APLICACIÓN DEL MODELO GOTILWA+ PARA EL ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA GESTIÓN FORESTAL EN EL BALANCE DE CARBONO Y AGUA EN LOS BOSQUES

S. Sabaté Jorba [1,2], C. A. Gracia Alonso [1,2], E. Pla Ferrer [1], A. Sánchez Plaza [1] y J. Vayreda Durán [1]

[1] CREAF, Centro de Investigaciones Ecológicas y Aplicaciones Forestales. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Barcelona. 08193-BELLATERRA (Barcelona-España). Correo electrónico: santi.sabate@uab.es
[2] Departamento de Ecología, Universidad de Barcelona. Av. Diagonal 645. 08028-BARCELONA (España). Correo electrónico: santi.sabate@ub.edu

Resumen

El análisis de los efectos del cambio climático en los bosques requiere herramientas capaces de describir las relaciones entre el ambiente y el crecimiento de los árboles, así como el efecto de la gestión sobre el crecimiento. Los modelos son herramientas útiles para ello. GOTILWA+ es un modelo funcional que simula el crecimiento forestal, los flujos y balances de agua y carbono, para distintos tipos de bosque teniendo en cuenta las condiciones ambientales, la fisiología y la estructura del ecosistema. El modelo se ha aplicado en proyectos europeos que evalúan la respuesta de los ecosistemas forestales al cambio global: el proyecto ATEAM, centrado en la vulnerabilidad al cambio global de los ecosistemas europeos, y el proyecto SilviStrat, que pone el énfasis en las estrategias adaptativas de la gestión forestal al cambio climático. Los resultados de estos experimentos de simulación a gran escala aportan información sobre las tendencias futuras en el funcionamiento y estructura de los bosques europeos. En general se observa un comportamiento favorable para el crecimiento de los bosques, especialmente, en las zonas de mayor disponibilidad hídrica. Este efecto positivo se sostiene hasta mediados del siglo XXI. En cambio, las condiciones proyectadas por los modelos de cambio climático y las simuladas por GOTILWA+ indican que a partir de la segunda mitad de siglo las condiciones pueden ser más adversas para la fijación y retención de carbono y agua en los bosques.

Palabras clave: *SilviStrat, ATEAM, Modelo de procesos ecofisiológicos, Fijación de carbono*

INTRODUCCIÓN

El análisis de los efectos del cambio climático en los bosques requiere herramientas capaces de describir las relaciones entre el ambiente y el crecimiento de los árboles. Estas herramientas deben permitir, además, la exploración de la gestión forestal y su efecto en el crecimiento. Las combinaciones de estas relaciones permiten establecer proyecciones futuras sobre la respuesta de los bosques frente a los distintos escenarios ambientales y de gestión. Los modelos son herramientas que permiten realizar estas proyecciones (HAUHS, 1990, MOHREN & BURKHART, 1994). En este trabajo se presenta la aplicación del modelo GOTILWA+ en el marco de dos proyectos europeos ATEAM y SilviStrat para el análisis de los efectos de la gestión y el cambio climático en los

ISSN: 1575-2410

© 2004 Sociedad Española de Ciencias Forestales

bosques europeos en lo que cocierne a la dinámica del carbono y el agua. Dicha dinámica se asocia a distintos servicios que ofrecen los bosques como son: la producción de madera, el almacén de carbono en sus distintos compartimientos y su impacto sobre el uso del agua. A partir de dicho análisis, y en el marco de ambos proyectos, se evalúan estos servicios. No se abordan, sin embargo, otros aspectos importantes del ciclo del carbono como son los efectos de perturbaciones como los incendios forestales, tormentas huracanadas, etc. En este análisis nos centramos, por lo tanto, en los efectos sobre el funcionamiento ecofisiológico de los bosques y sus implicaciones.

MATERIAL Y MÉTODOS

El modelo GOTILWA+

GOTILWA+ (GRACIA et *al.*, 1999, http://www.creaf.uab.es/gotilwa+/) es un modelo funcional que simula el crecimiento forestal, los flujos y balances de agua y carbono, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, la fisiología y la estructura del ecosistema. GOTILWA+ permite explorar los efectos de distintos escenarios de cambio climático y gestión forestal sobre diferentes tipos de bosque (desde mediterráneos a boreales). Previamente a su aplicación se ha llevado a cabo un esfuerzo de calibración y verificación de los resultados del modelo basado en datos experimentales (KRAMER et *al.,* 2002). En otro apartado de esta publicación (GRACIA et *al.,* 2004) se describen con más detalle algunos aspectos de la estructura del modelo y los principales procesos que incorpora.

Este modelo se ha utilizado en el marco de dos proyectos europeos, que se presentan a continuación, para analizar los efectos del cambio climático y la gestión en el balance de carbono y agua en los bosques.

Los proyectos europeos SilviStrat y ATEAM

Proyecto SilviStrat (http://www.efi.fi/projects/silvistrat/)

Proyecto ATEAM (http://www.pik-potsdam.de/ateam/)

La capacidad de los ecosistemas terrestres para secuestrar y almacenar CO_2 atmosférico,

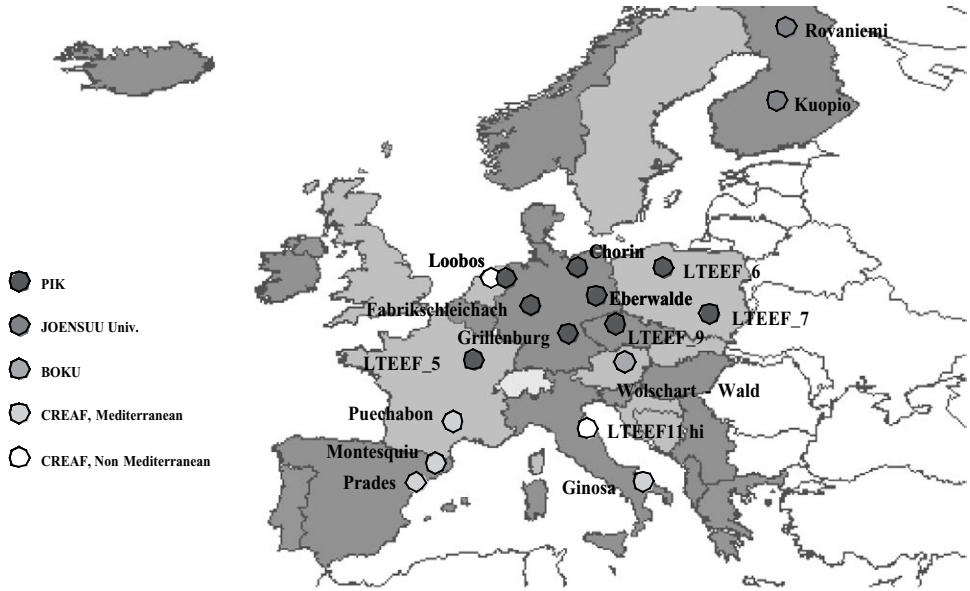

Figura 1. *Localización de los 17 sitios simulados en el marco del proyecto SilviStrat. En ellos se han simulado hasta 7 especies forestales arbóreas. Se indican además los grupos implicados en la modelización de cada sitio*

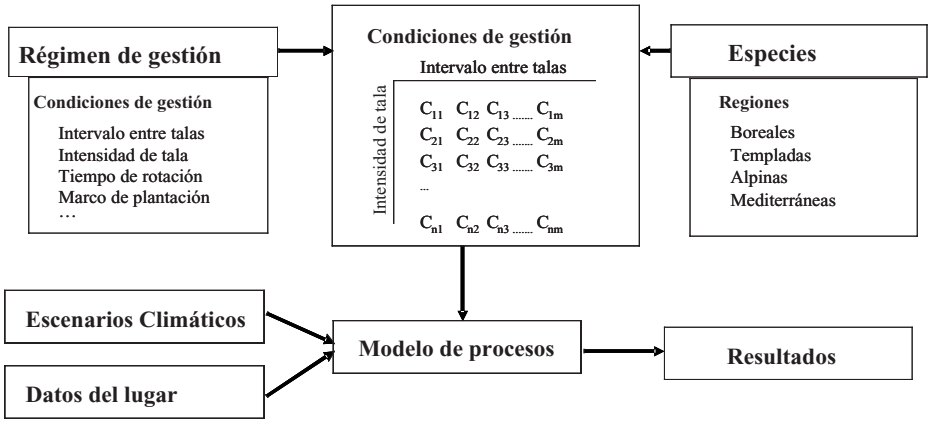

Figura 2. *Diagrama que muestra el procedimiento de análisis utilizado en SilviStrat*

proporcionar agua dulce, productos agrícolas, biodiversidad y usos recreativos es probable que sea afectada por el cambio global. El proyecto europeo ATEAM evalúa la vulnerabilidad al cambio global de los distintos sectores dependientes de servicios ecosistémicos contemplando, especialmente, los riesgos que el cambio global presenta para los intereses de distintos actores implicados. Los resultados de ATEAM pretenden ayudar en la toma de decisiones en la gestión de los ecosistemas y dotar de criterios para su uso sostenible. Los ámbitos y sectores implicados en el proyecto ATEAM son los ecosistemas forestales, los ecosistemas agrícolas, el almacenamiento de carbono, los recursos hídricos, la biodiversidad y los ecosistemas montañosos. En el marco de este proyecto, y en el ámbito forestal, se conecta GOTILWA+ con una extensa base de datos relacional de estructura territorial para toda Europa con una resolución de 10'x10', con el fin de analizar los posibles impactos del cambio climático sobre los ecosistemas forestales europeos (Figura 3). Esta base de datos proporciona al modelo toda la información necesaria para su inicialización en cada píxel (recubrimiento forestal, especie mayoritaria, características edáficas, estructura y ecofisiología del bosque, tipo de gestión) y, a su vez, proporciona a este nivel de detalle proyecciones climáticas de 100 años (2001-2100). Según las previsiones socio-económicas del IPCC (2001) se establecen posibles escenarios de emisiones

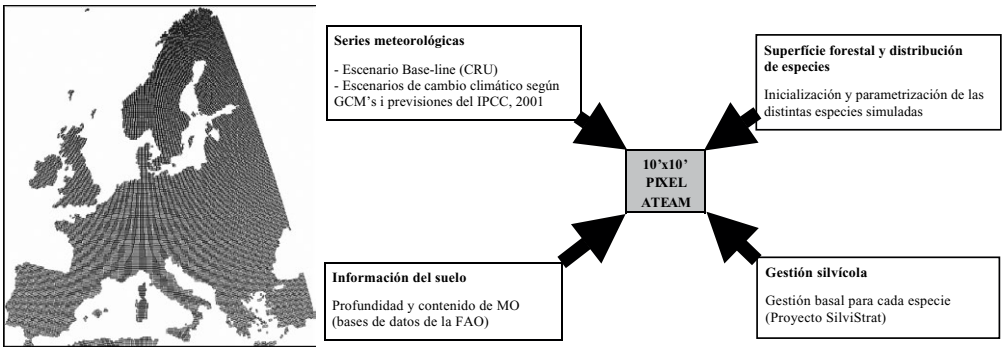

Figura 3. *En el proyecto ATEAM se ha integrado una extensa base de datos de información para toda Europa a partir de una malla de píxeles de 10'x10'. Esta base de datos ha permitido disponer de la información necesaria para la inicialización de GOTILWA+ para cada píxel*

de CO_2 de mayor a menor intensidad: A1, A2, B2, B1. Los distintos GCMs utilizan estos escenarios para generar proyecciones climáticas. En este trabajo hemos aplicado la proyección climática para el periodo 2001-2100 generada por el GCM HadCM2 para el escenario de emisión A2. Los píxeles presentados corresponden a los dominados por *Pinus sylvestris, Pinus halepensis, Pinus pinaster, Quercus ilex* y *Picea abies.*

Variables analizadas

Entre las variables de salida del modelo se han escogido aquellas variables que se ha considerado que se pueden relacionar con servicios que provee el bosque.

- Volumen de Madera extraída (m^3/ha/año), por especies y por tallas. Evaluando el promedio para periodos determinados de 30 años y final al cabo de un periodo de 100 años.
- Incremento anual de madera (m^3/ha/año) por especies.
- Almacén de Carbono (Mg/ha) en diferentes compartimientos del ecosistema: árboles en pie, en el suelo y en la madera extraída. Esta variable evalúa la cantidad de carbono que se mantiene en promedio en el bosque y es interesante en el marco del Protocolo de Kyoto.
- Balance neto medio de carbono del ecosistema (NEE, kg C /ha/año). Indica si el bosque actúa como una fuente emisora de carbono o como un captador del carbono atmosférico.
- Agua utilizada por el bosque (mm/año) y al final de un periodo de 100 años. Indica la cantidad de agua evapotranspirada ("gastada") por el bosque en promedio y al final de 100 años.
- Contenido medio de agua en el suelo (mm). Interesante para evaluar el nivel de sequía o humedad de este.

RESULTADOS

Silvistrat

En el marco del proyecto SilviStrat, la media del carbono en el suelo (Mg C/ha) para los 100 años de simulación muestra patrones similares para todos los escenarios climáticos. En general se puede decir que mientras más suave es la gestión mayor es el carbono acumulado en el suelo. Las diferencias inducidas por los escenarios climáticos son en la mayoría de los casos pequeñas, menores de 10 Mg/ha, como se observa en el ejemplo de la figura 4. El efecto de la eliminación del área basal es más pronunciado que el intervalo entre talas debido a su mayor impacto en la

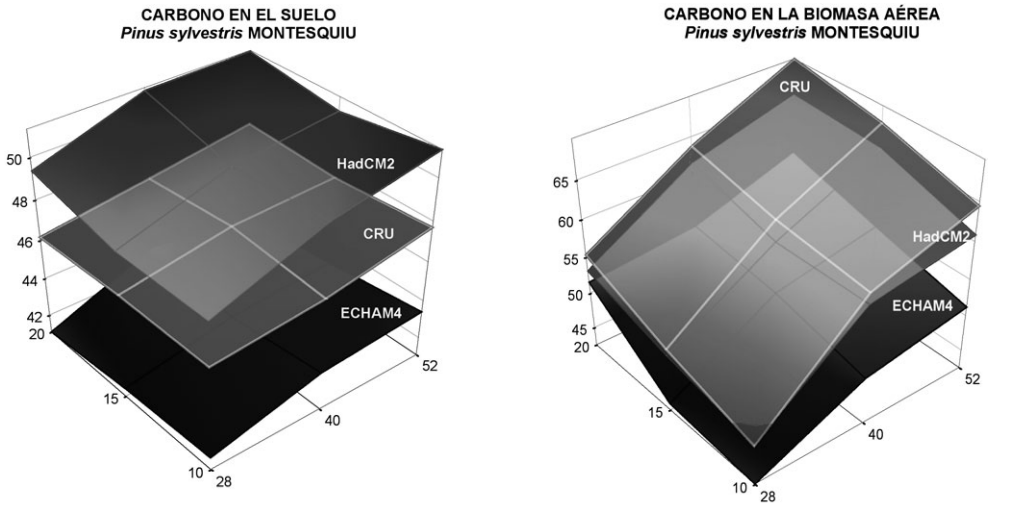

Figura 4. *Ejemplo de representación del contenido medio de carbono en el suelo (Mg/ha) en función de las intensidades y los intervalos de tala para simulaciones de tres escenarios de cambio climático (HadCM2, ECHAM4 y CRU (escenario de referencia o Baseline)) en un bosque de Pinus sylvestris. Sitio: Montesquiu (Catalunya)*

biomasa. Se observa un efecto positivo de los escenarios de cambio climático en la conservación y almacenamiento de carbono en el suelo en los sitios de las áreas Boreales y Continentales; de todas formas en el Mediterráneo se dan valores más bajos para la proyección climática de ECHAM4 (en general con características más cálidas y secas en el las zonas simuladas de clima Mediterráneo).

El carbono en la biomasa aérea sigue un patrón similar en los diferentes escenarios climáticos y sitios simulados: mientras más suave es la gestión mayor es el carbono medio acumulado en la biomasa aérea, véase el ejemplo de la Figura 5. El incremento de temperatura (debido al cambio climático) junto a la disminución en la precipitación (ECHAM4) supondrá una disminución del carbono almacenado en la biomasa aérea en las zonas mediterráneas, como pasa en el caso ya comentado del carbono del suelo. Las altas temperaturas combinadas con la baja disponibilidad de agua que ya están limitando el crecimiento de los árboles son la causa principal. Los resultados para la proyección HadCM2 muestran valores ligeramente superiores a los de ECHAM4.

Si se compara el sitio de Montesquiu (Catalunya) y el de Wolschart-Wald (Austria) creciendo bajo las tres proyecciones climáticas se deduce que la respuesta del bosque al incremento de temperatura depende en gran medida del agua disponible. En sitios donde la evapotranspiración potencial es menor que la precipitación, el incremento de temperatura supondrá un incremento de la tasa de crecimiento y de carbono almacenado en el sistema y también la cantidad de madera extraída del bosque como se muestra en el ejemplo de la figura 6. En sitios donde la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación el incremento de temperatura tenderá a reducir el carbono almacenado en el bosque y además la madera que se pueda extraer de él.

ATEAM

Los resultados son sintetizados en mapas a escala europea para las especies simuladas. En relación al valor promedio del balance neto de carbono del ecosistema (NEE), en la figura 7 se comparan los resultados del escenario de referencia o baseline (que reproduce las condiciones climáticas del siglo pasado) con los del escenario de cambio climático. Para esta variable los valores positivos corresponden a ecosistemas que emiten CO2 a la atmósfera. La tendencia observada bajo el cambio climático implica un

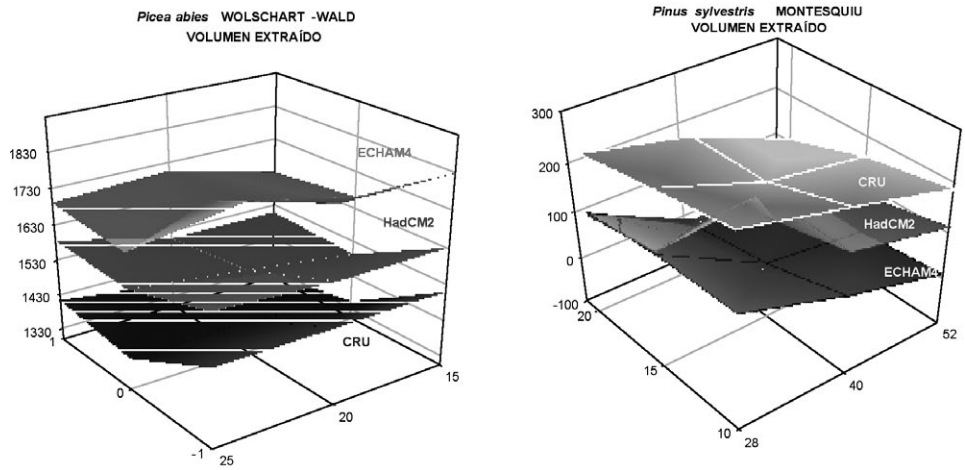

Figura 6. *Representación del volumen totl de madera extraído en 100 años (m3/ha) en función de las intensidades y los intervalos de tala para simulaciones de tres escenarios de cambio climático (HadCM2, ECHAM4 y CRU (escenario de referencia o Baseline)) en un bosque de Picea abies en Austria (izquierda) y en un bosque de Pinus sylvestris en Montesquiu (Barcelona) (derecha)*

notable aumento de las tasas de captación de carbono atmosférico en regiones centrales y nórdicas de Europa, mientras que se observa una disminución de esta capacidad de captación, e incluso la aparición de zonas emisoras en algunas regiones del sur de Europa. El aumento de temperatura comporta una mayor actividad en los procesos relacionados con la dinámica del

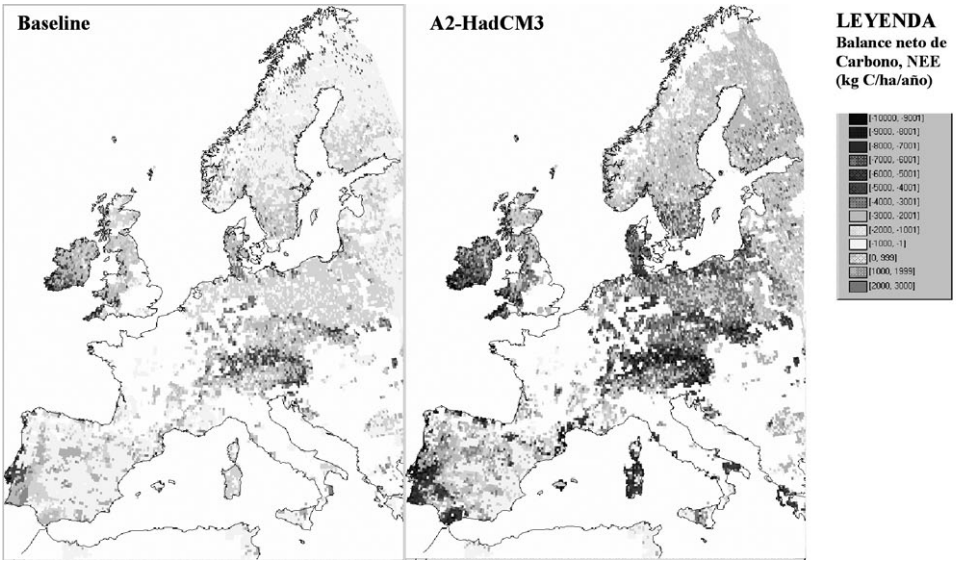

Figura 7. *Comparación de los resultados del balance neto medio de carbono del ecosistema (NEE, kg C/ha/año) para simulaciones de 100 años bajo condiciones climáticas como las actuales (izquierda) y bajo un escenario de cambio climático (derecha). Los valores positivos de las variables significan emisión de carbono a la atmósfera y los negativos captación. Los resultados corresponden a píxeles dominados por Pinus sylvestris, Pinus halepensis, Pinus pinaster, Quercus ilex y Picea abies*

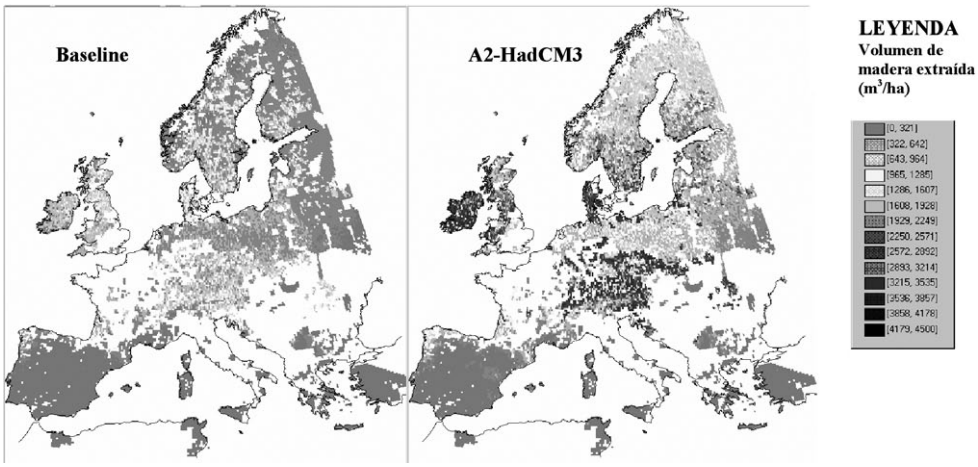

Figura 8. *Comparación de los resultados simulados del volmen de madera extraída (m3/ha) en 100 años bajo condiciones climáticas como las actuales (izquierda) y bajo un escenario de cambio climático (derecha). Los resultados corresponden a píxeles dominados por Pinus sylvestris, Pinus halepensis, Pinus pinaster, Quercus ilex y Picea abies*

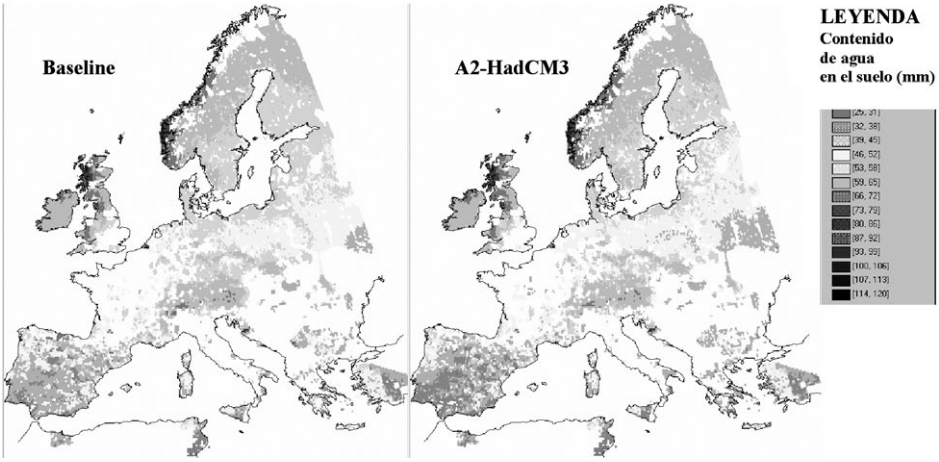

Figura 9. *Comparación de los resultados del contenido promedio de agua en el suelo (mm) para simulaciones de 100 años bajo condiciones climáticas como las actuales (izquierda) y bajo un escenario de cambio climático (derecha). Los resultados corresponden a píxeles dominados por Pinus sylvestris, Pinus halepensis, Pinus pinaster, Quercus ilex y Picea abies*

carbono (producción bruta, neta y respiración heterotrófica). En las zonas centrales y nórdicas de Europa las condiciones hídricas no son limitantes para la producción forestal y, por tanto, es en estas regiones donde se hace más patente el efecto positivo de la fertilización por el incremento de CO_2 atmosférico.

Considerando el volumen de madera extraída y comparando los escenarios antes descritos, los resultados muestran una tendencia al aumento del volumen extraído en regiones centrales y nórdicas (Figura 8). En algunas zonas mediterráneas esta tendencia es opuesta al agravarse, con el cambio climático, las condiciones de estrés hídrico en las que se encuentran. En la figura 9 se observa la tendencia prevista para el agua almacenada en el suelo forestal. En general, las condiciones de mayor temperatura y, en determinadas regiones, de menor precipitación repercuten en una disminución generalizada del agua disponible en el suelo, especialmente significativa en las zonas meridionales de Europa. Este resultado se explica por el aumento de la evapotranspiración. En un análisis más detallado, en el marco de este proyecto, los resultados muestran que la tendencia favorable para la extracción de madera y captación de carbono en los bosques del centro y norte de Europa puede invertirse a partir de la segunda mitad de este siglo, como también ha sido apuntada por otros autores (véase Cox et al 2000).

CONCLUSIONES

Se han presentado dos aplicaciones de GOTILWA+ en el análisis de los efectos del cambio climático y la gestión en bosques Europeos. Los resultados de estas aplicaciones indican:

* Una mayor actividad en los procesos relacionados con la dinámica del carbono. Producción bruta, neta y respiración heterotrófica.
* Un balance neto a favor de la acumulación de carbono y mayor extracción de madera, pero sobretodo en los países nórdicos. En la segunda mitad del siglo la situación de puede invertir.
* Una mayor evapotranspiración y reducción del contenido de agua en el suelo.
* En el norte y centro de Europa se presentarán condiciones más favorables para la producción.

Estos resultados nos proponen una vía de análisis útil que, aunque pueden y deben ganar precisión, nos ponen sobre la pista de las posibles implicaciones ecofisiológicas que el cambio climático puede imponer a los bosques en un

futuro cercano. En esta línea es importante empezar a diseñar estrategias que amortigüen los posibles impactos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la unión Europea, proyectos ATEAM (EVK2-2000-00739) y SILVISTRAT (EVK2-2000-00723), así como por el Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante la acción especial REN2002-10089-E/GLO.

BIBLIOGRAFÍA

COX, P.M.; BETTS, R.A.; JONES, C.D.; SPALL, S.A. & TOTTERDELL I.J.; 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408: 184–187

GRACIA, C.A.; PLA, E.; SANCHEZ, A. Y SABATE, S.; 2004. GOTILWA+: un modelo de crecimiento forestal basado en procesos ecofisiológicos. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 18: 21-28.

GRACIA, C.A.; TELLO, E.; SABATÉ, S. & BELLOT, J.; 1999. GOTILWA: An Integrated Model of Water Dynamics and Forest Growth. Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. *In*: F. Rodá, J. Retana, J. Bellot & C.A. Gracia (Eds.), *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*: 163-178. Springer. Berlin.

HAUHS, M.; 1990. Ecosystem modelling: science or thecnology? *J. Hydrol.* 116:25-33.

IPCC; 2001. Synthesis Report. A contribution of working groups I,II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernamental Panel on Climate Change. *In*: R.T Watson. and the Core Writing Team (eds). *Climate Change 2001.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY.

KRAMER K.; LEINONEN, I.; BARTELINK, H.H.; BERBIGIER, P.; BORGHETTI, M.; BERNHOFER, C.H.; CIENCIALA, E.; DOLMAN, A.J.; FROER, O.; GRACIA, C.A.; GRANIER, A.; GRÜNWALD, T.; HARI, P.; JANS, W.; KELLOMÄKI, S.; LOUSTAU, D.; MAGNANI, F.; MATTEUCCI, G.; MOHREN, G.M.J.; MOORS, E.; NISSINEN, A.; PELTOLA, H.; SABATÉ, S.; SÁNCHEZ, A.; SONTAG, M.; VALENTINI, R. & VESALA, T.; 2002. Evaluation of 6 process-based forest growth models using eddy-covariance measurements of CO2 and H2O fluxes at six forest sites in Europe. *Global Change Biology* 8: 1-18.

MOHREN, G.M.J. & BURKHART, H.E.; 1994. Contrasts between biologically-based process models and management-oriented growth and yield models. *For. Ecol. Manage.* 69: 1-5.