a la presencia de BDT en un sitio cuando el “runoff” era inferior a 266.

Se corrió nuevamente el modelo con la nueva restricción y se evaluaron cambios en el estadístico kappa, indicando un mejor grado de acuerdo entre la distribución de biomas producida por la corrida control del modelo y el mapa de parques.

Resultados:

Las corridas de BIOME4 con el nuevo límite para el establecimiento de BDT en un sitio incrementaron el estadístico kappa de 0,50 (con el ajuste 1) a 0,63.

Kappa global	
Control	0,32
Ajuste 1 (greendays)	0,50
Ajuste 1+2 (greendays y runoff)	0,63

Tabla 2.9.2: kappa vs ajustes en “greendays” and “runoff” de BIOME4.

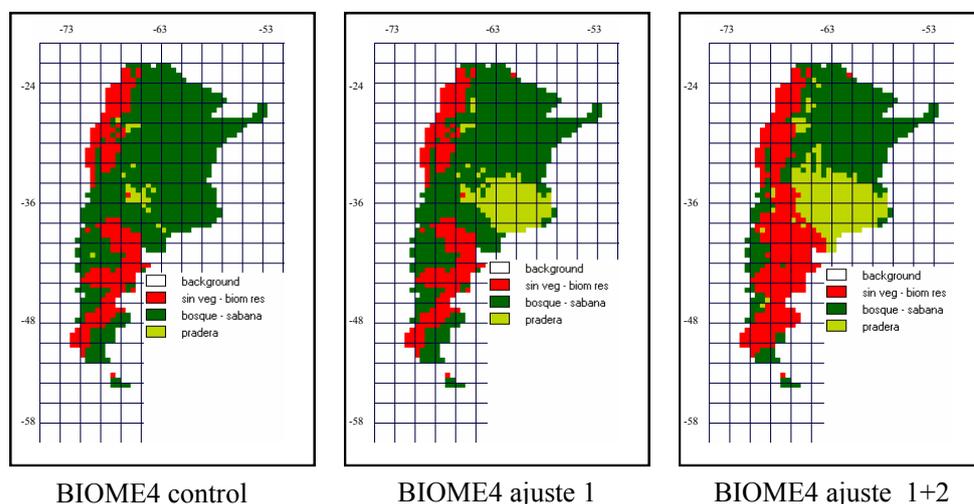


Figura 2.9.3: mapa de distribución de “biomas generales” de BIOME4 control vs BIOME4 ajuste “greendays” vs BIOME4 ajuste “runoff”.

⁷⁰ Al igual que con el ajuste 1 se testearon distintos valores siendo 20 mm/año el que originó el mayor incremento en el estadístico kappa.

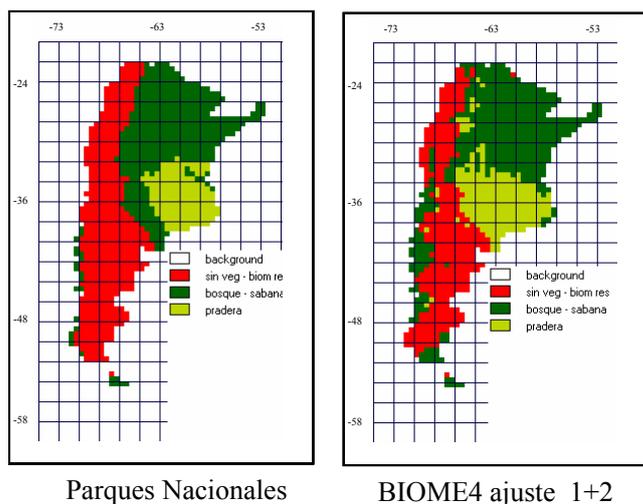


Figura 2.9.4: mapa de distribución de “biomas generales” de BIOME4 control vs BIOME4 ajuste “greendays”+ “runoff”.

Conclusiones y perspectivas a futuro:

Se deberá mejorar la representación de otras regiones, en particular aquellas que aún registran incorrectamente la presencia de tipos funcionales leñosos.

Al igual que en el caso del CPTEC-PVM-CIMA se deberá analizar el efecto de los ajustes implementados sobre la performance global de los modelos.

Anexo Tablas y mapas

BIOME4	Parques						
	pampa	espinal	mont llan	mont sier	estepa	cha hum	cha sec
TDDT	0	0	0	0	0	47	6
TBET	17	42	6	4	0	100	86
TDT	83	58	94	57	66	0	14
CCT	100	100	100	63	88	100	100
BET	0	0	0	35	3	0	0
BDT	0	0	24	65	100	0	2
TEMg	100	100	100	78	100	53	94
TROg	0	0	0	0	0	89	30
WD	100	100	100	80	100	100	100
TUN	0	0	0	20	6	0	0
HERB	0	0	0	43	58	0	0
LICH	0	0	0	45	59	0	0

Tabla 2.9.5: porcentaje del área de la eco-región en el que el TFPs de BIOME4 puede estar presente.

Parques	BIOME4				
	gdd0	gd5	tcm	tmin abs	twm
pampa	5601	3776	8,68	-10	22,4
espinal	6034	4209	9,05	-9,46	24,15
mont llan	5157	3345	6,2	-13,47	22,07
mont sie	3568	2170	1,07	-20,23	16,25
estepa	2952	1457	1,1	-20,41	14,44
cha hum	7657	5832	15,3	-0,33	26,6
cha sec	7040	5217	12,18	-4,93	25,51

Tabla 2.9.6: promedios por eco-región de índices climáticos de BIOME4 (gdd0, gdd5, tcm, tmin y twm)

Parques	BIOME4			
	firedays	greendays	Soil moisture*10	runoff
pampa	84	266	573	29
espinal	152	343	495	37
mont llan	93	365	392	3
mont sie	71	348	429	65
estepa	61	335	278	17
cha hum	7	333	644	14
cha sec	180	345	394	1
bospata	49	266	455	139

Tabla 2.9.7: promedios por eco-región de firedays, greendays, soil moisture, runoff (BIOME4).

Mapas de presencia-ausencia de TFP en BIOME4

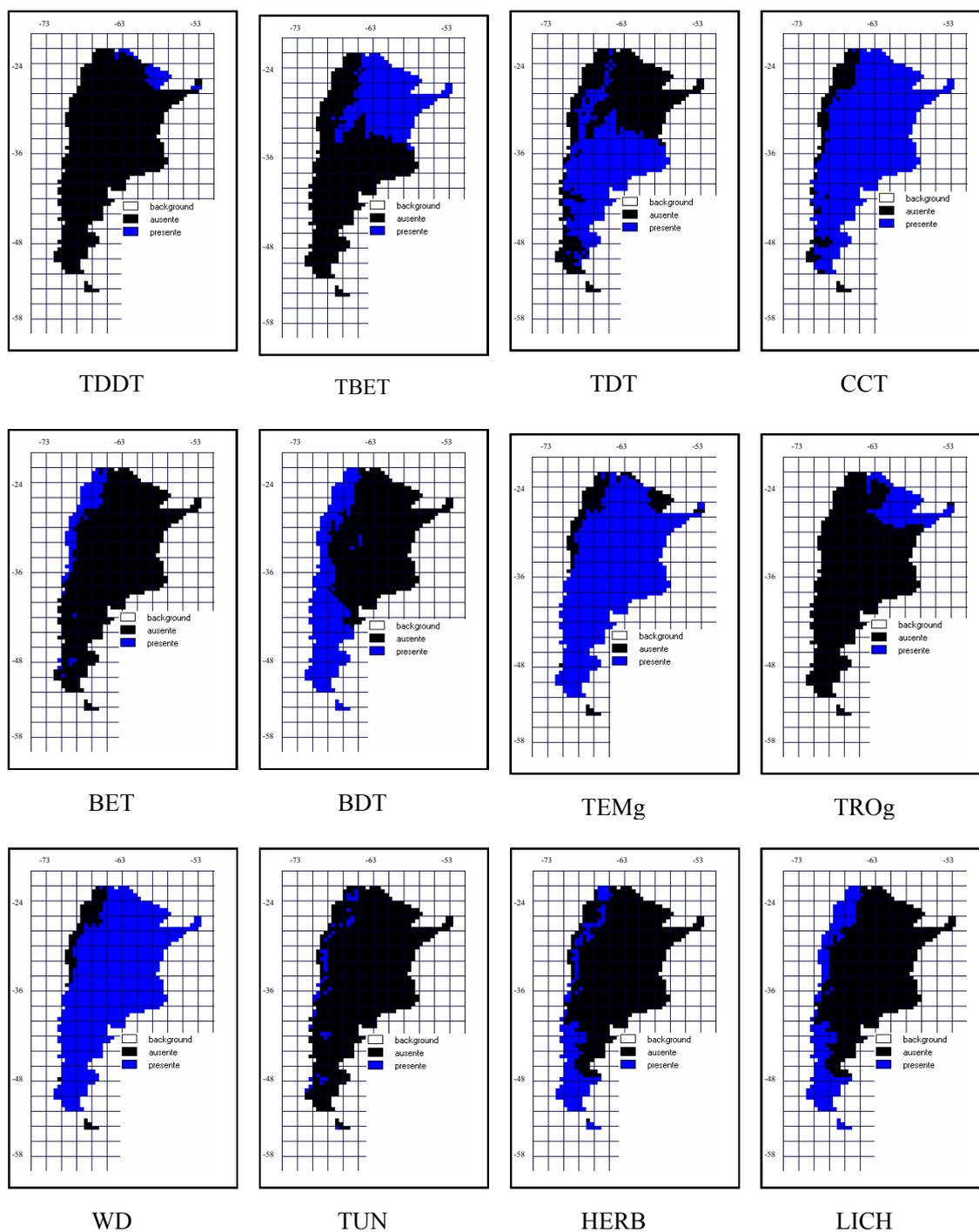


Figura 2.9.8: mapas de distribución de TFP de BIOME4 presentes en Argentina.

(**TET**) TROPICAL EVERGREEN TREES; (**TDDT**) TROPICAL DROUGHT-DECIDUOUS TREES (RAINGREENS); (**TBET**) TEMPERATE BROADLEAVED EVERGREEN TREES; (**TDT**) TEMPERATE DECIDUOUS TREES; (**CCT**) COOL CONIFER TREES; (**BET**) BOREAL EVERGREEN TREES; (**BDT**) BOREAL DECIDUOUS TREES; (**TEMg**) C3/C4 TEMPERATE GRASS PLANT TYPE; (**TROg**) C4 TROPICAL GRASS PLANT TYPE; (**WD**) C3/C4 WOODY DESERT PLANT TYPE; (**TUN**) TUNDRA SHRUB TYPE; (**HERB**) COLD HERBACEOUS TYPE; (**LICH**) LICHEN/FORB TYPE.

2.10 ANALISIS DE SENSIBILIDAD: BIOMAS

Experimentos de sensibilidad; temperatura; precipitación; CO₂; distribución de biomas.

Introducción:

En este capítulo se estudia la sensibilidad de los modelos CPTEC-PVM-CIMA y BIOME4 a cambios en los valores de entrada de la temperatura, precipitación y CO₂. Se analizan los efectos sobre las salidas de distribución de biomas.

Materiales y métodos:

Experimentos de sensibilidad

Se realizaron cinco experimentos de sensibilidad comunes a los dos modelos. Se corrieron los dos modelos con la precipitación y temperatura media mensual (climatología LEM) sumada y/o restada en un 30% de su valor original.

Leyenda	Características del experimento
t+	= tem_lem + (0.30*tem_lem)
p-	= pp_lem - (0.30*pp_lem)
p+	= pp_lem + (0.30*pp_lem)
pt+	= tem_lem + (0.30*tem_lem) y pp_lem + (0.30*pp_lem)
p-t+	= pp_lem - (0.30*pp_lem) y tem_lem + (0.30*tem_lem)

Para BIOME4, adicionalmente se evaluó la sensibilidad a un cambio en la concentración de CO₂ que aumento de 360 ppmv en el control a 740 ppmv en el experimento.

Análisis de los cambios comparando el experimento de sensibilidad con el control

El análisis de los resultados de los experimentos de sensibilidad se hace únicamente sobre las siete eco-regiones seleccionadas previamente. De cualquier manera, en el anexo I a este capítulo se adjuntan los mapas de distribución de biomas generales para todo el territorio en los experimentos y la corrida control de cada modelo.

El número de cambios, expresado como celdas que cambian de tipo de bioma, siempre es *en comparación con las corridas control de los modelos sin ajustes*, no con el mapa de vegetación actual (Eco-regiones de Parques). Por ejemplo, los cambios discriminados por bioma general encontrados en los distintos experimentos se comparan con los valores de las corridas control indicados en la tabla a continuación.

Corridas control	Sin veg	Bos-sab	Pradera
CPTEC-PVM-CIMA	194	235	480

BIOME4	175	709	25
--------	-----	-----	----

Tabla: total de celdas asignadas a cada bioma general por las corridas control de los modelos sin ajustes.

Se analizaron los cambios⁷¹, expresados como celdas que cambian de tipo de bioma, discriminados por:

- 1) experimento;
- 2) experimento y bioma general;

Resultados:

1- Cambios por experimento

El modelo CPTEC-PVM-CIMA es siempre más sensible a los cambios en todos los experimentos con la excepción de p+.

En ambos modelos:

- el experimento que produce la mayor cantidad de cambios es el p-t+.
- hay mas cambios con t+ que con t-
- hay mas cambios con p- que con p+

Los cambios en los experimentos pt+ y pt- no corresponden a la suma de los cambios en los experimentos de temperatura o precipitación por separado, por ejemplo, en BIOME4 la cantidad de cambios en pt+ es menor a la que se da en t+ y p+ por separado

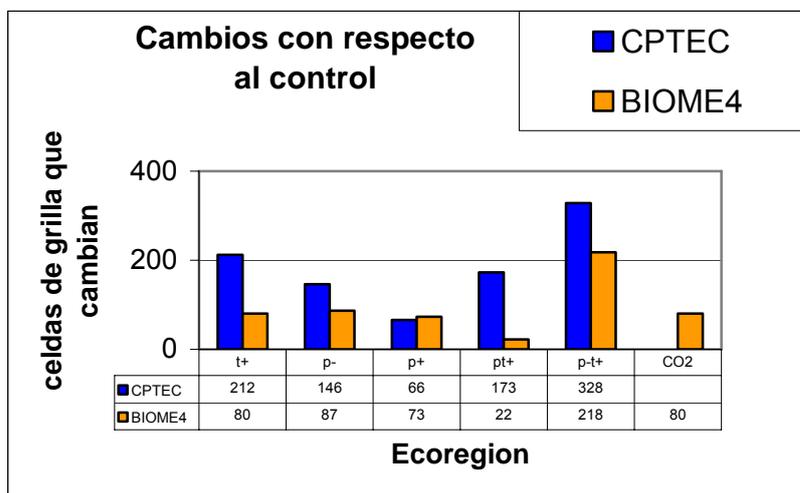


Figura 2.10.1: cambios con respecto a la corrida control (experimentos: t, p, p+, p-, t+, CO₂)

Cambios discriminados por bioma general y experimento

⁷¹ Ver explicación de cómo se calcularon los cambios en los tres casos en el anexo a este capítulo.

CPTEC-PVM-CIMA:

La mayor cantidad de cambios se da en el área en que en la corrida control se representa pradera y casi siempre disminuye su área (excepto en t- y p+).

El experimento en que más disminuye el área ocupada por la pradera es t+ y p-t+.

La categoría sin vegetación-bioma resistente aumenta en mayor medida en p-t+.

El bosque-sabana aumenta en mayor grado en pt+ y en t+.

BIOME4:

La mayor parte de los cambios se da en el área ocupada por bosque-sabana y sin vegetación-bioma resistente, de manera consistente con el hecho de que el modelo simula un área muy pequeña de praderas en la corrida control.

La máxima disminución de pradera se da cuando aumenta el CO₂. Además disminuye el área ocupada por sin vegetación-bioma resistente y aumenta la ocupada por bosque-sabana.

El área ocupada por bosques aumenta en los experimentos t-, p+ y CO₂.

El área ocupada por sin vegetación-bioma resistente aumenta en t+ y p-.

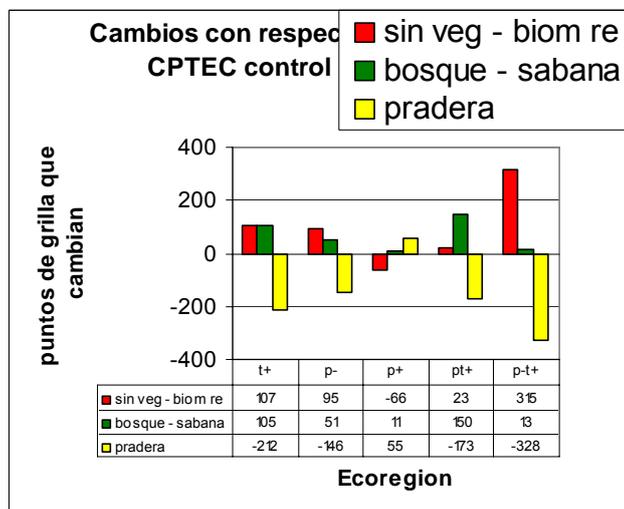
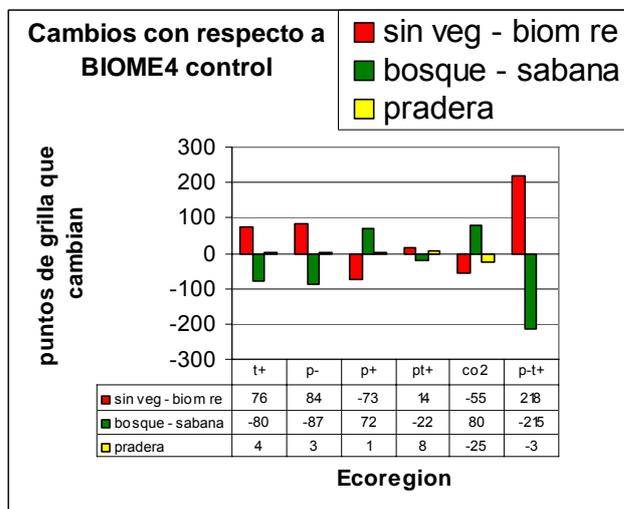


Figura 2.10.2: cambios, discriminados por bioma general, con respecto a la corrida control (experimentos: t⁺, p⁻, p⁺, pt⁺, p-t⁺, CO₂)

Conclusiones y perspectivas:

CPTEC-PVM-CIMA

Los cambios en el bioma presente en la corrida control y el experimento para el CPTEC-CIMA-PVM, responden a los efectos del aumento de la temperatura y/o precipitación, sobre el valor de los índices climáticos utilizados por el algoritmo de clasificación del modelo para definir el bioma presente en una celda dada.

La temperatura tiene un efecto directo sobre los índices t_{min} , $gdd0$ y $gdd5$ e indirecto, a través de su impacto sobre la evapotranspiración potencial, en h y d.

Un aumento en la temperatura conlleva a un aumento en la t_{min} , $gdd5$ y $gdd0$, que en teoría debería incrementar el área ocupada por biomas limitados por la disponibilidad energética como la tundra y el larch.

En la versión original del modelo CPTEC-PVM un aumento de la temperatura favorece la expansión de biomas de menor porte y un aumento en la precipitación la de biomas de mayor porte⁷² (Oyama, 2002).

La explicación dada por (Oyama, 2002) para la respuesta del modelo al aumento de la temperatura, es su efecto incrementando el déficit de presión parcial de vapor que produce una disminución en la apertura estomática. Este hecho, a su vez, produce un decremento en la tasa de $ev_{real}/ev_{potencial}$ disminuyendo consecuentemente el valor del índice hídrico y favoreciendo de esta manera la expansión de biomas de menor porte⁷³.

Vale aclarar, que en la versión simplificada del modelo, CPTEC-PVM-CIMA, los resultados no se pueden explicar en función del déficit de presión de vapor y la apertura estomática, ya que la formulación de la evapotranspiración utilizada no las considera.

BIOME4:

Los cambios observados en el tipo de bioma presente se pueden explicar en función de:

los efectos de la temperatura sobre los índices climáticos (por ejemplo, temperatura mínima absoluta, $gdd5$ y $gdd0$) que restringen la presencia de TFPs en BIOME4.

cambios en la PPN y el IAF que pueden afectar las relaciones de dominancia entre los TFPs. Por ejemplo, con el incremento de la temperatura los TFP C3 ven favorecida su competencia frente a los TFP C4, logrando una PPN superior que puede alterar el balance competitivo que existía previamente en el sitio alterando de esta manera el bioma que puede estar presente.

⁷² Por ejemplo, el bosque se desplaza a áreas ocupadas previamente por cerrado y esta a su vez a áreas ocupadas por catinga.

⁷³ Que ven limitada su presencia en un sitio dado por valores umbral máximos del índice hídrico. Por ejemplo, el semi-desierto solo se establece en un punto de grilla si $h < 0,28$.

ANEXO I

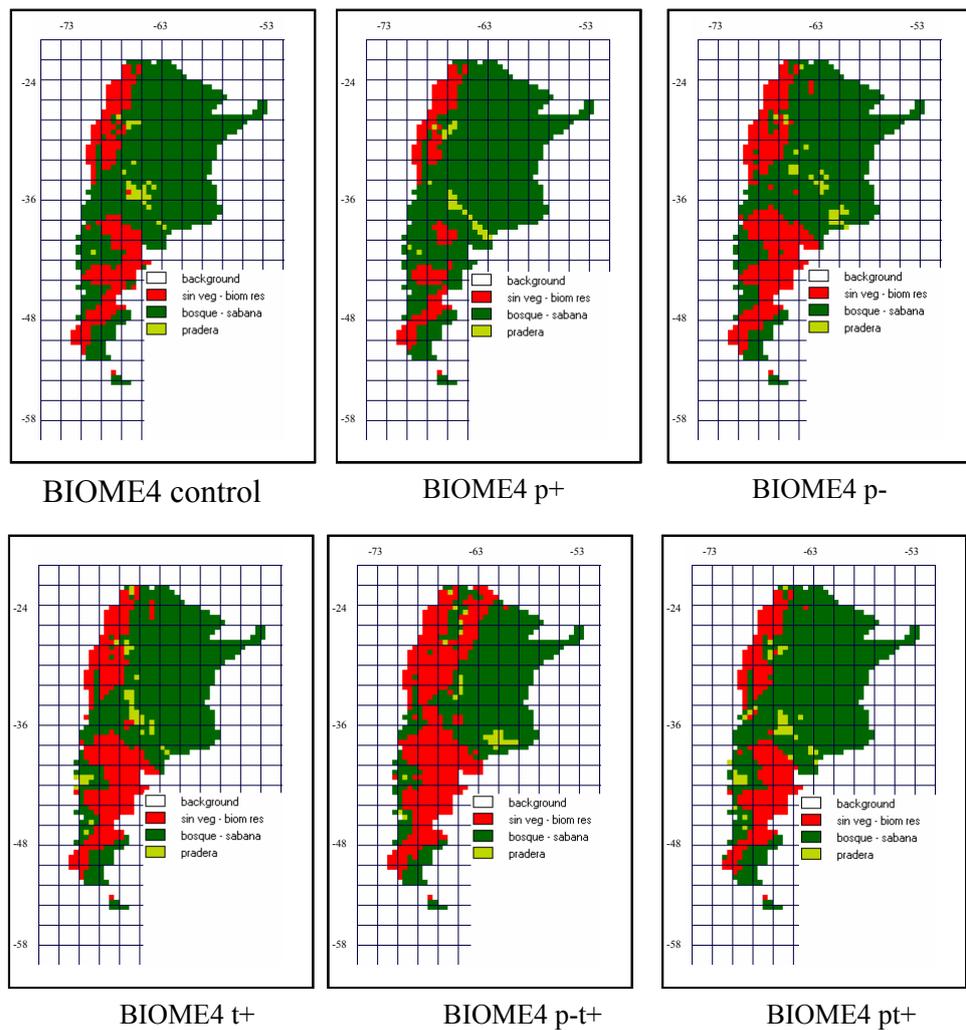


Figura 2.10.3: mapas de distribución de biomas; control y experimentos: t^+ , p^- , p^+ , pt^+ , p^- , t^+ .

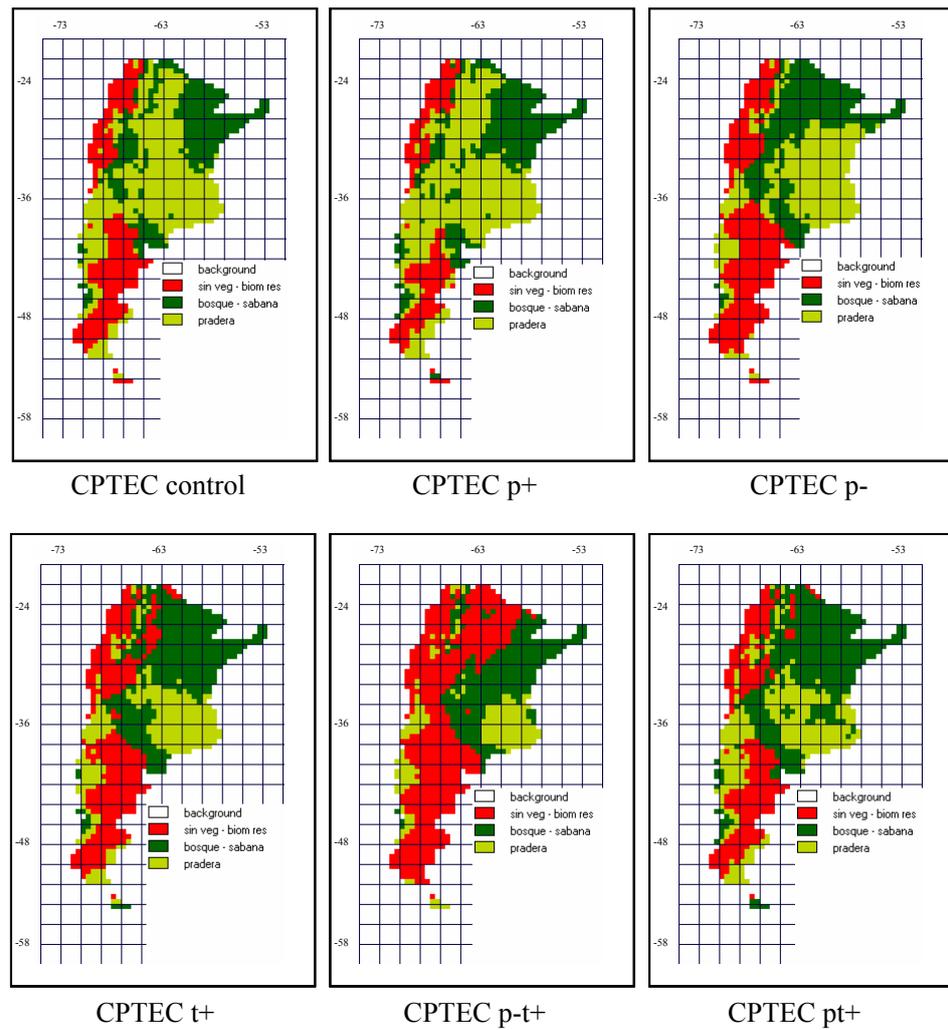


Figura 2.10.4: mapas de distribución de biomás; control y experimentos: t^+ , p^- , p^+ , pt^+ , p^- , t^+ .

ANEXO II

Ejemplo de cálculo de cambios en BIOME4 tmas30 para Espinal

1- A partir de los archivos longitud, latitud, bioma de la corrida control y el experimento se construyen las matrices de confusión por eco-región⁷⁴ en cada caso.

Espinal - corrida control de BIOME4

	s/veg-bio resi	bos-sap	Prad	tot parque
s/veg-bio resi	0	0	0	0
bos-sap	1	101	16	118
prad	0	0	0	0
tot control	1	101	16	118

Espinal – corrida experimento t+30 de BIOME4

	s/veg-bio resi	bos-saba	prad	tot control
s/veg-bio resi	0	1	0	1
bos-saba	2	92	7	101
prad	2	8	6	16
tot exp	4	101	13	118

2- Se resta a la matriz de confusión del experimento (derecha) la del control (izquierda) obteniéndose de esta manea la matriz de diferencias.

Espinal – matriz de diferencias (exper – control)

	s/veg-bio resi	bos-saba	prad	tot control
s/veg-bio resi	0	1	0	1
bos-saba	1	-9	-9	-17
prad	2	8	6	16
tot exp	3	0	-3	0

A partir de esta matriz se pueden calcular:

a- Cambios por eco-región, experimento y bioma generalizado:

	s/veg-bio resi	bos-saba	prad
espinal	3	0	-3

b- Cambios totales por eco-región y experimento = 3

Los Cambios por experimento surgen de sumar (b) para las 7 eco-regiones en cada experimento: Por ejemplo, para BIOME4 t+, el total de cambios es 80.

Los cambios por experimento discriminados por bioma general para BIOME4 t+ son: sin vegetación-bioma resistente=76; bosque-sabana=-80; pradera=4.

Cambios en las eco-regiones en el escenario biome4 t+

⁷⁴ 1092 líneas correspondientes a las celdas de grilla en todo el territorio de Argentina con una resolución de = 0,5 x 0,5 grados. Seleccionando dentro de los 1092 puntos aquellos que corresponden a cada eco-región. Por ejemplo, al espinal le corresponden 118 celdas de la grilla.

	s/veg-bio resi	Bos- saba	prad	Total ecorA2
chaco húmedo	0	0	0	0
espinal	3	0	-3	3
chaco seco	10	-11	1	11
monte de sierras	4	-5	1	5
pampa	0	-1	1	1
monte de llanuras	33	-33	0	33
estepa patagónica	26	-30	4	30
Total	76	-80	4	

2.11 ANALISIS DE SENSIBILIDAD: PPN

Experimentos de sensibilidad; temperatura; precipitación; CO₂; Productividad Primaria Neta (PPN).

Introducción:

Trabajos previos (*Cramer et al., 1999; Ruimy et al., 1999; Churkina et al., 1999*) han estudiado la influencia de la variabilidad espacial y temporal en las condiciones ambientales sobre la PPN simulada por modelos de vegetación. A escala global los modelos muestran discrepancias que obedecen a diferentes formulaciones y parametrizaciones, entre otras, de la temperatura óptima de fotosíntesis, de la conductancia estomática y de la respiración autótrofa.

En este capítulo se estudia la sensibilidad de BIOME4 a cambios en los valores de entrada de la temperatura, precipitación y CO₂ sobre la PPN.

Materiales y métodos:

Corridas y experimentos de sensibilidad: Ver explicación en el capítulo previo 2.10.

Se estimaron los promedios de la PPN anual para las siete eco-regiones de interés.

Resultados:

Cambio en la PPN con respecto al control

Experimento t+30: el monte de llanura y la estepa, que presentan las temperaturas más bajas de las siete eco-regiones en estudio (*figura 2.2.1*), ven incrementada la PPN, sugiriendo que la temperatura podría ser el factor limitante más importante para el crecimiento de la vegetación en esta eco-regiones.

Por el contrario, en el chaco húmedo y seco, que presentan las temperaturas más altas de las siete eco-regiones en estudio (*figura 2.2.1*), la PPN disminuye de manera significativa, posiblemente por los efectos de la temperatura incrementando la transpiración y potenciando el efecto de la falta de agua como factor limitante al crecimiento de la vegetación.

Experimento p+30: aumenta la PPN de las siete eco-regiones, sugiriendo que en todos los casos el agua disponible es un factor que limita el crecimiento de la vegetación. En las eco-regiones donde aumenta menos se puede deber a que la precipitación que había en el control era prácticamente suficiente para satisfacer la demanda.

Experimento p-30: como era de esperar, disminuye la PPN de las siete eco-regiones.

Experimento pt+30: se incrementa la PPN en todas las eco-regiones con la excepción del Chaco seco, sugiriendo que en este último caso la limitación al crecimiento de la vegetación impuesta por el aumento en la temperatura supera a los beneficios generados por el aumento en la precipitación.

Experimento p-30t+30: es el peor caso y como era de esperar se producen decrementos en la PPN para todas las eco-regiones.

Experimento CO₂: como era de esperar, aumenta significativamente la PPN en todas las eco-regiones. Ese hecho obedece al efecto de la fertilización por CO₂ y la mejora en la eficiencia en el uso del agua.

	control	tmas30	pmas30	pmen30	ptmas30	p-30t+30	CO ₂ =740
pampa	1324 (12,54)	1238 (11,77)	1542*** (11,36)	970*** (11,06)	1441** (9,33)	912*** (10,74)	2132*** (16,84)
esp	1093 (35,19)	930 (29,70)	1316* (34,59)	826** (30,62)	1163 (32,85)	648*** (19,47)	1993*** (48,78)
mont llan	418 (16,03)	399 (11,87)	524* (20,76)	316** (11,38)	481 (15,78)	313** (9,08)	875*** (34,98)
mont sier	320 (27,91)	338 (28,96)	386 (33,38)	254 (23,51)	393 (31,76)	272 (24,96)	592** (53,38)
est pat	243 (10,84)	262 (11,88)	294 (12,47)	185 (8,84)	319* (14,1)	199 (9,62)	442*** (18,52)
cha hum	1624 (22,47)	1236** (32,88)	1907 (20,72)	1129*** (27,26)	1670 (37,05)	736*** (26,73)	2653*** (38,70)
cha sec	1033 (15,76)	625*** (16,03)	1303*** (17,56)	732*** (12,19)	885** (18,80)	431*** (13,08)	2044*** (29,44)

Tabla 2.11.1: promedio de PPN por eco-región (error standard). Grillas sombreadas representan incrementos con respecto al control.

Conclusiones y perspectivas:

Dependiendo de la eco-región la PPN se vera en mayor o menor grado limitada por distintos factores ambientales como la temperatura o la precipitación.

Mientras que la disponibilidad de agua puede ser el factor que mas influencia la PPN a escala global (Churkina et al., 1999), múltiples factores ambientales afectan la PPN de manera no lineal y quizás discontinua. Estos resultados implican que la productividad de la vegetación es el resultado de la interacción de varios factores ambientales y que no deberíamos esperar un relación simple entre un factor ambiental y la PPN.

En el futuro se deberá analizar con mayor detalle las interacciones entre múltiples factores ambientales en combinación sobre la PPN simulada.

2.12 CORRIDAS DEL MM5-CIMA

Modelo MM5; escenarios de cambio climático; escenarios climáticos futuros; climatología de Leemans.

Introducción:

En este trabajo no se consideran escenarios climáticos futuros para la precipitación y la temperatura. No se consideran escenarios de cambio en la radiación solar, que mantuvo constante durante todas las corridas⁷⁵.

En este capítulo, se construyeron escenarios climáticos futuros y se compararon promedios pro eco-región entre los valores en la climatología de LEM y los valores de las escenarios futuros.

Materiales y métodos:

La construcción de los escenarios climáticos futuros se realizó (IPCC, 2001) ajustando la climatología de LEM sumándole los Δ precipitación y Δ temperatura (obtenidos de la diferencia entre las corridas control y futura del MM5).

Leyenda	Características del experimento
A2	= $tem_{lem} + (\Delta tem_{MM5 A2})$ y $pp_{lem} + (\Delta pp_{MM5 A2})$
B2	= $tem_{lem} + (\Delta tem_{MM5 B2})$ y $pp_{lem} + (\Delta pp_{MM5 B2})$

Los deltas (Δ) de temperatura y precipitación corresponden a la diferencia entre la corrida control MM5 y la corrida en el escenario futuro.

En el caso de la precipitación, cuando el delta era negativo y su valor supera al valor en la climatología de LEM, se asumió que la precipitación fuera igual a cero, ya que no tiene sentido físico tener precipitaciones negativas.

Resultados:

Cambio en la temperatura anual con respecto al control (Tem LEM): La temperatura anual aumenta en el escenario A2 y en el B2, aunque con mayor intensidad en el A2.

⁷⁵ De cualquier manera, el cambio climático podría estar asociado a una reducción de la energía neta disponible en superficie a través, por ejemplo, de un aumento en la cantidad o el albedo de las nubes que reduzca la radiación de onda corta que llega a la superficie o de un decremento en la nubosidad que aumenta las pérdidas de radiación infrarroja en superficie (Beate, 2005).

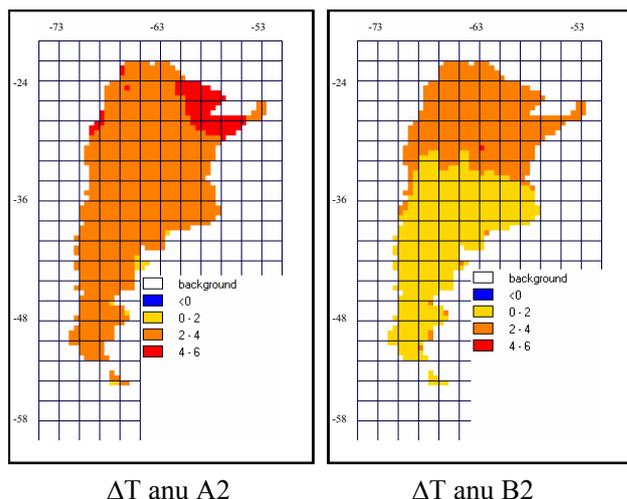


Figura 2.12.1: ΔT anual (MM5 futuro – MM5 control)

Escenarios climáticos futuros de temperatura

El promedio espacial por eco-región se incrementa siempre. Con la excepción del monte de sierras en B2, las diferencias entre el experimento (A2 o B2) y el control fueron siempre significativas.

Eco-regiones	Tem control	Tem A2	Tem B2
pampa	15,34 (0,10)	18,01*** (0,11)	17,18*** (0,12)
espinal	16,57 (0,15)	19,28*** (0,21)	18,53*** (0,20)
Monte de llanuras	14,21 (0,18)	16,39*** (0,18)	15,67*** (0,19)
Monte de sierras	9,06 (0,98)	12,16* (0,94)	11,46 (0,95)
Estepa patagónica	8,07 (0,14)	10,45*** (0,12)	9,46*** (0,13)
Chaco húmedo	21,04 (0,17)	25,0*** (0,19)	23,84*** (0,19)
Chaco seco	19,31 (0,16)	22,85*** (0,18)	21,90*** (0,18)

Tabla 2.12.2: promedio (error standard) de temperatura anual por eco-región de la climatología de LEM y escenarios climáticos futuros A2 y B2.

Cambio en la precipitación anual con respecto al control (pre LEM): se registran incrementos o decrementos dependiendo de la región.

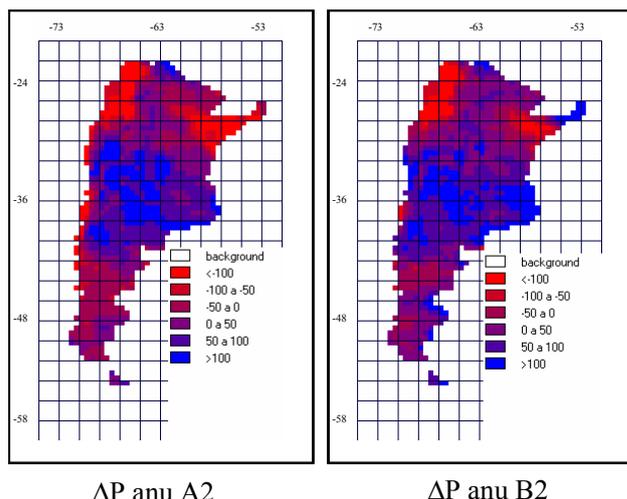


Figura 2.12.3: ΔP anual (MM5 futuro – MM5 control)

Escenarios climáticos futuros de precipitación

El promedio espacial por eco-región de la precipitación anual aumenta siempre (y con mayor intensidad en B2 que en A2) en la pampa, espinal, estepa y chaco seco. La precipitación disminuye en el monte de sierras en B2 y el chaco húmedo para ambos escenarios.

Eco-regiones	Pre control	Pre A2	Pre B2
Pampa	866,36 (9,39)	949,62*** (7,61)	974,4*** (10,07)
Espinal	733,36 (27,94)	795,88** (22,85)	807,88** (24,8)
Monte de llanuras	258,61 (9,77)	340,15*** (11,71)	338,40*** (11,78)
Monte de sierras	303,08 (33,34)	312,3 (25,59)	293,32 (26,07)
Estepa patagónica	175,62 (11,0)	195,89* (10,31)	228,88*** (11,33)
Chaco húmedo	1212,06 (27,10)	1168,31 (26,49)	1196,6 (28,95)
Chaco seco	669,06 (10,96)	698,72* (10,25)	715,48** (11,64)

Tabla 2.12.4: promedio (error standard) de la precipitación anual por eco-región de la climatología de LEM y escenarios climáticos futuros A2 y B2. (celdas sombreadas son incrementos).

Conclusiones y perspectivas a futuro:

La temperatura anual aumenta en el escenario A2 y en el B2, aunque con mayor intensidad en el A2.

La precipitación muestra incrementos o decrementos dependiendo de la región analizada. Los patrones de cambio son similares en el escenario A2 y B2.

A futuro se deberá analizar de patrones de cambio de la precipitación y temperatura estacional para los escenarios climáticos futuros. Esta información será de suma utilidad

para comprender y explicar los cambios observados en los promedios anuales de la escorrentía, IAF y PPN simulados por BIOME4 (ver capítulo 2.15 y 2.16).

2.13 ESCENARIOS CLIMATICOS FUTUROS Y VARIABILIDAD NATURAL

Modelo MM5-CIMA; escenarios de cambio climático; variabilidad natural; diagramas de dispersión.

Introducción:

En este capítulo se estudio la significancia estadística de los cambios en la temperatura y precipitación proyectados por el MM5-CIMA con relación a los cambios esperados por la variabilidad natural del clima, en base a la metodología de Ruosteenoja *et al.* (2003), descripta a continuación:

- 1- Se realizaron corridas de 1000 años con los Modelos de Circulación General CGGM2 y HadCM3 manteniendo constante la composición de la atmósfera y otras forzantes externas.
- 2- Se cálculo, para periodos de 30 años de la corrida del paso 1, el promedio espacial de precipitación y temperatura para distintas regiones del globo⁷⁶ y para las cuatro estaciones del año.
- 3- Se estimó el desvío standard y la correlación entre la precipitación y temperatura para cada uno de los periodos de 30 años.
- 4- Estos tres parámetros definen una distribución normal de dos dimensiones a partir de la cual se puede determinar una elipse que encierra un área centrada e el origen dentro de la cual el 95 % de la densidad de probabilidad de la distribución normal de dos dimensiones está concentrada.
- 5- Se hicieron corridas con distintos MCG forzados con escenarios de concentración del IPCC para tres periodos de tiempo (30 años) centrados en el 2020, 2050 y 2080.
- 6- Se construyeron escenarios de cambio climáticos de precipitación y temperatura en comparación con el periodo base 1960-1990 a partir de estimar promedio espaciales para cada región considerada y para las cuatro estaciones
- 7- Para cada región se construyó un diagrama de dispersión que incluye la elipse (paso 4) y los promedios estacionales de precipitación y temperatura por región obtenidos por cada modelo (paso 6).
- 8- Si el valor de precipitación y temperatura obtenido por el modelo (paso 6) se localiza por fuera de la elipse se puede considerar el cambio climático representado por ese punto como estadísticamente significativo. Si el punto cae adentro de la elipse la señal es del mismo orden de magnitud que la variabilidad interna multi-decádico y consecuentemente no es estadísticamente robusto.

El resultado de este proceso, es una serie de diagramas de dispersión para los tres periodos de tiempo centrados en: 2020, 2050 y 2080 para las distintas regiones del globo. Abajo se muestran los diagramas para la región sur de Sud América en el periodo 2070-2099.

⁷⁶ El trabajo considera 32 regiones del mundo. En esta tesis, se muestran los resultados del trabajo para la región sur de sudamérica.

Region 12: Southern S America (2070–2099)

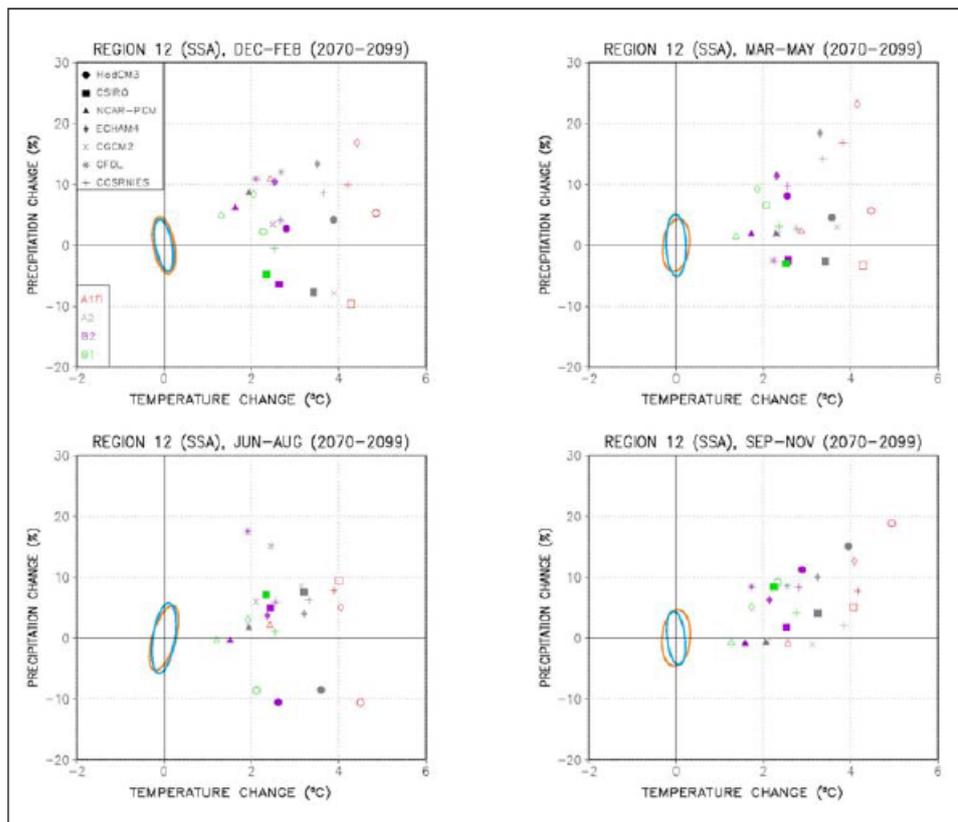


Figura 2.13.1: Diagramas de dispersión (2070-2099) para Sudamérica. Extraído de Ruosteenoja *et al.* (2003).

Analizamos la localización en el diagrama de dispersión de los valores promedio de precipitación y temperatura para la región obtenidos a partir de las corridas del modelo MM5-CIMA, para evaluar estadísticamente si existen diferencias significativas con los valores esperables producto de la variabilidad interna del sistema climático.

Materiales y métodos:

En base a la metodología de Ruosteenoja *et al.* (2003) se estimaron los promedios de temperatura y precipitación obtenidos a partir de las corridas del MM5-CIMA (A2 y B2) en la región sur de Sudamérica de:

- 1) el Δ temperatura, para A2 y B2.
- 2) la $ppCRU + \Delta pp$, para A2 y B2.

Como se describe en la tabla a continuación el dominio espacial sobre el que se estimó el promedio para la región sur Sudamérica es ligeramente distinto al que se utiliza el trabajo de Ruosteenoja para elaborar los diagramas de dispersión. Los periodos de tiempo tampoco son exactamente coincidentes (en el MM5 son 10 años).

	Ventana espacial	Ventana temporal
IPCC diagramas	S Lat = -55	Promedio
Ruosteenoja	N Lat = -20	2070-2099
	W Lon = -75	
	E Lon = -40	
MM5-CIMA	S Lat = -55	Promedio
	N Lat = -20	2080-2090
	W Lon = -75	
	E Lon = -45	

Una vez determinados los promedio estacionales para la región con el MM5-CIMA se localizaron sobre el diagrama de dispersión (figura 2.13.1).

Resultados:

En todos los casos, precipitación y temperatura, los valores obtenidos a partir de las corridas con el MM5-CIMA resultaron significativos. En la figura 2.13.2 se localizaron los valores de la tabla sobre el diagrama de dispersión⁷⁷.

	% Δ P A2	% Δ P B2	Δ T A2	Δ T B2	Δ P Ruosteenoja	Δ T Ruosteenoja
ver	-5,00	16,03	2,97	1,98	5	0,5
oto	23,17	42,71	2,67	1,71	5	0,5
inv	-31,35	27,22	2,98	2,27	5	0,5
pri	-46,14	-27,93	3	2,05	5	0,5

Tabla 2.13.2: Δ T y Δ P de MM5 y Ruosteenoja (2003).

% Δ P A2: es el porcentaje de cambio de la precipitación anual de CRU con respecto al escenario climático futuro A2. Como se explicó antes, este se estima como la precipitación anual de CRU a la que se le suma el Δ P (diferencia entre la precipitación entre la corrida MM5-CIMA A2 futura y MM5-CIMA control).

% Δ P B2: es el porcentaje de cambio de la precipitación anual de CRU con respecto al escenario climático futuro B2.

% Δ T A2: es la diferencia entre la temperatura anual estimada por la corrida del MM5-CIMA A2 futura y la corrida control MM5-CIMA.

% Δ T B2: es la diferencia entre la temperatura anual estimada por la corrida del MM5-CIMA B2 futura y la corrida control MM5-CIMA.

Δ P Ruosteenoja: corresponde al límite de la elipse proyectado sobre el eje horizontal en el diagrama de dispersión (figura 2.13.1) que determina el máximo valor de % Δ P que queda dentro de la elipse.

⁷⁷ Los puntos que están sobre los ejes corresponden a los valores obtenidos por las corridas del MM5-CIMA que quedaban fuera de la escala del diagrama de dispersión.

ΔT **Ruosteenoja**: corresponde al límite de la elipse proyectada sobre el eje vertical en el diagrama de dispersión (*figura 2.13.1*) que determina el máximo valor de ΔT que queda dentro de la elipse.

Si el punto en el diagrama esta localizado por fuera de la elipse, podemos considerar que el cambio climático representado por ese punto es estadísticamente significativo. Si el punto cae dentro de la elipse la señal es del mismo orden de magnitud que la variabilidad interna multidecadal y consecuentemente no es estadísticamente robusto.

Region 12: Southern S America (2070–2099) ■ A2 MM5-CIMA ■ B2 MM5-CIMA

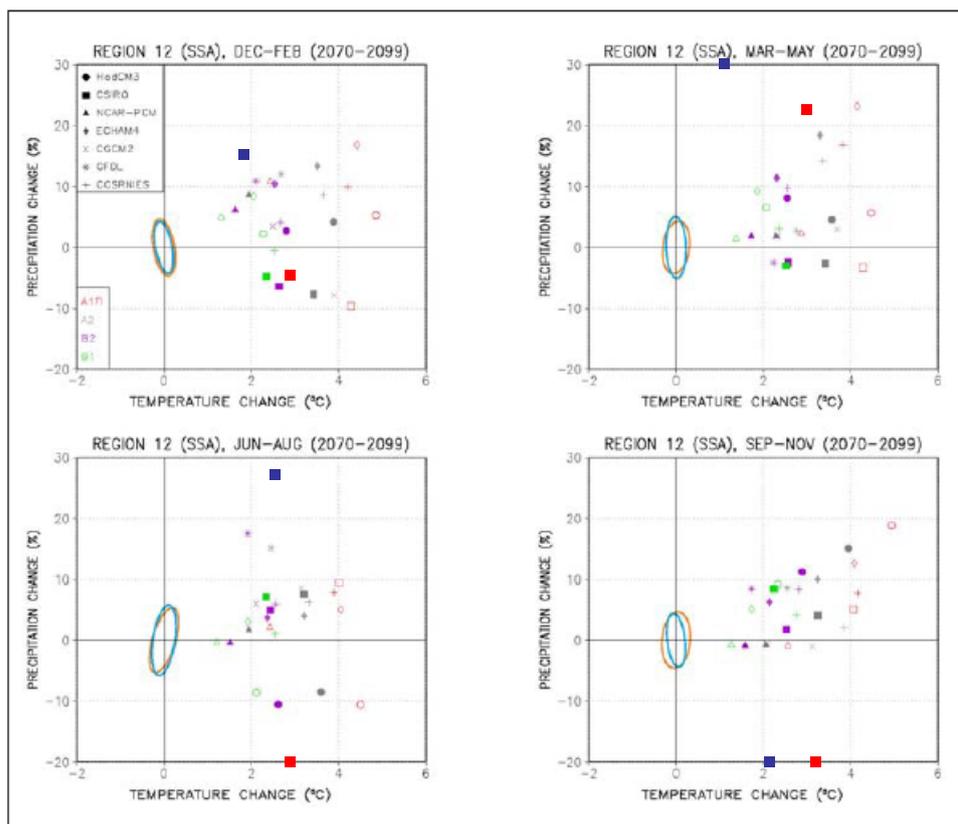


Figura 2.13.3: Diagramas de dispersión (2070-2099) para Sudamérica incluyendo los puntos (cuadrados en rojo y azul) para el MM5-CIMA.

Conclusiones y perspectivas a futuro

En cuanto a la variabilidad natural en todos los casos se observa que los valores son significativos y consecuentemente las diferencias no pueden ser explicadas por la variabilidad natural.

2.14 CORRIDAS CON ESCENARIOS CLIMATICOS FUTUROS: BIOMAS

Escenarios climáticos futuros; corridas futuras de los modelos de vegetación; cambio en el tipo de bioma; incremento en el área ocupada por bosque-sabana; monte de llanuras; estepa patagónica; chaco seco.

Introducción:

En este capítulo se analiza la distribución de biomas simulada por el CPTEC-PVM-CIMA y el BIOME4 para los escenarios climáticos futuros.

Materiales y métodos:

Se realizaron corridas de CPTEC-PVM-CIMA y BIOME4 con los escenarios climáticos futuros A2 y B2 (*ver explicación en el capítulo 2.12*).

Leyenda Características del experimento

A2 = $tem_lem + (\Delta tem\ MM5\ A2)$ y $pp_lem + (\Delta pp\ MM5\ A2)$

B2 = $tem_lem + (\Delta tem\ MM5\ B2)$ y $pp_lem + (\Delta pp\ MM5\ B2)$

Adicionalmente para BIOME4 se hicieron corridas incrementando la concentración atmosférica de CO₂ de 360 a 740 ppmv.

Leyenda Características del experimento

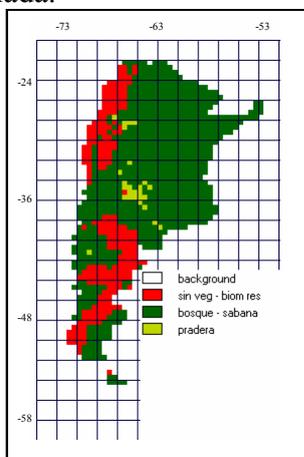
A2 CO₂ = $tem_lem + (\Delta tem\ MM5\ A2)$ y $pp_lem + (\Delta pp\ MM5\ A2)$ y CO₂ =740

B2 CO₂ = $tem_lem + (\Delta tem\ MM5\ B2)$ y $pp_lem + (\Delta pp\ MM5\ B2)$ y CO₂ =740

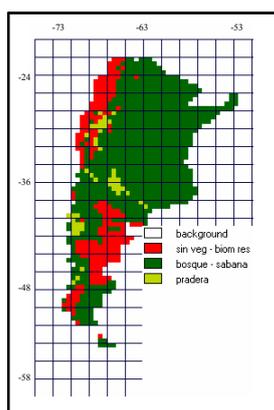
Para la comparación entre los mapas de vegetación futuro y control se utilizó la misma metodología que para los experimentos de sensibilidad (*ver explicación en el capítulo 2.10*).

Resultados:

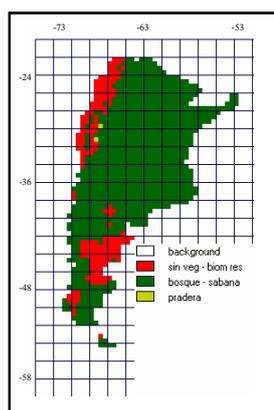
BIOME4: se observa siempre un incremento con respecto al control en el área ocupada por bosques-sabana. Incorporando el efecto fisiológico del CO₂ (A2 CO₂ y B2 CO₂) la respuesta es aún más pronunciada.



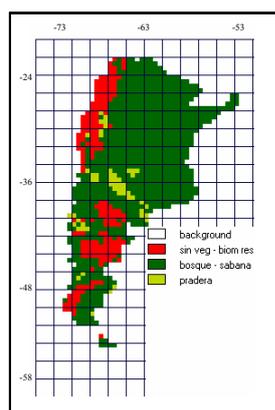
BIOME4 control



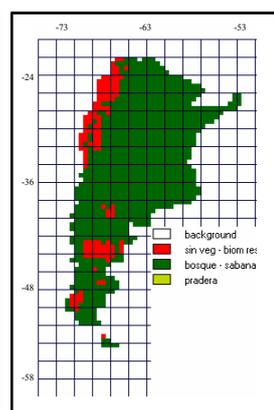
BIOME4 A2



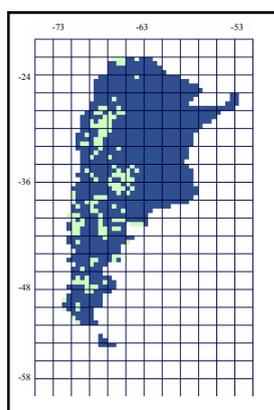
BIOME4 A2 CO2



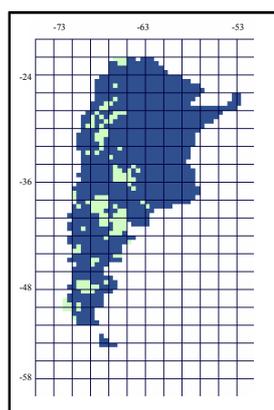
BIOME4 B2



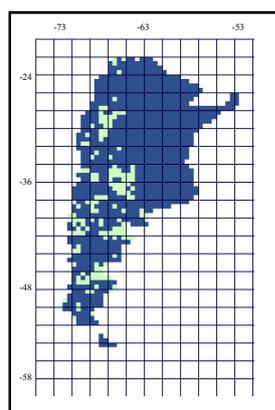
BIOME4 B2 CO2



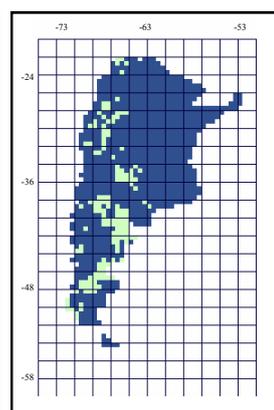
Area común control y A2



Area común control y A2 CO2



Area común control y B2



Area común control y B2 CO2

Figura 2.14.1: mapas de distribución de biomas de BIOME4 corrida control y escenarios climáticos futuros (A2, B2, A2 CO₂, B2 CO₂).

Los mapas de área común entre la corrida control y las corridas con escenarios climáticos futuros, muestran que la mayor cantidad de cambios se da en la eco-región de monte y la estepa patagónica (y en menor medida parte del espinal).

CPTEC-PVM: Al igual que en el caso de BIOME4, se observa siempre un incremento con respecto al control en el área ocupada por bosques-sabana. Considerando los mapas de área común se observa que los mayores cambios se den en la región del chaco seco y el monte de llanuras.

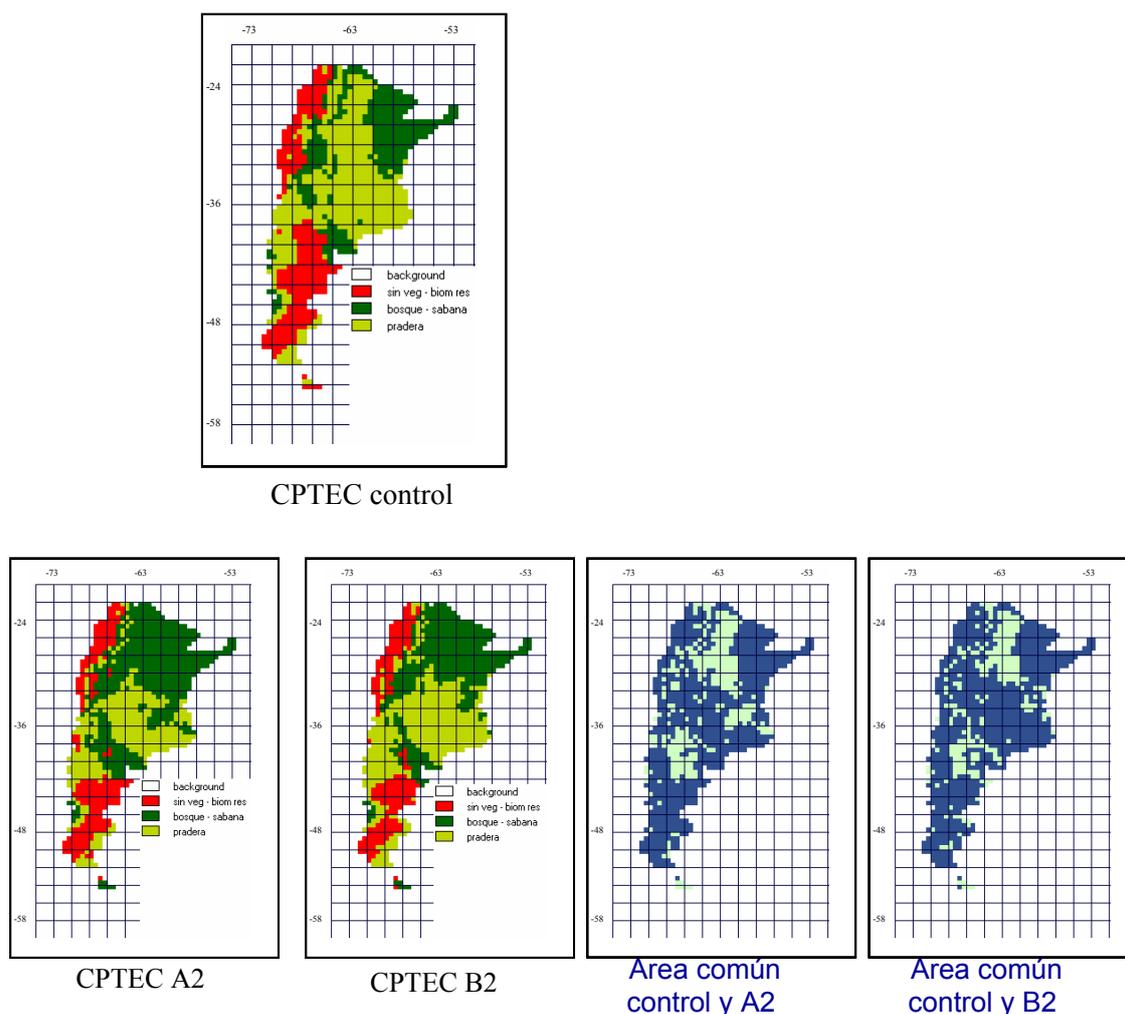


Figura 2.14.2: mapas de distribución de biomas de CPTEC-PVM-CIMA corrida control y escenarios climáticos futuros (A2, B2, A2 CO₂, B2 CO₂).

Cambios totales discriminados por experimento

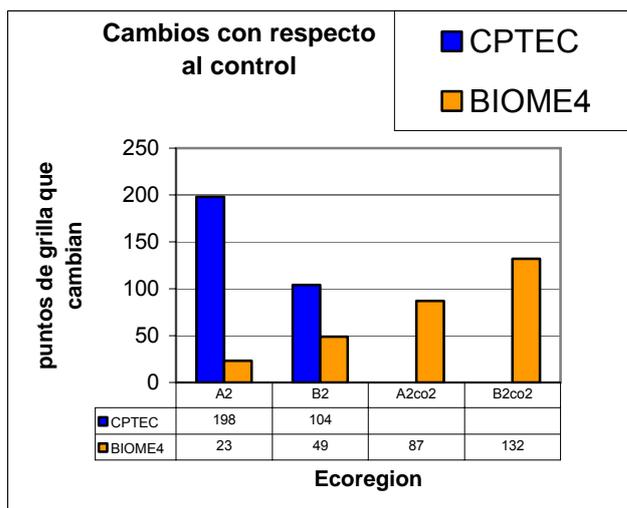


Figura 2.14.3: cambios con respecto al control de BIOME4 y CPTEC-PVM-CIMA con escenarios climáticos futuros (A2, B2, A2 CO₂, B2 CO₂).

Como era de esperar a partir del resultado de los experimentos de sensibilidad los cambios totales en A2 y B2 son mayores siempre para CPTEC.

En CPTEC los cambios son superiores para el escenario A2 que para el B2 mientras que para BIOME4 es al revés.

BIOME4 muestra un notable aumento en el número de cambios cuando se agrega al cambio climático el efecto fisiológico de aumentar la concentración de CO₂.

Cambios totales discriminados por bioma general y experimento

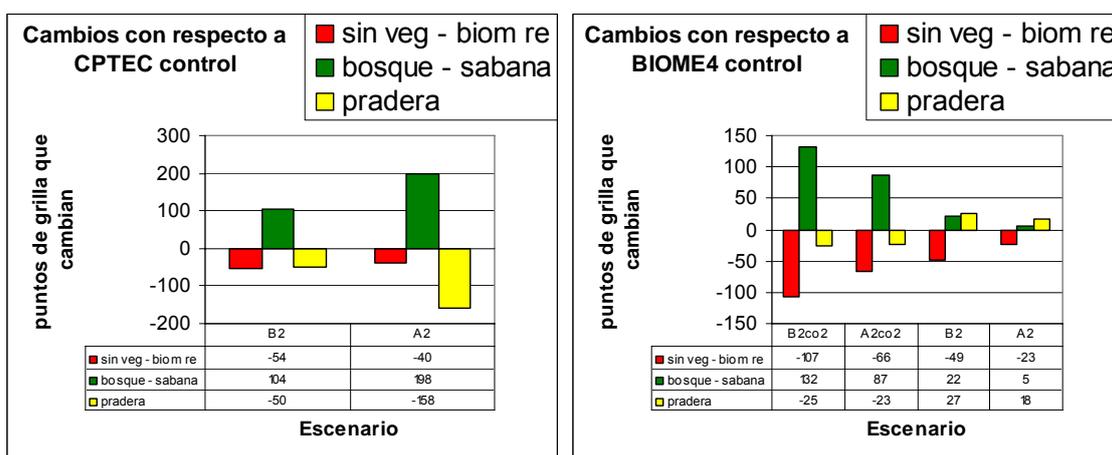


Figura 2.14.4: cambios con respecto al control, discriminados por biomas generales, de BIOME4 y CPTEC-PVM-CIMA con escenarios climáticos futuros (A2, B2, A2 CO₂, B2 CO₂).

CPTEC: En A2 y B2 aumenta el área de bosque. En el primer caso a expensas de la pradera. En B2 disminuye sin veg transformándose en bosque y pradera.

BIOME4: En todos los casos aumenta el área de bosque (pero mucho más con CO₂) y disminuye sin vegetación.

Cambios totales discriminados por experimento y por eco-región

CPTEC: En el A2 y B2 los que más cambian son Chaco seco y monte de llanuras.

BIOME4: Los que más cambian son monte de llanuras y estepa patagónica.

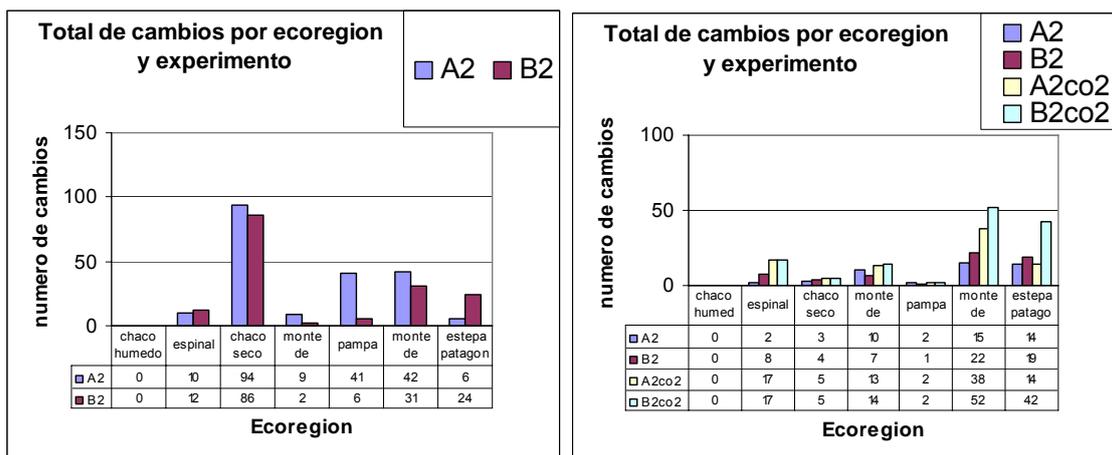


Figura 2.14.5: cambios con respecto al control, discriminados por eco-región, de BIOME4 y CPTEC-PVM-CIMA con escenarios climáticos futuros (A2, B2, A2 CO₂, B2 CO₂).

Conclusiones y perspectivas a futuro:

El modelo CPTEC-PVM-CIMA es más sensible a los cambios en el clima que el BIOME4 que muestra una respuesta más conservadora.

En CPTEC los cambios son superiores para el escenario A2 que para el B2 mientras que para BIOME4 es al revés. Considerando que en el escenario A2 el incremento de la temperatura es superior, tentativamente podría existir una mayor sensibilidad del modelo CPTEC al incremento en la temperatura (hecho que también se desprende de los experimentos de sensibilidad mencionados en un capítulo previo).

BIOME4 muestra un notable aumento en el número de cambios cuando se agrega al cambio climático el efecto fisiológico vinculado al aumento de la concentración de CO₂.

Ambos modelos coinciden en predecir incrementos en el área ocupada por bosque-sabana y en que la eco-región de monte de llanuras resulta un área particularmente susceptible a sufrir cambios en el tipo de bioma presente.

2.15 CORRIDAS CON ESCENARIOS CLIMATICOS FUTUROS: PPN, IAF Y ESCORRENTIA.

Productividad Primaria Neta; Índice de Area Foliar; escorrentía; control vs. experimento; escenarios climáticos futuros

Introducción:

En este capítulo se analizan las salidas de Productividad Primaria Neta, Índice de Area Foliar y Escorrentía para todo el territorio y por eco-región.

Materiales y métodos:

Corrida de BIOME4 con los escenarios climáticos futuros A2 y B2: ver explicación en el capítulo previo.

Se realizaron promedios espaciales de la PPN para las siete eco-regiones de interés.

Resultados:

Análisis de todo el territorio

La PPN registra aumentos en los escenarios A2 y B2 en la región sur y parte del centro del territorio y decrementos en el NEA y parte del NOA. Los escenarios que consideran el efecto fisiológico (A2 CO₂ y B2 CO₂) del CO₂ registran incrementos superiores.

$$\Delta PPN = PPN_{\text{experimento}} - PPN_{\text{control}}$$

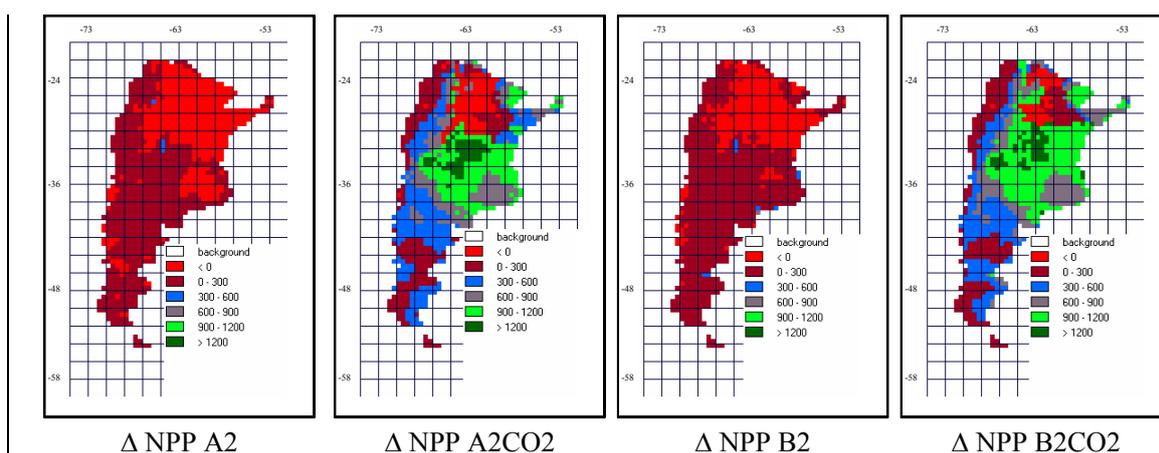


Figura 2.15.1: mapas de distribución de ΔPPN (corrida escenario climático futuro – corrida control).

IAF₁₀₀ muestra incrementos y decrementos en los escenarios A2 y B2 en todo el territorio. Los escenarios que consideran el efecto fisiológico (A2 CO₂ y B2 CO₂) del

CO₂ registran casi siempre incrementos y de mayor magnitud, que en los experimentos sin CO₂.

$$\Delta IAF_{100} = IAF_{100, \text{experimento}} - IAF_{100, \text{control}}$$

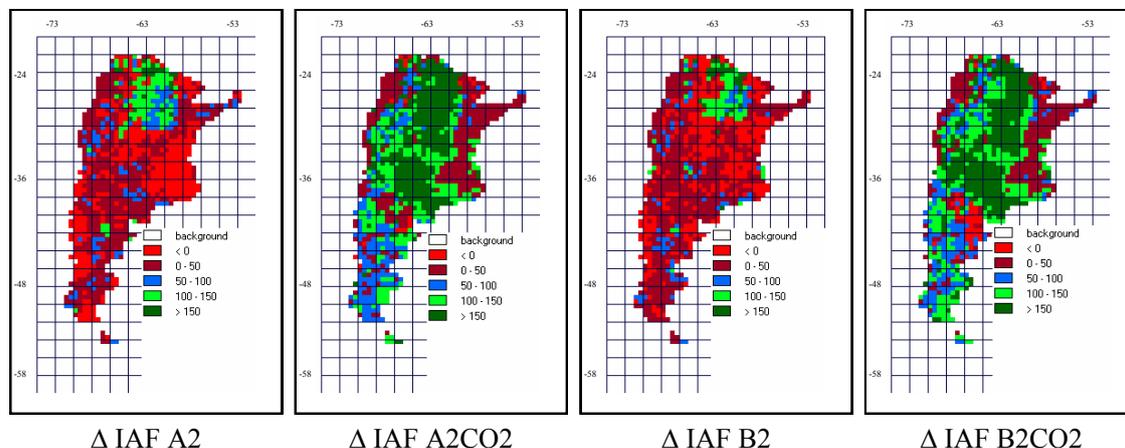


Figura 2.15.2: mapas de distribución de ΔIAF_{100} (corrida escenario climático futuro – corrida control).

La escorrentía anual (mm) registra incrementos en la mayor parte del territorio y con mayor intensidad en la pampa. Se registran decrementos en el NEA.

$$\Delta \text{Runoff} = \text{Runoff}_{\text{experimento}} - \text{Runoff}_{\text{control}}$$

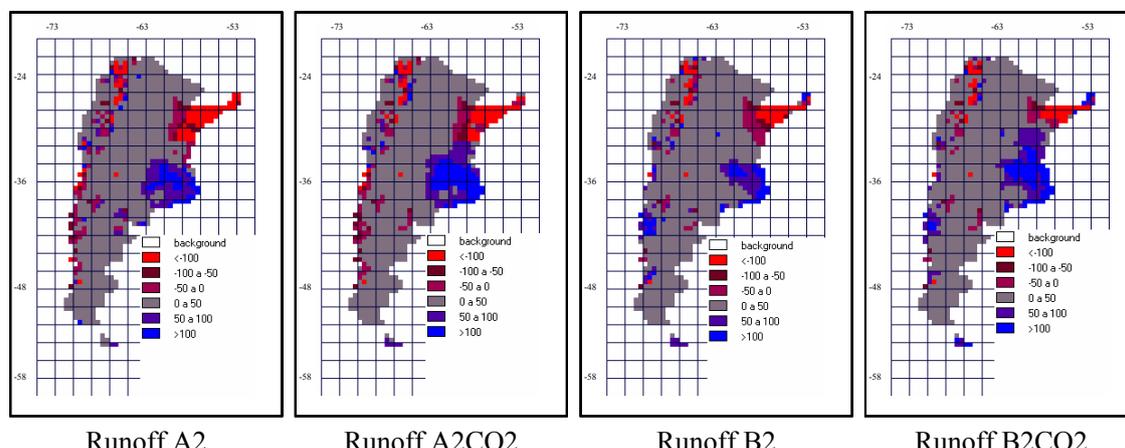


Figura 2.15.3: mapas de distribución de escorrentía (corrida escenario climático futuro – corrida control).

Análisis de promedios espaciales por eco-región

La PPN en los escenarios A2 y B2 se incrementa en todas las eco-regiones con la excepción del chaco húmedo y seco. Conforme a lo esperado, los escenarios que

consideran el efecto fisiológico (A2 CO₂ y B2 CO₂) del CO₂ registran incrementos superiores.

PPN	Control	A2 CO ₂	A2	B2 CO ₂	B2
pampa	1324 (12,54)	2333*** (16,93)	1347 (8,59)	2323*** (15,68)	1406 (8,91)
esp	1093 (35,19)	2046*** (39,35)	1091 (24,72)	2195*** (42,36)	1172 (28,15)
mont llan	418 (16,03)	1065*** (35,56)	504** (16,20)	1081*** (37,09)	512** (17,59)
mont sier	320 (27,91)	725*** (48,07)	395 (28,13)	700*** (48,80)	376 (27,03)
est pat	243 (10,84)	559*** (20,28)	292 (11,20)	599*** (19,28)	317** (11,12)
cha hum	1624 (22,47)	2120* (64,78)	1294* (36,95)	2261** (70,02)	1399 (40,83)
cha sec	1033 (15,76)	1289 (37,45)	718*** (18,35)	1580*** (36,50)	846*** (17,36)

Tabla 2.15.4: promedio por eco-región de PPN anual (gC /m²). En sombreado incrementos con respecto al control.

El IAF registra incrementos en el escenario A2 y B2 para todas las eco-regiones con la excepción de la Pampa. Conforme a lo esperado, los escenarios que consideran el efecto fisiológico (A2 CO₂ y B2 CO₂) del CO₂ registran incrementos y de mayor magnitud en todas las eco-regiones.

IAF ₁₀₀	Control	A2 CO ₂	A2	B2 CO ₂	B2
pampa	343,23 (4,86)	448,86*** (0,77)	308,22** (1,86)	451,46*** (0,98)	337,97 (4,09)
esp	249,87 (8,06)	419,68*** (4,27)	258,14 (7,37)	424,66*** (3,82)	251,27 (6,62)
mont llan	134,72 (3,05)	229,89*** (5,53)	145,69 (3,12)	215,47*** (6,91)	139,1 (3,05)
mont sier	123,67 (11,79)	228,83*** (13,55)	142,0 (12,55)	222,34*** (13,58)	140,26 (12,72)
est pat	108,35 (5,22)	188,42*** (6,0)	113,37 (3,73)	200,89*** (6,88)	121,45 (4,5)
cha hum	389,73 (8,08)	445,54*** (2,55)	419,42 (3,88)	452,75*** (2,84)	405,75 (4,66)
cha sec	225,32 (5,14)	391,15*** (5,09)	289,02*** (6,07)	381,40*** (5,49)	271,30*** (7,20)

Tabla 2.15.5: promedio por eco-región de IAF₁₀₀ anual (m² /m²). En sombreado incrementos con respecto al control.

La escorrentía presenta incrementos en todos los escenarios para la Pampa y el Chaco seco. Los escenarios que consideran el efecto fisiológico (A2 CO₂ y B2 CO₂) del CO₂ registran mayores incrementos.

Runoff	Control	A2 CO ₂	A2	B2 CO ₂	B2
--------	---------	--------------------	----	--------------------	----

pampa	29,58 (2,96)	131,46*** (5,96)	93,75*** (4,88)	119,05*** (7,34)	88,37*** (5,87)
esp	37,52 (8,18)	25,69 (5,31)	16,71 (3,70)	54,41 (10,74)	38,59 (8,46)
mont llan	3,02 (0,89)	2,63 (0,98)	9,60*** (1,79)	2,12 (0,79)	7,10 (1,65)
mont sier	65,77 (20,25)	16,51 (5,41)	12,40 (3,75)	13,83 (8,19)	12,02 (6,19)
est pat	17,53 (4,12)	13,68 (3,79)	17,29 (4,02)	26,79 (5,29)	31,96 (6,06)
cha hum	14,66 (4,22)	0*** (0)	0*** (0)	8,11 (3,5)	3,64** (1,68)
cha sec	1,09 (0,73)	2,38 (1,03)	2,05 (1,02)	4,96 (1,91)	3,53 (1,58)

Tabla 2.15.6: promedio por eco-región de escorrentía anual (mm). En sombreado incrementos con respecto al control.

Conclusiones y perspectivas a futuro:

En general en los escenarios A2 y B2 se registran incrementos en la PPN, IAF y escorrentía que son consistentes con la tendencia hacia un incremento en el área ocupada por la vegetación leñosa.

En los escenarios con efecto fisiológico del CO₂ se registran incrementos mayores en la PPN, IAF y escorrentía.

2.16 BIOME4: ANALISIS INTEGRAL DE LAS SALIDAS

Análisis por eco-región; Productividad Primaria Neta; Índice de Área Foliar; escorrentía; patrones de cambio e interrelaciones; textura del suelo; precipitación; temperatura; control vs. experimento.

Introducción:

En este capítulo, se integran y analizan en conjunto las salidas de BIOME4 en detalle para las siete eco-regiones seleccionadas.

Materiales y Métodos:

El análisis de los resultados se hizo de manera más detallada para siete eco-regiones, que en conjunto representaban el 80% del territorio: *pampa, espinal, monte de sierras, monte de llanuras, estepa, chaco húmedo y chaco seco*. Los valores de las tablas representan los promedios espaciales para cada eco-región. Los experimentos con escenarios climáticos futuros se expresan como porcentaje de incremento o decremento con respecto a la climatología control de LEM, para precipitación y temperatura, y a la corrida control de BIOME4, para la escorrentía, IAF₁₀₀ y PPN.

En las tablas para cada eco-región se indica en sombreado los incrementos y en negritas los valores significativos.

Resultados:

Pampa:

Control			Pampa – BIOME 4			
			Incremento/Decremento con respecto al control			
			A2	A2 CO ₂	B2	B2 CO ₂
pp (mm/año)	866,36	pp (%)	9,61	9,61	12,47	12,47
tem (°C)	15,38	tem (%)	17,04	17,04	11,99	11,99
Escurr. (mm/año)	29,5	Escurr. (%)	216,93	344,42	198,74	302,46
IAF ₁₀₀ (m ² /m ²)	343	IAF ₁₀₀ (%)	-10,20	30,77	-1,53	31,53
PPN (gC/m ² año)	1324	PPN (%)	1,74	76,21	6,19	75,45
Area	Gruesa	25				
Textura (# celdas)	Media	54				
	Fina	75				
Area	sveg-bres	0	sveg-bres	0	0	0
Bioma (# celdas)	bos-sav	152	bos-sav	154	154	153
	Pradera	2	pradera	0	0	1

Tabla 2.16.1: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región de la pampa.

En ambos escenarios se registran aumentos en la precipitación y temperatura.

El escurrimiento se incrementa en todos los escenarios, pero con mayor intensidad en los que consideran el efecto fisiológico del CO₂. Probablemente esto se debe a que el incremento en la Eficiencia en el Uso del Agua disminuye los requerimientos de extraer humedad del suelo y consecuentemente produce un escurrimiento mayor.

El IAF registra incrementos en los escenarios con CO₂ y decrementos en los escenarios sin CO₂. Con respecto a este último tipo de respuesta no se ha encontrado una explicación biológica para fundamentarla.

La PPN se incrementa en todos los casos y como era de esperar con mayor intensidad en los escenarios que consideran el efecto fisiológico del CO₂.

No encontramos una explicación apropiada por la cual en los escenarios A2 y B2 se observa un decremento en el IAF pero la PPN se incrementa. Lo esperable sería que al disminuir el IAF entonces disminuyera la fotosíntesis y consecuentemente la Productividad Primaria Bruta y posteriormente la Productividad Primaria Neta.

Prácticamente no se registran cambios en el tipo de bioma presente en cada celda con relación al control. Vale aclarar, como se mencionó previamente que el modelo simula erróneamente en la corrida control un bosque-sabana donde debería haber una pradera.

Espinal:

Control			Espinal – BIOME 4				
			Incremento/Decremento con respecto al control				
			A2	A2 CO ₂	B2	B2 CO ₂	
pp (mm/año)	733,36	pp (%)	8,52	8,52	10,16	10,16	
tem (°C)	16,57	tem (%)	16,35	16,35	11,82	11,82	
Ecurr. (mm/año)	37,5	Ecurr. (%)	-55,46	-31,52	2,85	45,01	
IAF ₁₀₀ (m ² /m ²)	249	IAF ₁₀₀ (%)	3,30	67,95	4,14	69,95	
PPN (gC/m ² año)	1093	PPN (%)	-0,18	87,19	7,23	100,82	
Area	Gruesa	64					
Textura	Media	4					
(# celdas)	Fina	50					
Area	sveg-bres	0	sveg-bres	1	0	0	0
Bioma	bos-sav	101	bos-sav	103	118	94	118
(# celdas)	Pradera	16	pradera	14	0	24	0

Tabla 2.16.2: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región del espinal.

En ambos escenarios se registran aumentos en la precipitación y temperatura, aunque en diferentes proporciones. En el escenario A2 el aumento de la temperatura es mayor y el de la precipitación es menor con respecto al escenario B2.

El escurrimiento se reduce en el escenario A2 y aumenta en el B2, de mayor manera en el B2CO₂. Estos resultados pueden estar fundamentados en las diferencias en el balance entre la demanda adicional de agua de la atmósfera (debida al incremento en la temperatura) y la provisión adicional (debida al aumento en las precipitaciones), pareciendo predominar el primer factor, en A2 y el segundo en B2.

El IAF registra incrementos en todos los escenarios, con mayor intensidad en los escenarios con CO₂. En los escenarios A2 y A2 CO₂ aumenta el IAF a pesar de que se registran decrementos en el escurrimiento, lo que se podría explicar dado que el aumento en la demanda de agua de la atmósfera requiere de una mayor utilización y queda menos sobrante.

La PPN aumenta en todos los escenarios excepto en el A2, aunque la disminución es prácticamente insignificante. En el resto de los casos, parece haber una correlación positiva entre el IAF y la PPN.

En los escenarios con CO₂, como era de esperar, existe una tendencia al incremento en el área de bosque-sabana. En el B2 se incrementa la pradera, mientras que el A2 permanece prácticamente constante.

Monte de llanuras:

Control			Monte de llanuras – BIOME 4				
			Incremento/Decremento con respecto al control				
			A2	A2 CO ₂	B2	B2 CO ₂	
pp (mm/año)	258,61	pp (%)	31,53	31,53	30,85	30,85	
tem (°C)	14,1	tem (%)	15,34	15,34	10,27	10,27	
Escurr. (mm/año)	3	Escurr. (%)	217,88	-12,91	135,09	-29,80	
IAF ₁₀₀ (m ² /m ²)	134	IAF ₁₀₀ (%)	8,14	70,64	3,25	59,93	
PPN (gC/m ² año)	418	PPN (%)	20,57	154,78	22,49	158,61	
Area	Gruesa	71					
Textura	Media	49					
(# celdas)	Fina	18					
Area	sveg-bres	65	sveg-bres	50	27	43	13
Bioma	bos-sav	73	bos-sav	85	111	91	125
(# celdas)	Pradera	0	pradera	3	0	4	0

Tabla 2.16.3: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región del monte de llanuras.

En ambos escenarios se registran aumentos en la precipitación y temperatura. En el escenario A2 el aumento en la temperatura es mayor que en B2.

El escurrimiento se incrementa en los escenarios sin CO₂ pero registra decrementos en los escenarios A2 CO₂ y B2 CO₂. Si bien se espera que un incremento en el CO₂ mejore la EUA el decremento del escurrimiento se podría deber al aumento de la PPN y el IAF en estos escenarios.

El IAF y la PPN aumentan, y con mayor intensidad con CO₂, en todos los escenarios.

Monte de sierras:

Control			Monte de sierras– BIOME 4			
			Incremento/Decremento con respecto al control			
			A2	A2 CO ₂	B2	B2 CO ₂
pp (mm/año)	303,08	pp (%)	3,04	3,04	-3,22	-3,22

tem (°C)	9,12	tem (%)	34,21	34,21	26,49	26,49	
Ecurr. (mm/año)	65,7	Ecurr. (%)	-81,14	-74,89	-81,72	-78,97	
IAF ₁₀₀ (m ² /m ²)	123	IAF ₁₀₀ (%)	14,82	85,03	13,41	79,78	
PPN (gC/m ² año)	320	PPN (%)	23,44	126,56	17,50	118,75	
Area Textura (# celdas)	Gruesa	37					
	Media	9					
	Fina	3					
Area Bioma (# celdas)	sveg-bres	29	sveg-bres	19	16	22	17
	bos-sav	18	bos-sav	19	31	19	32
	Pradera	2	pradera	11	2	8	0

Tabla 2.16.4: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región del monte de sierras.

En ambos escenarios se registran aumentos en la temperatura (con mayor intensidad en el A2). Con respecto a la precipitación el A2 registra incrementos y el B2 decrementos.

El escurrimiento decrece en todos los escenarios, hecho que puede estar vinculado al considerable aumento registrado en la temperatura (con escaso cambio en la precipitación) que resulta en una mayor demanda atmosférica de agua y una reducción en el agua de escurrimiento.

El IAF y la PPN aumentan, y con mayor intensidad con CO₂, en todos los escenarios. Tentativamente el crecimiento de la vegetación en esta eco-región no estaría limitado por agua sino por la temperatura.

Estepa:

Control			Estepa – BIOME 4				
			Incremento/Decremento con respecto al control				
			A2	A2 CO ₂	B2	B2 CO ₂	
pp (mm/año)	175,62	pp (%)	11,54	11,54	30,32	30,32	
tem (°C)	8,08	tem (%)	29,49	29,49	17,22	17,22	
Ecurr. (mm/año)	17,5	Ecurr. (%)	-1,36	-21,96	82,31	52,82	
IAF ₁₀₀ (m ² /m ²)	108	IAF ₁₀₀ (%)	4,63	73,89	12,09	85,40	
PPN (gC/m ² año)	243	PPN (%)	20,16	130,04	30,45	146,50	
Area Textura (# celdas)	Gruesa	60					
	Media	127					
	Fina	24					
Area Bioma (# celdas)	sveg-bres	79	sveg-bres	80	66	60	38
	bos-sav	131	bos-sav	117	145	136	173
	Pradera	1	pradera	14	0	15	0

Tabla 2.16.5: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región de la estepa patagónica.

En ambos escenarios se registran aumentos en la temperatura (con mayor intensidad en el A2) y la precipitación (con mayor intensidad en el B2).

El escurrimiento disminuye en los escenarios A2 y aumenta en los B2. Este hecho se puede explicar a partir de que la relación pp/tem es negativa en A2 y positiva en B2.

El IAF y la PPN aumentan, y con mayor intensidad con CO₂, en todos los escenarios.

Chaco húmedo:

Control			Chaco Húmedo – BIOME 4				
			Incremento/Decremento con respecto al control				
			A2	A2 CO ₂	B2	B2 CO ₂	
pp (mm/año)	1212,06	pp (%)	-3,60	-3,60	-1,27	-1,27	
tem (°C)	21,01	tem (%)	18,82	18,82	13,30	13,30	
Escurr. (mm/año)	14,6	Escurr. (%)	-100,00	-100,00	-75,17	-44,67	
IAF ₁₀₀ (m ² /m ²)	389	IAF ₁₀₀ (%)	7,61	14,32	4,11	16,17	
PPN (gC/m ² año)	1624	PPN (%)	-20,32	30,54	-13,85	39,22	
Area	Gruesa	3					
Textura	Media	13					
(# celdas)	Fina	28					
Area	sveg-bres	0	sveg-bres	0	0	0	0
Bioma	bos-sav	45	bos-sav	45	45	45	45
(# celdas)	Pradera	0	pradera	0	0	0	0

Tabla 2.16.6: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región del chaco húmedo.

En ambos escenarios se registran aumentos en la temperatura (con mayor intensidad en el A2) y decrementos en la precipitación, correspondientes a la condición más desfavorable para el crecimiento de la vegetación.

El escurrimiento decrece en todos los escenarios llegando a su punto límite en el escenario A2.

El IAF se incrementa en todos los casos y la PPN decrece en los escenarios sin CO₂.

Chaco seco:

Control			Chaco seco – BIOME 4				
			Incremento/Decremento con respecto al control				
			A2	A2 CO ₂	B2	B2 CO ₂	
pp (mm/año)	669,06	pp (%)	4,43	4,43	6,93	6,93	
tem (°C)	19,32	tem (%)	18,33	18,33	13,41	13,41	
Escurr. (mm/año)	1	Escurr. (%)	88,07	118,34	223,85	355,04	
IAF ₁₀₀ (m ² /m ²)	225	IAF ₁₀₀ (%)	28,27	73,59	20,40	69,27	
PPN (gC/m ² año)	1033	PPN (%)	-30,49	24,78	-18,10	52,95	
Area	Gruesa	103					
Textura	Media	61					
(# celdas)	Fina	30					
Area	sveg-bres	0	sveg-bres	2	0	1	0
Bioma	bos-sav	189	bos-sav	191	194	193	194
(# celdas)	Pradera	4	pradera	1	0	0	0

Tabla 2.16.7: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región del chaco seco.

En ambos escenarios se registran aumentos en la temperatura (con mayor intensidad en el A2) y en la precipitación.

El escurrimiento y el IAF se incrementan en todos los escenarios.

La PPN decrece en los escenarios sin CO₂

Conclusiones y perspectivas a futuro:

La interpretación biológica de las variaciones (incrementos o decrementos) de la PPN, IAF o escorrentía a partir del análisis de los promedios espaciales anuales por eco-región puede llevar a confusiones⁷⁸. Por tal motivo, a futuro se debería hacer un análisis:

- detallado por celda y considerando los valores mensuales, al menos para los patrones de cambio que se dan con mayor frecuencia (*ver tabla en el anexo*) para permita verificar la fundamentación biológica de los procesos simulados pro el modelo y discrimine los artefactos propios del modelo.
- de correlación, por eco-región, entre los cambios en los cambios en la precipitación, temperatura, escorrentía, IAF y PPN. Determinar los factores que limitan la PPN en cada eco-región.

⁷⁸ Entre otras por la existencia de valores extremos, sobre todo en las eco-regiones con menor cantidad de celdas, y la importancia de la estacionalidad para entender los promedios anuales.

ANEXO:

Interrelaciones entre variaciones en la precipitación, temperatura, escurrimiento, el IAF y la PPN: del total de celdas de grilla que cubren el territorio argentino (1092) se identificaron y contabilizaron los patrones de variación cualitativos, incremento y decrementos⁷⁹, para las cinco variables en tres escenarios: A2, B2 y A2 CO₂.

Experimento A2	Frecuencia	Experimento B2	Frecuencia	Experimento A2 CO ₂	Frecuencia
+++++	369	+++++	487	+++++	655
++++-	135	++++-	178	++++-	6
+++--	112	+++--	89	+++--	0
++---	7	++---	7	++---	0
-+--+	23	-+--+	6	-+--+	3
-+--+	60	-+--+	33	-+--+	4
-+---	30	-+---	22	-+---	0
-+++-	17	-+++-	7	-+++-	8
-+---	25	-+---	22	-+---	129
-++++	50	-++++	36	-++++	138
-+++--	53	-+++--	35	-+++--	2
+++--+	100	+++--+	112	+++--+	63
++--+	8	++--+	4	++--+	0
-++-+	73	-++-+	23	-++-+	47
++-++	11	++-++	17	++-++	35
++-+-	19	++-+-	14	++-+-	2
TOTAL	1092	TOTAL	1092	TOTAL	1092

Tabla 2.16.8: cada signo significa incremento (+) o decremento (-) de las variables ordenadas como: precipitación, temperatura, escurrimiento, IAF y PPN. En negritas los patrones para los que se registró la mayor frecuencia de casos.

En el escenario A2 los patrones que se dieron con mayor frecuencia fueron: 1) incremento en las 5 variables; 2) incremento en todas excepto PPN; 3) incrementos en todas excepto PPN e IAF.

En el escenario B2 los patrones que se dieron con mayor frecuencia fueron: 1) incremento en las 5 variables; 2) incremento en todas excepto PPN; 3) incrementos en todas excepto el IAF.

En el escenario A2 CO₂ los patrones que se dieron con mayor frecuencia fueron: 1) incremento en las 5 variables; 2) incremento en todas excepto precipitación; 3) incrementos en todas excepto precipitación y escurrimiento.

⁷⁹ Incremento o decremento con respecto a la climatología control de LEM, para precipitación y temperatura, y a la corrida control de BIOME4, para la escurrimiento, IAF₁₀₀ y PPN.

2.17 FUNCIONES DE RESPUESTA DE IMPACTO CLIMATICO Y ANALISIS INVERSO DE IMPACTOS

CIRF; análisis inverso de impactos; límite tolerable; nivel de emisiones de CO₂; Chaco seco; decremento en la Productividad Primaria Neta.

Introducción:

La “función de respuesta al cambio climático”, CIRF, por sus siglas en inglés, representa la relación entre variables del cambio climático global, como la concentración atmosférica de CO₂ e indicadores seleccionados de impactos.

En este capítulo se estimó una “función de respuesta de impacto climático” para la Productividad Primaria Neta del Chaco Seco utilizando la metodología descrita en Toth et al. (2000).

Dicha metodología consiste en:

- 1- Especificar un punto definido por una temperatura, precipitación y CO₂ de inicio (climatología presente) y un punto final (por ejemplo, escenario climático futuro 3X CO₂).
- 2- Seleccionar el número de estados intermedios a considerar entre el punto de inicio y final (por ejemplo, 100 estados intermedios).
- 3- Interpolarse linealmente el CO₂, la precipitación y la temperatura a los 100 estados intermedios a partir del estado inicial y final.
- 4- Correr el modelo de vegetación con los 100 estados intermedios (CO₂, temperatura y precipitación) y analizar las salidas (por ejemplo, tipo de bioma o PPN).

Posteriormente se realizó un *ejercicio ilustrativo* de un “análisis inverso de impactos”.

Considerando:

- a- las emisiones de CO₂ acumuladas globales que permiten estabilizar la concentración de CO₂ atmosférico en 550 ppm (IPCC, 2001);
- b- el porcentaje de emisiones de Argentina sobre el total global (*Pew Center, 2004*); y
- c- la tasa de emisiones de CO₂ de Argentina (Inventario de GEI, 1997)

se determinó que se requeriría una reducción del 10% en las emisiones anuales de CO₂ del país para que el impacto del cambio climático en un escenario climático futuro (MM5-A2) no produzca un decremento en la PPN de la región chaqueña superior al 15%.

Materiales y métodos:

Metodología para elaborar Funciones de Respuesta de Impacto Climático (CIRF)

- *Estado inicial:* temperatura y precipitación de LEM (1961-1990). Se considera $CO_2 = 370$ ppm.
- *Estado final:* escenario climático futuro generado por MM5 (2081-2090) a partir de: LEM+ $\Delta A2$. Se considera $CO_2 = 670$ ppm.
- *Tipo de corrida:* no se considero efecto fisiológico del CO_2 .
- *Estados intermedios:* se consideran 10 estados intermedios estimados a partir de un interpolación lineal:
$$\text{variable}_{\text{interpolada}} = \text{variable}_{\text{control}} + ((\text{variable}_{\text{futuro}} - \text{variable}_{\text{control}}) / 50)$$
- *Modelo de vegetación:* se corrió BIOME4 utilizando como entrada los 10 valores de precipitación y temperatura.
- *Productividad Primaria Neta:* se graficó el promedio espacial para el Chaco seco de la PPN para cada uno de los 10 estados intermedios.

Metodología para análisis inverso de impactos

- Se determinó como valor umbral máximo tolerable⁸⁰ un decremento de la PPN de 15%.
- Se identificó el estado intermedio en el que se alcanza ese decremento y la concentración atmosférica de CO_2 correspondiente.
- Se estimó el patrón de emisiones que permite estabilizar la concentración atmosférica de CO_2 en ese nivel.
- Se comparó ese patrón con las emisiones actuales y proyectadas para determinar el nivel de reducción de emisiones requerido.

Resultados:

La corrida de BIOME4 con los estados intermedios (escenarios de temperatura y precipitación interpolados), indica un decremento de la PPN con el aumento en la concentración atmosférica de CO_2 (y el cambio en el clima asociado).

⁸⁰ La elección de dicho valor podría responder por ejemplo a la capacidad máxima de adaptación ante ese impacto o a la suposición de que los avances tecnológicos esperados pueden absorber dicho impacto.

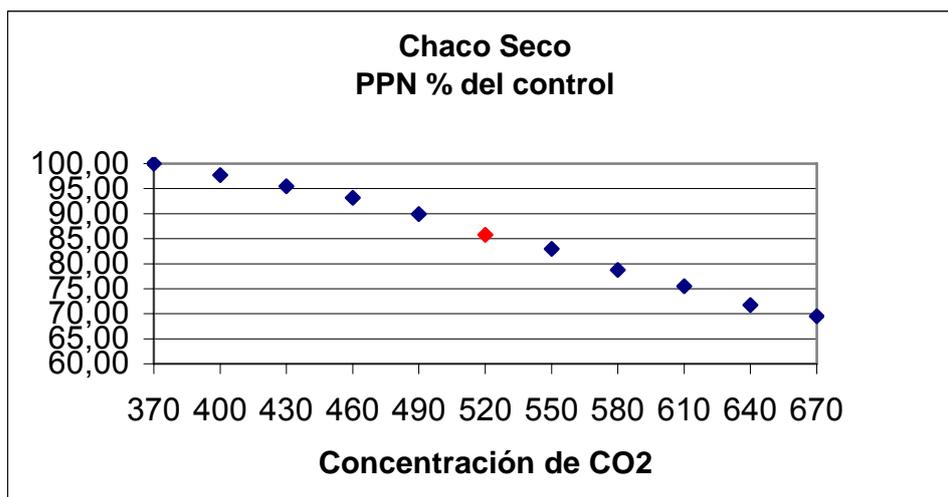


Figura 2.17.1: decremento porcentual respecto al control de la PPN del Chaco Seco a lo largo de distintos estados intermedios caracterizados en función de la concentración atmosférica de CO₂.

El punto rojo indica el valor de concentración de CO₂ atmosférica (y de condiciones de cambio climático asociadas) para el cual la PPN decrece un 15% con respecto al control.

Este valor se fija como el máximo tolerable y corresponde a una concentración atmosférica de CO₂=520 ppm. Para concentraciones de CO₂ superiores, la productividad primaria cae por debajo del nivel máximo aceptable.

Utilizando en forma inversa un modelo de ciclo de carbono (ej. BERN-CC o ISAM) habría que estimar los patrones de emisión posibles para estabilizar la concentración de CO₂ en 520 ppm.

A manera de ejemplo, en este trabajo consideramos el escenario de estabilización WRE 550 descrito en el Tercer Informe de Evaluación (IPCC, 2001).

Figura 25: Emisiones de CO₂ proyectadas que permiten estabilizar las concentraciones atmosféricas de CO₂ en distintos valores finales. El recuadro a) muestra las trayectorias hipotéticas de la concentración de CO₂ (escenarios WRE) y los recuadros b) y c) muestran las emisiones de CO₂ proyectadas por dos modelos de ciclo rápido del carbono: el Bern-CC y el ISAM. Para calcular el margen de variación del modelo en el escenario ISAM, se calibró el modelo de manera de aproximar el margen de variación de las respuestas al CO₂ y al clima obtenidas mediante una comparación entre los modelos. Este método genera un menor nivel de incertidumbre en la respuesta del ciclo del carbono. Los márgenes de variación del modelo en el escenario Bern-CC se obtuvieron mediante la combinación de distintas hipótesis de valores mínimos y máximos con respecto al comportamiento del efecto de fertilización por CO₂, la respuesta de la respiración heterotrófica a la temperatura y el tiempo de renovación de los océanos, lo que dio como resultado un mayor nivel de incertidumbre en la respuesta del ciclo del carbono. El borde superior y el borde inferior del sector sombreado indican el valor máximo y el valor mínimo correspondientes a cada modelo. A su vez, los valores mínimos (donde quedan ocultos) se indican con una línea fina discontinua en un tono más claro. [Basado en la Figura 3.13]

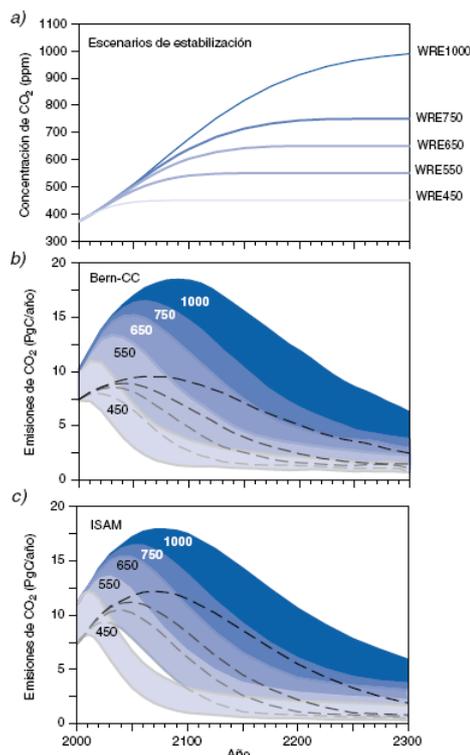


Figura 2.17.2: escenarios de estabilización de CO₂. Extraída del Tercer Informe de Evaluación: Cambio Climático 2001, La base científica (IPCC)

Perfil de estabilización		550
Emisiones CO ₂ (GtC/año)	2050	6,4 – 12,6
	2100	2,7 – 7,7
Emisiones acumuladas CO ₂ (GtC)	2001-2100	590 - 2030
Año en que las emisiones:	alcanzan punto máximo	2020-2030
	descienden por debajo de niveles de 1990	2030-2100
Concentración atmosférica (ppm)	2050	485
	2100	540
Año de estabilización		2150

Tabla 2.17.3: perfil de estabilización 550. Adaptada de Cambio Climático 2001, Informe de síntesis (IPCC, 2001)

Teniendo en cuenta dicho escenario, para estabilizar la concentración de CO₂ en la atmósfera en 550 ppm, las emisiones de CO₂ acumuladas globales 2001-2100 no deberían superar las 1310 GtC.

Adoptando la *suposición* de que el resto de los países del mundo haciendo análisis similares sobre su territorio: a) concuerdan en que los impactos tolerables se logran estabilizando el CO₂ en 550 ppm; b) adoptan un objetivo común de no superar las 1310 GtC en las emisiones del periodo 2001-2100; c) en búsqueda de cumplir con dicho objetivo, asignan permisos de emisión proporcionales a la contribución porcentual sobre

las emisiones globales en el 2000, resulta en que a la Argentina le corresponderían permisos de emisión equivalentes⁸¹ a 5,42 GtC.

En 1997 las emisiones⁸² de CO₂ fueron de 0,035 GtC. Asumiendo un incremento anual en las emisiones de 1% en el 2100 las emisiones acumuladas de CO₂ serían de 5,96 GtC.

Consecuentemente las políticas de mitigación en la Argentina deberían tener como objetivo reducir⁸³ un 10% las emisiones de CO₂ para que los potenciales impactos del cambio climático no resulten en un decremento superior al 15% en la PPN del Chaco seco.

Adicionalmente habría que comparar el costo económico, social y ambiental de esa pérdida en la PPN con relación al costo inherente en la implementación de las medidas de mitigación.

Conclusiones y perspectivas a futuro:

Los resultados de este capítulo obviamente surgen de un análisis *muy grosero y superficial* y deben ser considerados únicamente como un *ejemplo ilustrativo* del potencial de los modelos de vegetación para contribuir al diseño de políticas de adaptación y para fijar límites de emisión de gases efecto invernadero basados en un “límite tolerable de impacto” sobre un indicador determinado.

Para lograr resultados mas realistas se debería utilizar un modelo del tipo “ICLIPS” (*ver capítulo 1.5*) que es capaz de integrar los aspectos económicos y físicos de los impactos del cambio climático.

Además, en el análisis se deberían considerarse otros indicadores de impactos, como la pérdida de ecosistemas naturales, disminución de productividad agrícola, etc.

El proceso de transformar un “impacto tolerable” en un acuerdo global de limitación de emisiones no resulta una tarea simple, entre otras, por el antagonismo existente entre la naturaleza netamente local de los impactos y la necesidad de lograr consensos globales (considerando que los GEIs se mezclan relativamente de manera uniforme en la atmósfera).

Con todas las dificultades mencionadas previamente, este tipo de análisis contribuye a sustituir la adopción de límites de emisión fijados con criterios bastante arbitrarios (como el establecido en Kyoto) por límites que se estimen en el marco de lo que se consideran impactos tolerables del cambio climático.

⁸¹ Las emisiones incluyen CO₂ de los combustibles fósiles y la industria del cemento (no incluye emisiones asociadas al uso de la tierra) y los otros 5 grupos de GEIs. Argentina en el 2000 tenía el 0,9% de las emisiones globales (Pew Center, 2004), es decir le asignarían permisos de emisión de GEIs por 11,79 GtC. Considerando solo las emisiones de CO₂ (46% de las emisiones de GEIs en el Inventario de 1997) entonces tendría permisos de emisión de CO₂ por 5,42 GtC.

⁸² Sin considerar cambio en el uso del suelo y forestación.

⁸³ $5,96 - 5,42 = 0,54$ gtC que equivale a un 10% de reducción.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS A FUTURO

Este trabajo, resulta novedoso en tanto, es el primero en la región en analizar los impactos del cambio climático sobre la vegetación natural a través de utilizar modelos de vegetación potencial alimentados por escenarios climáticos futuros de alta resolución.

Con respecto a los tres objetivos principales planteados al inicio del trabajo se generaron los siguientes resultados y conclusiones:

1- Cuestiones metodológicas

Se desarrollo y aplicó una metodología⁸⁴ para el estudio de impactos del cambio climático en Argentina, incluyendo los siguientes aportes:

- 1.1 La comparación de la temperatura media anual y la precipitación, anual y estacional, entre las climatologías de LEM y CRU para la Argentina, mostró patrones similares y consistentes con bases de datos locales (*figura 2.2.1 y 2.2.2*), por lo que se justifica el uso indistinto de cualquiera de ellas para estudios de impactos, de escala similar, que requieran de estas variables.
- 1.2 En cuanto a los datos de radiación de ambas climatologías (*figura 2.2.3*) y el mapa de texturas de suelo (*figura 2.2.4*) se recomienda, previo a su utilización en otros estudios, un análisis más detallado de su representatividad en la región, incluyendo la comparación con bases de datos locales (*Grossi Gallegos et al., 1987; Atlas de suelos del INTA*).
- 1.3 La versión simplificada del modelo CPTEC-PVM (de aquí en adelante CPTEC-PVM-CIMA) desarrollada en este trabajo, produjo para la Argentina, resultados similares (*figura 2.3.7*) a la versión original del modelo desarrollada por Oyama.
- 1.4 Las salidas de CPTEC-PVM-CIMA y BIOME4 sin ajustes indicaban una sobre-expresión del área ocupada por herbáceas en el primer caso y por leñosas en el segundo (*figura 2.5.7*). La comparación con el mapa de eco-regiones de Parques Nacionales mostraba un grado de acuerdo regular para el CPTEC-PVM-CIMA y bajo para BIOME4 ($k_{\text{cptec}}=0,40$ y $k_{\text{biome4}}=0,32$). Los ajustes realizados sobre los modelos mejoraron sensiblemente su desempeño en la región ($k_{\text{cptec}}=0,75$ y $k_{\text{biome4}}=0,63$).
- 1.5 Los experimentos de sensibilidad a cambios en la temperatura, precipitación y CO₂ mostraron una respuesta más conservadora (menor cantidad de celdas de grilla que cambian de bioma) para el BIOME4 en comparación con el CPTEC-PVM-CIMA (*figura 2.10.1*).

2- Impactos del cambio climático en Argentina

⁸⁴ basada en IPCC (2001).

- 2.1 Los escenarios climáticos futuros A2 y B2 generados por el modelo climático regional MM5-CIMA mostraron aumentos en la temperatura para todo el territorio con mayor intensidad para el escenario A2 (*figura 2.12.1*).
- 2.2 Los patrones de precipitación anual muestran incrementos o decrementos dependiendo de la región analizada (*figura 2.12.3*). Si consideramos los promedios anuales espaciales por eco-región, la precipitación aumenta siempre, y con mayor intensidad en el B2 que en el A2, en: la pampa, el espinal, el monte de llanuras y el chaco seco. La precipitación disminuye en el monte de sierras, chaco húmedo y estepa (*tabla 2.12.4*).
- 2.3 Utilizando una adaptación de la metodología descrita por Ruosteenoja *et al.* (2003) se concluyó que los ΔT y ΔP simulados por el MM5-CIMA en la región, difieren significativamente de las diferencias esperadas por la variabilidad natural interna del sistema climático (*tabla 2.13.2*).
- 2.4 BIOME4 y CPTEC-PVM-CIMA simulan para los dos escenarios climáticos futuros (A2 y B2) aumentos en el área ocupada por la vegetación de tipo leñoso (*figura 2.14.1 y 2.14.2*). En BIOME4 la incorporación del efecto fisiológico del CO₂ incrementa aún más el área ocupada por bosques-sabanas.
- 2.5 La cantidad de celdas de grilla que cambian de tipo de bioma para ambos escenarios, es superior con el modelo CPTEC-PVM-CIMA de manera consistente con los resultados de los experimentos de sensibilidad mencionados previamente (*figura 2.14.3*).
- 2.6 En las corridas con el CPTEC-PVM-CIMA la cantidad de celdas que cambian de bioma es superior en el escenario A2 mientras que en BIOME4 lo es en el B2. En este último modelo, la adición del efecto fisiológico del CO₂ (escenarios A2 CO₂ y B2 CO₂) incrementa aún más el área ocupada por vegetación leñosa.
- 2.7 Las eco-regiones que presentan la mayor cantidad de celdas que cambian de bioma con respecto a la corrida control son el chaco seco y el monte de llanuras para el CPTEC-PVM-CIMA y el monte de llanuras y la estepa para las corridas con BIOME4 (*figura 2.14.3*).
- 2.8 Existe coincidencia en las simulaciones de ambos modelos en cuanto a que el monte de llanuras es la región que presenta la mayor cantidad de celdas que cambian el tipo de bioma con relación al que tenían en la corrida control.
- 2.9 La Productividad Primaria Neta anual aumenta en los escenarios A2 y B2 en todo el territorio con la excepción del chaco húmedo y seco. Conforme a lo esperado, los escenarios que consideran el efecto fisiológico del CO₂ (A2 CO₂ y B2 CO₂) registran incrementos superiores (*tabla 2.15.4*).
- 2.10 El Índice de Área Foliar anual registra incrementos y decrementos dependiendo de la región analizada. Existe una marcada disminución en la pampa para el escenario A2. Conforme a lo esperado, los escenarios que consideran el efecto

fisiológico del CO₂ registran casi siempre incrementos y de mayor magnitud que en los experimentos sin CO₂ (*tabla 2.15.5*).

2.11 La escorrentía anual registra incrementos en la mayor parte del territorio y con mayor intensidad en la pampa. Existe un decremento en la escorrentía en la región noreste de la Argentina (*tabla 2.15.6*).

3- Herramientas para decisores políticos

3.1 Se aplicó una metodología de “análisis inverso de impactos” para determinar la concentración de CO₂ atmosférico que permite que el impacto del cambio climático sobre la eco-región del chaco seco no reduzca su Productividad Primaria Neta en más de 15%. En función del valor de CO₂ determinado y a partir de una serie de suposiciones se determinó el porcentaje de reducción de emisiones que debería adoptar la Argentina para lograr, conjuntamente con el esfuerzo de los demás países, estabilizar la concentración atmosférica de CO₂ en ese nivel.

Perspectivas a futuro

A futuro, se espera:

- Continuar con el proceso de calibración de los modelos con el fin de mejorar su desempeño en Argentina pero considerando también el efecto de estos ajustes sobre la representación global.
- Validar las salidas de Índice de Área Foliar y Productividad Primaria Neta.
- Realizar corridas de BIOME4 para analizar cambios en la PPN manteniendo la vegetación fija. Estas corridas serían ilustrativas de un escenario futuro de corto plazo, donde la vegetación se encuentre con nuevas condiciones climáticas pero no haya habido aun tiempo suficiente para concretar un proceso de migración.
- Aplicar las salidas de BIOME4 Y CPTEC-PVM a modelos climáticos que consideren modificaciones en la vegetación entre el control y el escenario climático futuro (*Oyama 2002*).
- Identificar indicadores de impacto climático y valores umbral tolerables en Argentina que sean de utilidad para realizar análisis inverso de impactos.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aber**, D. J., Freuder, R. (2000). Variation among solar radiation data sets for the Eastern US and its effects on predictions of forest production and water yield. *Climate Research*. Vol. 15: 33-43.
- Adams**, B., White, A. and Lenton, T.M. (2004). An analysis of some diverse approaches to modelling terrestrial net productivity. *Ecological Modelling* 177 (2004) 353-391.
- Asner** GP, Scurlock JMO, Hicke JA (2003) Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecol Biogeography* **12**, 191-205.
- Bachelet**, J.M. Lenihan, C. Daly, R.P. Neilson, D.S. Ojima, W.J. Parton. General Technical Report PNW-GTR-508. Corvallis, OR. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station. (2001) A dynamic vegetation model for estimating the distribution of vegetation and associated ecosystem fluxes of carbon, nutrients and water. Technical Documentation Version 1.0.
- Bachelet** D., Brugnach M., Neilson, R.P. (1998). Sensitivity of a biogeography model to soil properties. *Ecological Modelling* 109. Pag. 77-98.
- Bailey** A. (1986). A World Ecoregions Map for Resource Reporting. *Environmental conservation*, Vol. 13, no. 3 (1986).
- Bakkenes**, M., J. R. M. Alkemade, F. Ihle, R. Leemans, and J. B. Latour (2002), Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050, *Global Change Biol.*, 8, 390– 407.
- Barros**, Vicente y Bejarán, Ruben (2005). Adaptación al cambio climático en la Argentina. Donde estamos ? <http://www.cima.fcen.uba.ar/~lcr/wp/index.htm>
- Beate** G. Liepert. Australian Greenhouse Office and the Australian Academy of Science (2005). Pan evaporation: an example of the detection and attribution of trends in climate variables.
- Bergengren** J., S.L. Thompson, D. Pollard and R.M. Deconto (2001). Modeling global climate-vegetation interactions in a doubled CO2 world. *Climatic Change* 50: 31-75, 2001.
- Box**, E. O. (1981). *Macroclimate and Plant Forms: An Introduction to Predictive Modeling in Phytogeography*. Dr W. Junk Publishers, The Hague.

Box, E. O. (1986). Some climatic relationships of the vegetation of Argentina in global perspective. *Veroff.Geobot.Inst.ETH, Stiftung Rubel, Zurich* 91 (1986), 181-216.

Box, E. O. (1995). Factor determining distributions of tree species and plant functional types. *Vegetatio*. 121: 101-116,1995.

Box, E. O. (1996). Plant functional types and climate at the global scale. *Journal of Vegetation Sciences* 7: 309-320,1996.

Bunkei Matsushita a, Ming Xub, Jin Chenc, Satoshi Kameyamad, Masayuki Tamura (2004). Estimation of regional net primary productivity (NPP) using a process-based ecosystem model: How important is the accuracy of climate data? *Ecological Modelling* 178 pag. 371–388.

Cabré M. F., Castillo N., Menéndez C. G., Núñez M.N., Solman S.- The influence of land surface representation on the regional simulation of southern South America climate for January (2003). 4° Meeting co-Principal Investigators of the Project IAI CRN-055. Organizó Inter American Institute for Global Change Research (IAI). Cruzeiro, Brasil, 6-8 de octubre Comunicación oral.

Cabre, M. F., N. Castillo, B. Cerne, C. Menendez, M. Nuñez, A. Rolla, S. Solman. Regional simulation of southern South America climate for summer (2002). 3° Meeting co-Principal Investigators of the Project IAI CRN-055. Organizado por Inter American Institute for Global Change Research (IAI). Mar del Plata, Argentina. 14-17 octubre 2002.

Cabrera Angel L. (1971) *Fitogeografía de La Republica Argentina*. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, XIV (1-2).

Cardoso, M.; Nobre, C.; Oyama, M.; Sampaio, G. (2006). Improving potential biomes allocation by considering natural fires in savannas. *Proceedings of the 8 ICSHMO, Foz do Iguazu, Brazil, April 24-28, 2006*, p. 513-515.

Carril, A., C.G. Menendez and M. Nuñez (1997). Climate Change Scenarios over South American region: An intercomparison of coupled general atmosphere-ocean circulation models. *Int. J. of Climatology*, Vol 17, 1613-1633.

Castillo N. y Núñez M. N (2001). Impacto del cambio climático en la distribución de la vegetación y la productividad primaria neta, usando un modelo biogeográfico de equilibrio. CD del IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología y CONGREGMET VIII. Buenos Aires, Argentina, 8 pgs.- 2001.

Castillo N. y Nuñez M.N. (2002). Climate change impacts in Argentina using a biogeographical model. *PROSUR: Third meeting Project IAI CRN-055, Mar del Plata, Octubre 14-17, 2002*.

Castillo, N., Fernandez, A. y González, M (2003).- "Some results of Research activities at CIMA". Ponencia. Poster. SAC-D Aquarrious Mission, First Meeting of the Science Group. Mar del Plata, Argentina , 18-20 Marzo 2003.

Castillo, N. y Nuñez M.N. (2006). Evaluación de la performance del modelo CPTec-PVM simplificado para representar la distribución de los grandes biomas en Argentina. RAE 2006 - XXII Reunión Argentina de Ecología.

Chmielewski, F.-M., and T. Ro` tzer (2001), Response of tree phenology to climate change across Europe, Agric. For. Meteorol., 108, 101– 112.

Churkina G, Runnibg SW, Schloss L. and the Participants of the Postdam NPP Model Intercomarison. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): the importance of water availability. Global Change Biology 5 Suppl.1:1-15.

Claussen, M., Brovkin V., Ganopolski A., Kubatzki C., Petoukhov V. (1998). Modelling global terrestrial vegetation climate interaction. Phil.Trans. R. Soc. Lond. B (1998) 353, 53-63.

Claussen, M. (1998). On multiple solutions of the atmosphere-vegetation system in present-day climate. Global Change Biology (1998) 4, 549-559.

Collatz, G.J., Ribas-Carbo, M., and Berry, J.A., (1991). Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. Australian Journal of Plant Physiology., v. 19, p. 519-538.

Cook, K. H.; Vizy, E. K. (2006). Delayed onset of the South American Summer Monsoonduring the Last Glacial Maximun. PAGES News, v.14, n.2, p. 17-18. (http://www.pages.unibe.ch/products/newsletters/NL2006_2low_res.pdf).

Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R.B. & Ginn, T.R. (1984). A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. Water Resour. Res. 20, 682-690.

Cowling, S.A. (2003). Environmental control of leaf area production: Implications for vegetation and land-surface modeling. Global Biogeochemical Cycles, Vol:17, No.1, 1007.

Cramer WP & AM Salomon (1993) Climatic classification and future global redistribution of agricultural land. Climate Research 3: 97-110.

Cramer W, Kicklighter D, Bondeau A, moore BI, Churkina G, Nemry B, Ruimy A, Schloss A, Participants Postdam NPP Model Intercomarison. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. Global Change Biology 5 Suppl.1:1-15.

Díaz, S., Acosta, A., & Cabido (1992). Morphological analysis of herbaceous communities under different grazing regimes. *Journal of Vegetation Science* 3: 689-696.

Díaz Sandra and Cabido Marcelo (1997). Plant functional types and ecosystem function in relation to global change: a multiscale approach. *Journal of Vegetation Science* 8, 463-474.

Diffenbaugh N. S. and Sloan L. C. (2002). Global climate sensitivity to land surface change: The Mid Holocene revisited. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, 10, 10.1029/2002GL014880, 2002.

Diffenbaugh N. S. (2005). Atmosphere-land cover feedbacks alter the response of surface temperature to CO₂ forcing in the western United States. *Climate Dynamics* (2005) 24: 237–251.

Foley, J. A. (1994). Net primary productivity in the terrestrial biosphere: the allocation of a global model. *Journal of Geophysical Research*, Vol 99, pages 20773-20783, 1994.

Foley, J. A., I. C. Prentice, N. Ramankutty, S. Levis, D. Pollard, S. Sitch, and A. Haxeltine.(1996). An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles* 10(4), 603-628.

Foley, J. A., I., S. Levis, C. Prentice, D. Pollard and S.L. Thompson. (1998). Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology* 4: 561-579.

Friend, A D, Stevens, A K, Knox, R G, and Cannell, M G R (1997) A Process-based, Terrestrial Biosphere Model of Ecosystem Dynamics (Hybrid v3.0), *Ecol. Model*, 95, 249–287.

Goward, S.N., Prince, S.D. (1995). Transient effects of climate on vegetation dynamics: satellite observations. *Journal of Biogeography* 22, 549-563.

Grant, R. F., kimball, G. W., Wall, J. M., Brooks, P.J., Pinter, Jr., Conley, M.M., Otman, M.J., Lamorte, R. L., Leavitt, S.W., Thompson, T. L. y Matthias, A.D. (2004). Modeling elevated carbon Dioxide Effects on water relations, water use, and growth of irrigated Sorghum. *Agronomy Journal*, Vol: 96, December, 2004.

Grossi Gallegos, H., Atienza, G. y García, M. Cartas de radiación solar global para la región meridional de América del Sur. *En Anales del II Congreso Interamericano de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina, pp 16.3.1-16.3.10.

Hallgren, W.S. and Pitman, J. (2000). The uncertainty in simulations by global biome model (BIOME3) to alternative parameter values. *Global Change Biology* (2000) 6, 483-495.

Harte, J., and R. Shaw (1995), Shifting dominance within a montane vegetation community: Results of a climate-warming experiment, *Science*, 267, 876– 880.

Hasselmann, K., R. Sausen, E. Meier-Reimer, and R. Voss (1993). On the cold start problem in transient simulations with coupled atmosphere-ocean models. *Climate Dynamics*, 9, 53-61.

Harrison, S.P., Prentice, I.C., and Sickel, K., (2003). Direct Impacts of Atmospheric CO₂ Concentration on Global Vegetation Distribution. XVI INQUA Congress, Poster Session No. 16.

Haxeltine Alex and Prentice Colin (1996). Biome3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, vol 10. Nro 4. Pag 693-709.

Holdridge, L. R. (1967). Life Zone Ecology. Tropical Science Center, San Jose, Costa Rica.

Hulme, N. M. and Jones, P.D., (1999). Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate* 12, 829-856.

IPCC (1998). Impactos regionales del cambio climático. Evaluación de la vulnerabilidad.

IPCC-TGCIA (1999). Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 1. Prepared by Carter, T.R., M. Hulme, and M. Lal, Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, 69pp.

IPCC. Mearns L. O., F. Giorgi, P. Whetton, D. Pabon, M. Hulme, M. Lal (2003). Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments.

Jackson RB, Canadell J, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE, Schulze ED (1996) A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108, 389-411.

Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED (1997) A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrients contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 94, 7362-7366.

Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, *et al.* (2004) Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, 19-35.

Kaplan, J., Bigelow, N.H., Prentice, I.C., Harrison, S.P., Bartlein, P.J., Christensen, T.R., Cramer, W., Matveyeva, N.V., McGuire, A.D., Murray, D.F., Razzhivin, V.Y., Smith, B., Walker, D.A., Anderson, P.M., Andreev, A.A., Brubaker, L.B., Edwards, M.E., and Lozhkin, A.V.(2003). Climate change and arctic ecosystems II: Modeling, paleodata-model comparisons, and future projections. *Journal of Geophysical Research.*, v. 108, p. 12-1 –12-17.

Kaplan, J. (2002). Wetlands at the Last Glacial Maximum: Distribution and methane emissions. *Geophysical Research Letters.*, v. 29, no. 6, p. 3-1 – 3-4.

Kindermann, J., M.K.B. Ludeke, F.W. Badeck, R.D. Otto, A. Kladius, C. Hager, G. Wurth, T. Lang, S. Donges, S. Habermehl, and G.H. Kohlmaier (1993). Structure of a Global and Seasonal Carbon Exchange Model for the Terrestrial Biosphere, *Water, Air, and Soil Pol.*, 70, 675-684.

Köppen, W. (1936): Das geographische System der Klimate (Handbuch der Klimatologie, Bd. 1, Teil C).

Ruosteenoja K., Timothy R. Carter, Kirsti Jylhä and Heikki Tuomenvirta (2003) Future climate in world regions: an intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios. *The Finnish Environment*.

Lawlor, D. W. (1995). Photosynthesis, productivity and environment, *J. Exp. Bot.*, 46, 1449– 1461.

Linacre, E.T. (1968), Estimating the net radiation flux, *Agric. For. Meteorol.*, 5, 49-63.

Leemans, R. and Solomon, A. M.(1993) Modeling the potential change in yield and distribution of earth's crops under a warmed climate. *Clim. Res.* 3, 79-96.

Leemans, R., and Cramer, W.P. 1992. *IIASA Database for Mean Monthly Values of Temperature, Precipitation, and Cloudiness on a Global Terrestrial Grid*. In: *Global Ecosystems Database Version 2.0*. Boulder, CO: NOAA National Geophysical Data Center. [first published in 1991].

Legates D.R. and Wilmott, C.J., 1990a, Mean Seasonal And spatial Variability in global surface air temperature. *Theoretical and Applied Climatology* 41: 11-21.

Legates D.R. and Wilmott, C.J., 1990b, Mean Seasonal And spatial Variability in Gauge-Corrected, Global Precipitation. *International Journal of Climatology* 10: 111-127.

Leith, H., and R.H.Whittaker (1975). *Primary Productivity of the Biosphere*, Springer-Verlag , New York.

Maclure, M., & Willet, W. C. (1987) Misinterpretation and misuse of the kappa statistic. *American Journal of Epidemiology*, 126(2), 161-169.

Mattews, E. (1983). Global vegetation and land use: new high-resolution data bases for climate studies. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. Vol 22: 474-487.

McGuire, A.D., Joyce, L.A., Kicklighter, D.W., Melillo, J.M., Esser, G., Vorosmarty, C.J., (1993). Productivity response of climax temperate forests to elevated temperature and carbon dioxide: a North American comparison between two global models. *Clim. Change* 24, 287–310.

Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente. Secretaría de Desarrollo Sustentable y Política Ambiental (1999). *Inventario de Gases Efecto Invernadero de la República Argentina 1997*.

Melillo, J. M., P. A. Steudler, J. D. Aber, K. Newkirk, H. Lux, F. P. Bowles, C. Catricala, A. Magill, T. Ahrens, and S. Morrisseau (2002), Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate systems, *Science*, 298, 2173– 2176.

Monserud, R.A. and Leemans, R. (1992). Comparing global vegetation maps with Kappa statistic. *Ecological Modelling*, v.62,n.4,p.275-293.

Monteith J.L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 9: 747-766.

Muller, J.M. (1982) Selected climatic data for a global set of standard stations from vegetation science, Dr. W. Junk, Norwell, Mass.

Neilson, R.P. (1995) A model for predicting continental scale vegetation distribution and water balance. *Ecol. Appl.* 5: 362-385.

Nemry, B, Francois, L, Warnant, P, Robinet, F, and Gérard, J-C (1996) The Seasonality of the CO₂ Exchange Between the Atmosphere and the Land Biosphere: A Study with a Global Mechanistic Vegetation Model, *J. Geophys. Res.*, 101, 7111–7125.

Núñez M. Solman S. and Cabré S. (2006): Mean climate and annual cycle in a regional climate change experiment over Southern South America. II: Climate change scenarios (2081-2090). VIII ICSHMO.

Núñez, M. N. and S. A. Solman (2000): The Hadley Centre Atmospheric General Circulation Model (HadAM2b): An evaluation of the Southern Hemisphere Synoptic Pattern Simulation. Preprints of the Sixth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. American Meteorological Society. 380-382.

Olson, J., Watts, J. A. and Allison, L. J. (1983). Major World Ecosystem Complexes Ranked by Carbon in Live Vegetation: A Database. Report NDP-017. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn.

Olson, J.S., Watts, J.A., and Allison, L.J. (1983). Carbon in live vegetation of major world ecosystems. ORNL-5862, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.

Oyama, M. D. (2002) Tese de Doutorado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Oyama, M. D., Nobre C. A (2004). A simple potential vegetation model for coupling with the simple biosphere model (SIB). Revista Brasileira de Meteorologia, v.19, n.2, 203-216.

Pan, Y., McGuire, A.D., Kicklighter, D.W., Melillo, J.M., (1996). The importance of climate and soils for estimates of net primary production: a sensitivity analysis with the terrestrial ecosystem model. Global Change Biol. 2, 5–23.

Paruelo JM, WK Lauenroth, HE Epstein, IC Burke, MR Aguiar & O Sala (1995). Regional climatic similarities in the temperate zones of North and South America. Journal of Biogeography 22: 2689-2699.

Paruelo, M. y Sala, O. (1993). Effect of global change on maize production in the Argentinean Pampas. Climate Research. Vol 3: 161-167 (1993).

Pearson, R.G. and Dawson T.P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. Global Ecology & Biogeography(2003)12, 361–371.

Peng, C. (2000). From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: a global perspective on modelling vegetation dynamics. Ecological Modelling 135 (2000) 33–54.

Pew Center on Global Climate Change (2004). Kevin Baumert, Jonathan Pershing. Climate data: insights and observations.

Pontius, R. G., J. D. Cornell, and C. A. S. Hall (2001), Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: Application and validation for Costa Rica, Agric. Ecosyst. Environ., 85(1– 3), 191–203.

Prentice Colin, Cramer Wolfgang, Harrison Sandy P, Leemans Rick, Monserud Robert A, Solomon Allen M. (1992). A Global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. Journal of Biogeography 19, 117-134.

Prentice, Colin / Sykes, Martin / Cramer, Wolfgang (1993). A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes. *Ecol. Model.* 65, 51-70, 1993.

Prentice, I. C., Cramer, W., Harrison, S. P., Leemans, R., Monserud, R. A. and Solomon, A. M. (1992). A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *J. Biogeogr.* 19, 117-134.

Prentice, I. C., Harrison, S. P., Jolly, D., and Guiot, J. (1998). The climate and biomes of Europe at 6000 yr BP: comparison of model simulations and pollen-based reconstructions. *Quaternary Science Reviews* 17(6-7), 659-668.

Raich, J W, Rastetter, E B, Melillo, J M, Kicklighter, D W, Steudler, P A, Peterson, B J, Grace, A L, Moore, III, B, and Vur'usmarty, C J (1991). Potential Net Primary Productivity in South America: Application of a Global Model, *Ecol. Appl.*,1, 399-429.

Ravindranath, N. H., Joshi N. V., Sukumar R. and Saxena A. (2006). Impact of climate change on forests in India. *Current Science*, Vol. 90, NO. 3, 10 February 2006.

Rogers, A., Allen, D. J., Davey, P. A., Morgan, P. B., Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Cornic, G., Dermody, O., Dohleman, F. G., Heaton, E. A., Mahoney, J., Zhu, X. G., Delucia, E. H., Ort, D. R. and Long, S. P. (2004). Leaf photosynthesis and carbohydrate dynamics of soybeans grown throughout their life-cycle under Free-Air Carbon dioxide Enrichment. *Plant Cell and Environment* 4, 27: 449-458.

Ruimy A, Kergoat L, Bondeau A, Participants Postdam NPP Model Intercomarison (1999). Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. *Global Change Biology* 5 Suppl.1:1-15

Sala O. E. *et al* (2000). Global Biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, vol:287 pag: 1770-1774.

Salomon AM & DA Leemans (1990) Climatic change and landscape – ecological response: issues and analysis. In: Boer MM & RS de Groot (eds) *Landscape ecological impact of climatic change*: 293-316. IOS-Press, Amsterdam, The Netherlands.

Samuel L.J., V.B Foley and D. Pollard (1999). On the stability of the high-latitude climate-vegetation system in a coupled atmosphere-biosphere model. *Global Ecology and Biogeography* (1999) 8, 489-500.

Scheffer M, Holmgren M, Brovkin V, Claussen M (2005) Synergy between small- and large-scale feedbacks of vegetation on the water cycle. *Global Change Biology* 11, 1003-1012.

- Shaver**, G. R., et al. (2000), Global warming and terrestrial ecosystems: A conceptual framework for analysis, *Bioscience*, 50, 871– 882.
- Shukla**, J., C. Nobre, and P. Sellers (1990). Amazon deforestation and climate change. *Science* 247: 1322-25.
- Sitch**, S (2000) The Role of Vegetation Dynamics in the Control of Atmospheric CO2 Content, PhD Lund University, Lund, Sweden.
- Solman** S. and Nuñez M. (1999). Local estimates of global climate change: a statistical downscaling approach. *International Journal of climatology* 19: 835-861.
- Solman** S., Nuñez M. and Cabré MF (2006): Regional climate change experiment over southern South America: Part I: Present climate conditions (1981-1990). VIII ICSHMO.
- Thornthwaite**, C.W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *The geographical review* XXXVIII (1):55-94.
- Tianxiang**, L., Pan, Y., Ouyang, H., Shi, P., Luo, J., Yu, Z. and Lu, Q. (2004). Leaf area index and net primary productivity along subtropical to alpine gradients in the Tibetan Plateau. *Global Ecology and Biogeography*. Vol:13, 345-358.
- Toth**, F. L., Cramer, W., and Hizsnyik, E. (2000). Climate Impact Response Functions: An Introduction, *Clim. Change* 46, 225–246.
- WMO** (1975). Atlas climatológico de America del Sur.
- Willmott**, C.J., Rowe, C.M. and Mintz, Y. (1985). Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. *Journal of Climate*, v.9, n.6, p.589-606.
- Woodward** FI (1987) *Climate and Plant Distribution* Cambridge University Press.
- Zajac** L. M. (2004). Vegetation responses to changes in CO2 concentration. Master of Science thesis. Department of Geophysical Sciences. University of Chicago.

5. INDICE DE MAPAS Y TABLAS

2.2 BASES DE DATOS DE ENTRADA.....	51
<i>Figura 2.2.1: promedio regional (error standard) y mapa de distribución de la temperatura anual (°C) de la climatología de LEM y CRU.</i>	54
<i>Figura 2.2.2: promedio regional (error standard) y mapa de distribución de la precipitación anual (mm) de la climatología de LEM y CRU.</i>	55
<i>Figura 2.2.3: promedio regional (error standard) y mapa de distribución de la radiación anual (%) de la climatología de LEM y CRU.</i>	55
<i>Figura 2.2.4: mapa de texturas de suelo y porcentaje del área regional ocupada por las texturas: coarse, medium y fine.</i>	56
<i>Figura 2.2.5: precipitación y temperatura promedio estacional de la climatología LEM</i>	57
2.3 MODELO CPTEC-PVM Y CPTEC-PVM-CIMA	58
<i>Figura 2.3.1: esquema general de funcionamiento del CPTEC-PVM</i>	60
<i>Tablas 2.3.2: comparación entre la versión original y simplificada del CPTEC-PVM</i>	63
<i>Figura 2.3.3: mapas de distribución de déficit y exceso anuales a partir de LEM y WIL.</i>	63
<i>Tabla 2.3.4: comparación del promedio por eco-región del déficit y exceso anuales a partir de LEM y WIL.</i>	64
<i>Figura 2.3.5: mapas de distribución de EVTr y EVTp anuales a partir de LEM y WIL.</i>	64
<i>Tabla 2.3.6: comparación del promedio por eco-región de la EVTr y EVTp a partir de LEM y WIL.</i>	64
<i>Figura 2.3.7: mapas de distribución de biomas para la versión original y simplificada del CPTEC-PVM.</i>	65
<i>Figura 2.3.8: algoritmo de clasificación de biomas del CPTEC-PVM</i>	66
2.4 BIOME4	67
<i>Figura 2.4.1: respuesta de la PPN a la temperatura para el modelo BIOME3</i>	75
<i>Figura 2.4.2: respuesta de la PPN a la concentración de CO₂ para el modelo BIOME3</i>	75
<i>Figura 2.4.3: respuesta de la PPN al estrés hídrico para el modelo BIOME3</i>	76
<i>Figura 2.4.4: respuesta de la PPN a la radiación para el modelo BIOME3</i>	76
<i>Tabla 2.4.5: valores límite para el establecimiento de TFPs en BIOME4.</i>	77
<i>Tabla 2.4.6: parámetros de TFPs en BIOME4</i>	78
<i>Tabla 2.4.7: clasificación de biomas en BIOME4</i>	79
2.5 CORRIDAS CONTROL Y VALIDACION DE LOS MODELOS	80
<i>Tabla 2.5.1: reclasificación de eco-regiones de Parques en biomas generales.</i>	83
<i>Figura 2.5.2: mapas de distribución de biomas de Parques (eco-regiones y biomas generales)</i>	83
<i>Tabla 2.5.3: reclasificación de biomas del CPTC-PVM en biomas generales.</i>	83

<i>Figura 2.5.4: mapas de distribución de biomás de CPTEC-PVM (biomás originales y biomás generales)</i>	84
<i>Tabla 2.5.5: reclasificación de TFP de BIOME4 en biomás generales</i>	84
<i>Figura 2.5.6: mapas de distribución de TFPs y biomás generales de BIOME4</i>	85
<i>Figura 2.5.7: mapas de distribución de biomás generales de Parques y salidas control de BIOME4 y CPTEC-PVM-CIMA</i>	85
<i>Figura 2.5.8: comparación biomás generales de Parques, BIOME4 y CPTEC</i>	86
<i>Tabla 2.5.9: matriz de confusión Parques vs BIOME4 y vs CPTEC-PVM-CIMA</i>	86
<i>Figura 2.5.10: mapas de distribución de “biomás generales” en común entre Parques, BIOME4 y CPTEC-PVM</i>	86
<i>Tabla 2.5.11: % de acuerdo y estadístico kappa por “bioma general” comparando Parques con BIOME4 y CPTEC-PVM</i>	87
<i>Tabla 2.5.12: % de acuerdo por eco-región comparando Parques con BIOME4 y CPTEC-PVM</i>	87
<i>Tabla 2.5.13: porcentaje del área de la eco-región de Parques ocupado por los distintos biomás simulados por CPTEC-PVM-CIMA</i>	89
<i>Tabla 2.5.14: porcentaje del área de los biomás generales de Parques ocupado por los distintos biomás simulados por CPTEC-PVM-CIMA</i>	89
<i>Tabla 2.5.15: porcentaje del área de las eco-regiones de Parques ocupado por los biomás generales simulados por CPTEC-PVM-CIMA</i>	90
<i>Tabla 2.5.16: celdas de grilla biomás generales de Parques vs biomás generales simulados por CPTEC-PVM</i>	90
<i>Tabla 2.5.17: porcentaje del área de biomás generales de Parques ocupado por los biomás generales simulados por CPTEC-PVM</i>	90
<i>Tabla 2.5.18: porcentaje del área de la eco-región de Parques ocupado por los distintos TFPs dominantes simulados por BIOME4</i>	91
<i>Tabla 2.5.19: porcentaje del área de los biomás generales de Parques ocupado por los distintos TFPs dominantes simulados por BIOME4</i>	92
<i>Tabla 2.5.20: porcentaje del área de las eco-regiones de Parques ocupado por los biomás generales simulados por BIOME4</i>	92
<i>Tabla 2.5.21: celdas de grilla biomás generales de Parques vs biomás generales simulados por BIOME4</i>	92
<i>Figura 2.6.1: promedio regional (error standard) y mapa de distribución del IAF₁₀₀ y la PPN anuales de la corrida control de BIOME4</i>	96
<i>Tabla 2.6.2: PPN de biomás globales. Adaptada de Raich et al., (1991). Los valores originalmente estaban expresados en términos de materia orgánica y se convirtieron asumiendo un contenido de 50% de carbono en la materia orgánica</i> ..	96
2.8 AJUSTES EN EL MODELO CPTEC-PVM-CIMA	100
<i>Tabla 2.8.1: Promedios por eco-región de los índices climáticos utilizados por el CPTEC-PVM-CIMA</i>	100
<i>Figura 2.8.2: mapas de distribución de índices climáticos del CPTEC-PVM-CIMA</i>	101
<i>Figura 2.8.3: algoritmo de clasificación de biomás del CPTEC-PVM-CIMA ajustado</i>	103
<i>Figura 2.8.4: mapas de distribución de “biomás generales” de Parques y CPTEC-PVM-CIMA ajustado</i>	104

<i>Figura 2.8.5: mapas de distribución de “biomas generales” de CPTEC-PVM-CIMA: control, ajuste 1, ajuste 1+2, ajuste 1+2+3.</i>	104
<i>Tabla 2.8.6: porcentaje de acuerdo por eco-región de Parques con CPTEC-PVM-CIMA: control, ajuste 1, ajuste 1+2, ajuste 1+2+3.</i>	105
<i>Tabla 2.8.7: corrida control de biomas originales CPTEC-PVM-CIMA sin ajustes comparada con eco-regiones de Parques.</i>	106
<i>Tabla 2.8.8: corrida control de biomas originales CPTEC-PVM-CIMA con ajustes 1+2+3 comparada con eco-regiones de Parques.</i>	107
2.9 AJUSTES EN BIOME4	108
<i>Tabla 2.9.1: kappa vs ajustes en “greendays” de BIOME4.</i>	111
<i>Tabla 2.9.2: kappa vs ajustes en “greendays” and “runoff” de BIOME4.</i>	113
<i>Figura 2.9.3: mapa de distribución de “biomas generales” de BIOME4 control vs BIOME4 ajuste “greendays” vs BIOME4 ajuste “runoff”</i>	113
<i>Figura 2.9.4: mapa de distribución de “biomas generales” de BIOME4 control vs BIOME4 ajuste “greendays”+ “runoff”.</i>	114
<i>Tabla 2.9.5: porcentaje del área de la eco-región en el que el TFPs de BIOME4 puede estar presente.</i>	115
<i>Tabla 2.9.6: promedios por eco-región de índices climáticos de BIOME4 (gdd0, gdd5, tcm, tmin y twm)</i>	115
<i>Tabla 2.9.7: promedios por eco-región de firedays, greendays, soil moisture, runoff (BIOME4).</i>	115
<i>Figura 2.9.8: mapas de distribución de TFP de BIOME4 presentes en Argentina.</i> 116	
2.10 ANALISIS DE SENSIBILIDAD: BIOMAS	117
<i>Figura 2.10.1: cambios con respecto a la corrida control (experimentos: t, p, p⁺, p⁻t⁺,</i>	118
<i>Figura 2.10.2: cambios, discriminados por bioma general, con respecto a la corrida control (experimentos: t⁺, p⁻, p⁺, pt⁺, p⁻t⁺,</i>	119
<i>Figura 2.10.3: mapas de distribución de biomas; control y experimentos: t⁺, p⁻, p⁺, pt⁺, p⁻t⁺.</i>	121
<i>Figura 2.10.4: mapas de distribución de biomas; control y experimentos: t⁺, p⁻, p⁺, pt⁺, p⁻t⁺.</i>	122
2.11 ANALISIS DE SENSIBILIDAD: PPN	125
<i>Tabla 2.11.1: promedio de PPN por eco-región (error standard). Grillas sombreadas representan incrementos con respecto al control.</i>	126
2.12 CORRIDAS DEL MM5-CIMA	127
<i>Figura 2.12.1: ΔT anual (MM5 futuro – MM5 control)</i>	128
<i>Tabla 2.12.2: promedio (error standard) de temperatura anual por eco-región de la climatología de LEM y escenarios climáticos futuros A2 y B2.</i>	128
<i>Figura 2.12.3: ΔP anual (MM5 futuro – MM5 control)</i>	129
<i>Tabla 2.12.4: promedio (error standard) de la precipitación anual por eco-región de la climatología de LEM y escenarios climáticos futuros A2 y B2. (celdas sombreadas son incrementos).</i>	129

2.13 ESCENARIOS CLIMATICOS FUTUROS Y VARIABILIDAD NATURAL...	131
<i>Figura 2.13.1: Diagramas de dispersión (2070-2099) para Sudamérica. Extraído de Ruosteenoja et al. (2003).</i>	132
<i>Tabla 2.13.2: ΔT y ΔP de MM5 y Ruosteenoja (2003).</i>	133
<i>Figura 2.13.3: Diagramas de dispersión (2070-2099) para Sudamérica incluyendo los puntos (cuadrados en rojo y azul) para el MM5-CIMA.</i>	134
2.14 CORRIDAS CON ESCENARIOS CLIMATICOS FUTUROS: BIOMAS	135
<i>Figura 2.14.1: mapas de distribución de biomas de BIOME4 corrida control y escenarios climáticos futuros (A2, B2, A2)</i>	137
<i>Figura 2.14.2: mapas de distribución de biomas de CPTEC-PVM-CIMA corrida control y escenarios climáticos futuros (A2, B2, A2)</i>	137
<i>Figura 2.14.3: cambios con respecto al control de BIOME4 y CPTEC-PVM-CIMA con escenarios climáticos futuros (A2, B2, A2)</i>	138
<i>Figura 2.14.4: cambios con respecto al control, discriminados por biomas generales, de BIOME4 y CPTEC-PVM-CIMA con escenarios climáticos futuros (A2, B2, A2)</i>	138
<i>Figura 2.14.5: cambios con respecto al control, discriminados por eco-región, de BIOME4 y CPTEC-PVM-CIMA con escenarios climáticos futuros (A2, B2, A2)</i>	139
2.15 CORRIDAS CON ESCENARIOS CLIMATICOS FUTUROS: PPN, IAF Y ESCORRENTIA.....	140
<i>Figura 2.15.1: mapas de distribución de ΔPPN (corrida escenario climático futuro – corrida control).</i>	140
<i>Figura 2.15.2: mapas de distribución de ΔIAF_{100} (corrida escenario climático futuro – corrida control).</i>	141
<i>Figura 2.15.3: mapas de distribución de escorrentía (corrida escenario climático futuro – corrida control).</i>	141
<i>Tabla 2.15.4: promedio por eco-región de PPN anual (gC /m²). En sombreado incrementos con respecto al control.</i>	142
<i>Tabla 2.15.5: promedio por eco-región de IAF_{100} anual (m² /m²). En sombreado incrementos con respecto al control.</i>	142
<i>Tabla 2.15.6: promedio por eco-región de escorrentía anual (mm). En sombreado incrementos con respecto al control.</i>	143
2.16 BIOME4: ANALISIS INTEGRAL DE LAS SALIDAS	144
<i>Tabla 2.16.1: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región de la pampa.</i>	144
<i>Tabla 2.16.2: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región del espinal.</i>	145
<i>Tabla 2.16.3: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región del monte de llanuras.</i>	146
<i>Tabla 2.16.4: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región del monte de sierras.</i>	147
<i>Tabla 2.16.5: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región de la estepa patagónica.</i>	147

<i>Tabla 2.16.6: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región del chaco húmedo.</i>	148
<i>Tabla 2.16.7: incrementos/decrementos porcentuales control vs. escenarios climáticos futuros para la eco-región del chaco seco.</i>	148
<i>Tabla 2.16.8: cada signo significa incremento (+) o decremento (-) de las variables ordenadas como: precipitación, temperatura, escurrimiento, IAF y PPN. En negritas los patrones para los que se registró la mayor frecuencia de casos.</i>	150
2.17 FUNCIONES DE RESPUESTA DE IMPACTO CLIMATICO Y ANALISIS	
INVERSO DE IMPACTOS	151
<i>Figura 2.17.1: decremento porcentual respecto al control de la PPN del Chaco Seco a lo largo de distintos estados intermedios caracterizados en función de la concentración atmosférica de CO₂.</i>	153
<i>Figura 2.17.2: escenarios de estabilización de CO₂. Extraída del Tercer Informe de Evaluación: Cambio Climático 2001, La base científica (IPCC)</i>	154
<i>Tabla 2.17.3: perfil de estabilización 550. Adaptada de Cambio Climático 2001, Informe de síntesis (IPCC, 2001)</i>	154