MÁS ALLÁ DE LOS MODELOS DE CRECIMIENTO: MODELOS ECOLÓGICOS HÍBRIDOS EN EL CONTEXTO DEL MANEJO FORESTAL SOSTENIBLE

Juan Antonio Blanco Vaca

Dep. Forest Sciences, University of British Columbia. 2424 Main Mall. VANCOUVER (British Columbia, Canadá V6T 1Z4). Correo electrónico: juan.blanco@ubc.ca

Resumen

El desafío actual en el manejo forestal es la planificación de suministros sostenibles de madera y otros valores forestales, a la vez que se preserva la integridad del ecosistema forestal. En consecuencia, el uso de modelos basados en la simulación de procesos ecológicos se hace cada vez más necesario. Un tipo de modelos especialmente adecuado para su aplicación en la gestión forestal sostenible son los modelos híbridos, que compaginan la robustez y fiabilidad de los modelos estadísticos tradicionales de crecimiento basados en compilaciones de datos de campo con la flexibilidad otorgada por los modelos mecanicistas que simulan procesos ecológicos y la influencia de las condiciones ambientales en los mismos. Los modelos híbridos, por lo tanto, modifican observaciones históricas reales de crecimiento con el conocimiento actual de los procesos fisiológicos que causan ese crecimiento. Estos modelos tienen aplicaciones diversas y en este artículo se mencionan tres aplicaciones del modelo FORECAST en Cuba, China y Canadá. Además, estos modelos pueden combinarse de forma modular con otros modelos para realizar simulaciones múltiples de varios valores ecológicos y socioeconómicos, o usarse de forma secuencial para crear meta-modelos.

Palabras clave: *FORECAST, Modelos modulares, Meta-modelos, Manejo ecosistémico*

INTRODUCCIÓN

Con el aumento constante en la demanda de madera y otros productos alternativos del bosque, en un trasfondo de ecosistemas en continua degradación y teniendo en cuenta el enfoque global del concepto de sostenibilidad, nunca ha habido una mayor necesidad de obtener predicciones creíbles de las consecuencias de estrategias alternativas de manejo forestal. La sostenibilidad de las prácticas forestales se ha vuelto un tema prominente en la última década, debido a la preocupación sobre la sobreexplotación de los recursos forestales (Powers, 2001), los posibles efectos de cambio climático (Watson et *al.*, 1995; Schalm & Ek, 2001), el mantenimiento de la biodiversidad, el uso de los bosques como inmovilizadores de carbono (Seely et *al.*, 2002), o como productores de fuentes alternativas de energía (Kimmins et *al.*, 2006), o de otros valores económicos y culturales diferentes de la producción de madera (Kimmins, 2004). Desgraciadamente, el concepto de "manejo forestal sostenible" raramente se define de forma concreta, y cuando se define es difícil de cuantificar. En su sentido más amplio, sostenibilidad implica una habilidad de mantener perpetuada la productividad y la integridad ecológica del bosque. La necesidad de desarrollar las operaciones forestales de forma sosteni-

ISSN: 1575-2410
© 2012 Sociedad Española de Ciencias Forestales

ble es un hecho reconocido internacionalmente, como lo demuestran los procesos auspiciados por la ONU de Helsinki y Montreal.

En respuesta a la creciente presión social, política y económica para obtener mejores y más variados bienes y servicios del bosque, el concepto se ha generalizado para incluir áreas y usos del bosque mucho más generalizados. WILSON & WANG (1999) definen el manejo forestal sostenible como un grupo de regímenes de manejo que mantienen y refuerzan la salud e integridad a largo plazo del ecosistema forestal y las comunidades dependientes del bosque, mientras se dan las oportunidades ecológicas, económicas, sociales, y culturales para beneficio de presente y futuras generaciones. La industria forestal y la mayoría de las agencias gubernamentales coinciden con el informe Burdtland (W.C.E.D., 1987) y consideran que el manejo forestal sostenible es aquel capaz de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades. Además, cada vez se reconoce más que las prácticas forestales responsables relacionadas son aquellas que son económicamente y medioambientalmente beneficiosas para la comunidad. Por todos estos motivos, el interés en desarrollar y utilizar modelos para mejorar la gestión forestal ha aumentando en gran medida en los últimos años.

TIPOS DE MODELOS FORESTALES

Durante casi dos siglos, las curvas de volumen-edad, curvas de altura-edad, y tablas de volumen han sido la base con la cual los gestores han predicho los rendimientos futuros de los bosques. Estos datos históricos son válidos para una combinación particular de especies y condiciones bióticas y abióticas involucradas en el crecimiento de los árboles. Sin embargo, si ocurren cambios en los regímenes de manejo, en la fertilidad del suelo, o en los impactos humanos en la atmósfera (por ejemplo, el cambio climático o la alteración por polución de la química atmosférica), se alterarán significativamente las condiciones futuras del crecimiento de los bosques. Por lo tanto, las predicciones de los modelos tradicionales de crecimiento y producción probablemente no serán exactas (KIMMINS, 1988, 1990; KORZUKHIN et *al.*, 1996). Estas tablas de crecimiento y producción son modelos basados empíricamente en datos reales observados en el campo: son modelos estadísticos que utilizan una amplia base de datos para interpolar posibles producciones futuras utilizando datos de rodales similares. Sin embargo, no simulan ningún tipo de proceso biológico y por lo tanto no están diseñados para proyectar los efectos del manejo sobre la producción de madera y de una amplia variedad de otros productos y valores no relacionados con la madera (hongos, frutos, plantas, flores, caza, pesca, turismo, etc.). Por estas razones, estos modelos no proveen una base adecuada para comparar los impactos de diferentes estrategias de manejo del bosque en múltiples recursos, ni son convenientes para análisis a nivel de rodal de varias medidas o indicadores de sostenibilidad. Sin embargo, en condiciones estables en las que se sabe que los determinantes del crecimiento y desarrollo del bosque en el futuro no van a diferir en gran medida de las condiciones presentes, estos modelos tienen la gran ventaja de utilizar datos reales que han sido observados en el bosque. Además, requieren muy poco trabajo para su calibración y uso, a parte de datos básicos que definen las características básicas del rodal. En estas condiciones, el uso de tablas de crecimiento y producción podría ser el más conveniente. Estos modelos pueden ser muy útiles, ya que son fáciles de comprender y utilizan pocos datos, permitiendo explorar las tendencias futuras que seguirá el bosque al estar sometido a diferentes tipos de manejo. Modelos de este tipo son NuCSS (VERBURG & JOHNSON, 2001) y PINEL (citado en BLANCO et *al.*, 2005).

Debido a la inflexibilidad de las tablas de crecimiento y producción tradicionales, se ha enfocado recientemente mucho interés y esfuerzo investigador hacia modelos más mecanicistas. Estos modelos simulan procesos biológicos y consisten en las relaciones matemáticas empíricamente derivadas entre una serie de variables independientes y el crecimiento del rodal. Ejemplos de tales modelos desarrollados para bosques y otros ecosistemas pueden encontrarse en las siguientes referencias: SOLLINS et *al.* (1979), RUNNING (1984), BARCLAY & HALL

(1986), PARTON et *al.* (1987), BOSSEL & SCHAFER (1989) o DIXON et *al.* (1990). Aunque los modelos de procesos tienen gran valor heurístico, la mayoría de ellos no son modelos a nivel de ecosistema y raramente se usan en aplicaciones prácticas en silvicultura. Esto se debe principalmente a que no se sabe suficiente sobre los procesos del ecosistema y sus interacciones para combinarlos en un modelo con el propósito de hacer las predicciones exactas del crecimiento del bosque (MOHREN & BURKHART, 1994). Un detallado modelo de simulación de procesos sería el acercamiento ideal para simular el crecimiento y rendimiento del bosque, siempre que hubiera un conocimiento más completo de todos los procesos ecológicos implicados en el crecimiento y desarrollo del rodal. Sin embargo, el gran problema de estos modelos es que cuanto más detallados son (mayor "realismo biológico" incorporado en la estructura del modelo), mayor número y complejidad de datos son necesarios para calibrarlos, con lo que el coste en tiempo, dinero y personal dedicado a esta actividad normalmente los hace inviables como herramientas de análisis al servicio de los gestores forestales. Estos modelos más realistas proceden de formulaciones teóricas que tratan de describir el ecosistema con el máximo detalle posible. Sin embargo, estos modelos suelen omitir uno o más procesos claves para centrarse en otros, por lo que su utilidad está limitada en cuanto a las cuestiones de manejo forestal que pueden responder (KIMMINS, 2004).

Para evaluar los impactos de distintos escenarios de manejo alternativo a nivel de rodal sobra la productividad a largo plazo, los gestores de recursos forestales necesitan modelos forestales basados en la ecología (ROWE, 1961), ya que para simular los procesos que afectan a una población de árboles, es necesario utilizar los conocimientos disponibles sobre como otros elementos del ecosistema (bióticos y abióticos) afectan a esa población. Por este motivo se ha desarrollado un tercer tipo de simuladores del crecimiento y desarrollo de los bosques, intentando combinar los puntos fuertes de los otros dos enfoques y así compensar sus debilidades individuales. Estos "modelos híbridos" utilizan las predicciones de crecimiento (con variables como la producción de biomasa) basándose en datos históricos y las modifican simulando la variación temporal en la competición por recursos naturales, como espacio, luz, nutrientes o agua (KIMMINS et *al.*, 2010). En el caso concreto de los modelos forestales, la disponibilidad de nutrientes es el factor más importante de la simulación de procesos porque es a menudo el factor que mayormente limita el crecimiento del bosque. Además, es el factor que está más sujeto a cambios producidos por las actividades forestales. Sin embargo, la competición por luz o agua también puede ser un componente central de la simulación del desarrollo del rodal. En los últimos años se han desarrollado muchos modelos que simulan los procesos ecológicos de un bosque, y su uso se está revelando de gran importancia para desarrollar una gestión forestal que busque la sostenibilidad del sistema de explotación. Estas herramientas permiten que sistemas complejos y no lineales sean investigados y los datos conseguidos puedan ser interpretados con más facilidad (WALLMAN et *al.*, 2002). Aunque los modelos híbridos se sitúan en un nivel más bajo de realismo que los modelos de procesos puros, proporcionan flexibilidad ante los cambios en el ambiente de crecimiento de los árboles, y evitan la complejidad de los modelos basados únicamente en procesos fisiológicos (KIMMINS, 2004). Algunos de los ejemplos de modelos más desarrollados en esta "categoría híbrida" que son convenientes para la valoración de los impactos a largo plazo de las actividades forestales sobre la productividad de los rodales incluyen LINKAGES (PASTOR & POST, 1985) o FORECAST (KIMMINS et *al.*, 1999).

UTILIDAD DE LOS MODELOS FORESTALES PARA EL DESARROLLO DE UNA GESTIÓN FORESTAL SOSTENIBLE

El desafío actual en el manejo forestal es la planificación a varias escalas espaciales de suministros sostenibles de madera y otros valores forestales, a la vez que se preserva la integridad del ecosistema forestal. Este paradigma de la silvicultura moderna propone un cambio en las estrategias de manejo tradicionales, pasando de un manejo enfocado en árboles o rodales indivi-

duales a un manejo del paisaje como conjunto. Por lo tanto, el verdadero manejo ecosistémico (o silvicultura ecológica, diseñada para utilizar los recursos forestales sólo en la medida en que la composición, función y estructura de los ecosistemas forestales no estén amenazadas), tiende a operar a escalas espaciales y temporales mucho más grandes que las prácticas silvícolas tradicionales, aunque algunos tipos de prácticas ecosistémicas se han aconsejado a nivel de rodal (KORZUKHIN et *al.*, 1996; KIMMINS et *al.*, 2010). El manejo forestal ecosistémico requiere: (1) determinar las opciones de manejo para un amplio rango de escalas espaciales; (2) predecir los efectos a largo plazo de las acciones de manejo; (3) entender los efectos del manejo sobre la diversidad biológica; (4) predecir la influencia de los componentes específicos (p.e., legados biológicos, comunidades del sotobosque) sobre el sistema en su conjunto; (5) proyectar la dinámica poblacional de un amplio rango de especies; (6) comparar perturbaciones naturales frente a perturbaciones de origen humano y (7) determinar la influencia climática global sobre bosques específicos. Sin embargo, todas estas demandas están caracterizadas por una complejidad extraordinaria, una disponibilidad limitada de hipótesis mecanicistas y una escasez de datos con los que evaluar estas hipótesis (GALINDO-LEAL & BUNNELL, 1995). Además, la gran complejidad inherente en los estudios realizados a nivel de ecosistema, en los que multitud de componentes bióticos y abióticos se entrelazan, se multiplica a la hora de estudiar ecosistemas forestales, ya que los períodos de estudio son necesariamente mucho más largos que en otras ciencias biológicas, como la agricultura. Por este motivo, el uso de modelos ecosistémicos puede ser una herramienta muy buena para sustituir complicados y costosos diseños experimentales, y para guiar la investigación de una forma más efectiva (KIMMINS et *al.*, 2010). Claros ejemplos de esta utilidad de los modelos como sintetizadores de información a nivel de ecosistema son los trabajos realizados por BI et *al.* (2007) para analizar las causas del descenso de la productividad en plantaciones de abetos en China, o por BLANCO (2007), quien estudió la importancia de la simulación de interacciones alelopáticas en ecosistemas con fuerte presencia de sotobosques de ericáceas.

Las perturbaciones naturales (plagas de insectos, fuegos, vientos huracanados) o artificiales (fuegos, manejo forestal) operan simultáneamente en más de una escala temporal o espacial, generando un complejo mosaico de paisajes forestales que a su vez influyen en la regeneración de los bosques (WEI et *al.*, 2003). Debido a esto, la única forma de evaluar los impactos a largo plazo sobre grandes áreas con diferentes regímenes de perturbaciones a nivel de paisaje es por medio de simulaciones (SHUGART, 1998). La modelización de procesos ecológicos a nivel de paisaje se alimenta de los datos recogidos en silvicultura, biología, geografía y teledetección. Los avances en la capacidad de los equipos informáticos, la reducción de los costes de estos equipos y del software utilizado en las aplicaciones SIG y teledetección proporcionan los fundamentos para el tipo de simulación espacial que se presentan en este capítulo, pero a su vez los modelos espaciales deben estar basados en la simulación de los procesos ecológicos del bosque.

Como ejemplo de la utilidad de los modelos, puede citarse el uso del modelo PINEL (BLANCO et *al.*, 2005) para estudiar la sostenibilidad de la práctica de claras en los montes Pirineos llevado a cabo por el Grupo de Ecología de la Universidad Pública de Navarra (Pamplona). En este trabajo se simularon los principales flujos de nutrientes del bosque: crecimiento, desfronde, retranslocación, descomposición, absorción radicular y manejo silvícola, obteniéndose las pérdidas potenciales de nutrientes que sufre un bosque durante su explotación (Figura 1). Estas pérdidas son la suma de los nutrientes extraídos del bosque más los arrastrados por lixiviación cuando la mineralización desde los restos vegetales en descomposición supera a la absorción radicular de los árboles. Puede establecerse como criterio de sostenibilidad que las pérdidas por causas antrópicas no superen las entradas al ecosistema de forma natural, o de lo contrario sería necesaria la fertilización para evitar un descenso en las reservas de nutrientes. Asumiendo este criterio, por medio del modelo puede escogerse un plan de claras, es decir, una combinación de porcentaje de área basal a retirar y de los años entre claras sucesivas, unido a la elección de la extracción del fuste o del árbol completo, que permanezca den-

tro de los límites de la sostenibilidad. También por medio de éste u otros modelos similares puede estudiarse el efecto del cambio global sobre los ciclos de nutrientes y la sostenibilidad de la gestión forestal. Así, es esperable que las emisiones antrópicas eleven la cantidad de nitrógeno y otros nutrientes que entran al ecosistema por medio de la deposición atmosférica (WEI et *al.*, 2011). En el modelo, esto supondría una elevación del nivel límite de extracción de nutrientes (Figura 1, línea horizontal). Sin embargo, un aumento de las temperaturas provocaría una descomposición más rápida de los restos vegetales, por lo que aumentaría la mineralización de los nutrientes de la hojarasca en descomposición y como consecuencia también aumentarían las pérdidas potenciales por lavado.

El uso de un modelo en la gestión forestal depende de varios factores. En primer lugar, el modelo debe ser adecuado para los objetivos escogidos. Si se pretende explorar el comportamiento de un rodal a largo plazo, el uso de modelos basados en procesos fisiológicos diseñados para simular variaciones en plantas individuales no es adecuado. En segundo lugar, debe ser posible revisar y entender las reglas y principios en los cuales el modelo está basado, a la vez que debe poder probarse el modelo para las condiciones de uso particulares de cada rodal (WALLMAN et *al.*, 2002). Esto implica que la mayoría de los modelos actuales, desarrollados para latitudes altas de América o de Europa, necesitan una comprobación rigurosa en condiciones mediterráneas, subtropicales o tropicales, ya que no suelen contemplar las particularidades de los ecosistemas más meridionales, como una respuesta diferente de la descomposición a las claras (BLANCO et *al.*, 2011), o la mayor importancia de la biomasa subterránea en bosques perennes de hoja ancha respecto a los de coníferas. En tercer lugar, debe tenerse en cuenta la escala, tanto espacial como temporal, ya que los modelos difícilmente se integran en escalas diferentes a las empleadas en su desarrollo (AGREN et *al.*, 1991). Por último no debe olvidarse que los mejores modelos no son los más complejos, si no que los que con un adecuado nivel de acercamiento a la realidad necesitan un esfuerzo asumible para determinar sus parámetros y proporcionan resultados adecuados a la actividad de gestión que se va a llevar a cabo en el bosque.

EL MODELO DE MANEJO FORESTAL DE NIVEL ECOSISTÉMICO FORECAST

FORECAST es un simulador no espacial del ecosistema forestal a nivel de rodal y orientado al manejo forestal (KIMMINS et al., 1999; 2010). Este modelo ha sido diseñado para simular una

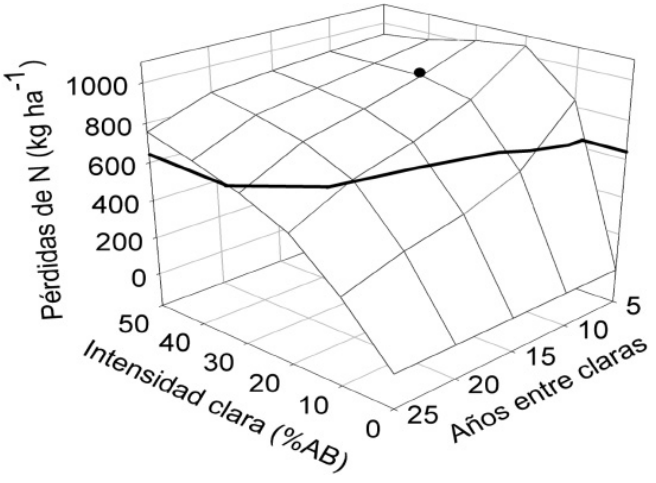


***Figura 1**. Salidas de nitrógeno acumuladas durante 100 años en un bosque de Pinus sylvestris L. en los montes Pirineos occidentales, en función de la intensidad de clara (en tanto por ciento de área basal retirada en cada clara) y los años que pasan entre una clara y la siguiente. La línea horizontal representa las entradas naturales de nitrógeno (precipitación y deposición atmosférica) en el ecosistema acumuladas durante el mismo período. El punto representa el plan de manejo tradicionalmente utilizado en los bosques de la zona: aclareo del 30% del área basal cada diez años. Adaptado de BLANCO et al. (2005)*

amplia variedad de sistemas silvícolas con el objetivo de comparar y contrastar sus efectos sobre la productividad del bosque, la dinámica del rodal y una amplia serie de indicadores biofísicos y valores alternativos a la madera. El modelo utiliza un enfoque híbrido, en el cual datos locales de crecimiento y producción (obtenidos de tablas de crecimiento tradicionales o de estudios de cronosecuencias) son utilizados para calcular estimaciones de las tasas de procesos ecosistémicos clave relacionados con la productividad, y los requerimientos de recursos de las especies seleccionadas asociados a esos procesos. Esta información se combina con datos que describen tasas de descomposición, ciclo de nutrientes, competición por luz y otras propiedades ecosistémicas, permitiendo simular el crecimiento del bosque bajo diferentes alternativas de manejo. El crecimiento de la vegetación se lleva a cabo en incrementos anuales. Dependiendo de las especies simuladas, las poblaciones de plantas en el sotobosque se originan a partir de semillas o por medio de reproducción vegetativa (tubérculos o rizomas). La descomposición se simula utilizando un método en el cual componentes específicos de la biomasa aérea son transferidos en el momento de su abscisión a una serie de tipos de hojarasca independientes (Figura 2). Estos tipos de hojarasca se descomponen y cambian de composición química a unas tasas definidas por datos empíricos, procedentes de trabajos de campo o de la literatura.

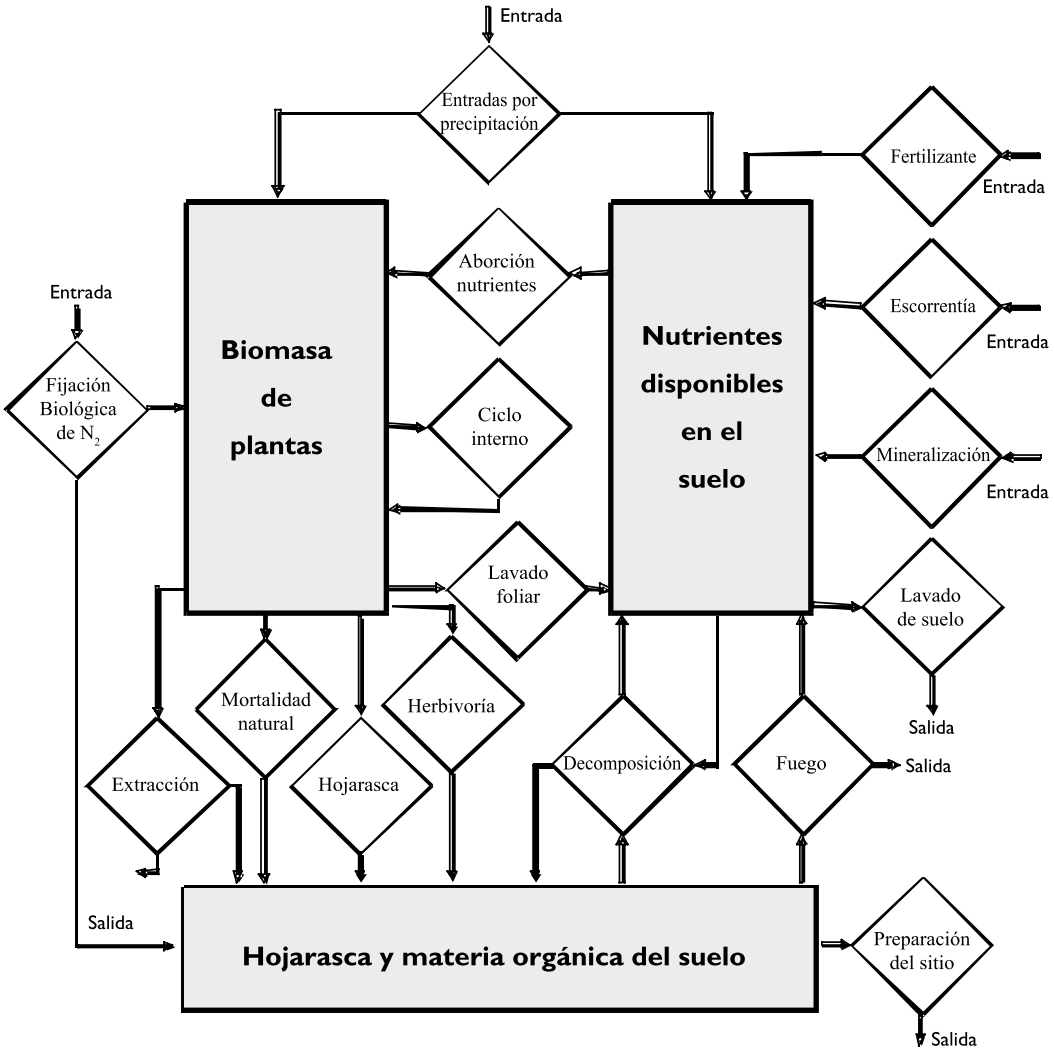


***Figura 2**. Representación del ciclo de nutrientes en FORECAST. Los rombos representan procesos del ciclo biogeoquímico, y los rectángulos representan los reservorios de nutrientes simulados por el modelo*

Debido a que FORECAST es un modelo a nivel de ecosistema, los datos necesarios para calibrarlo son más numerosos que en los modelos tradicionales de crecimiento y producción. Se necesitan datos de altura, densidad del rodal, distribución de tamaños dentro del rodal, acumulación de biomasa, concentración de nutrientes en los distintos componentes de la biomasa, entradas de nutrientes en el ecosistema (deposición atmosférica, mineralización), lavado foliar, tasas de producción de hojarasca, adaptación fotosintética del follaje y otra información variada sobre propiedades físicas o químicas del rodal en una secuencia de lugares que varían en la calidad del sitio. Para más información sobre los datos necesarios para la calibración de este modelo y la sensibilidad del modelo a diferentes variables, consultar KIMMINS et *al.* (1999).

Siendo un modelo de manejo forestal, FORECAST puede simular una amplia variedad de prácticas silvícolas diferentes, incluyendo fertilización, cortas parciales, podas, aclareos, manejo de rodales mixtos, etc. Perturbaciones como fuego o defoliación por insectos también pueden ser simuladas. Las proyecciones de volumen simuladas por FORECAST están limitadas en última instancia por la producción potencial de las especies incluidas en la simulación y que son descritas en los datos de calibración. El crecimiento y producción en rodales complejos se basa en la simulación del reparto de los recursos limitantes (luz y nutrientes) entre las distintas especies y cohortes de edades simuladas. Las propiedades biológicas de las especies determinan su competencia relativa para la obtención de los recursos limitantes. Una descripción más completa del modelo y más detalles del proceso de calibración puede hallarse en KIMMINS et *al.* (1999), SEELY et *al.* (2002) y BLANCO et *al.* (2007).

El uso del modelo FORECAST se realiza en dos fases, una primera fase de calibración y una fase posterior de simulación y análisis de los resultados. En la fase de calibración se recogen los datos que definen la acumulación de biomasa en los árboles y la vegetación acompañante. Unidos a los datos sobre la respuesta del follaje a la luz, la humedad y los nutrientes en el suelo, la descomposición de la hojarasca y otras condiciones ambientales, estos datos son utilizados para estimar las tasas a las cuales los procesos ecosistémicos clave deben operar para generar los datos observados en el campo. A continuación, estas tasas calibran internamente las simulaciones de los procesos en FORECAST. La fase de calibración se completa con el establecimiento de las condiciones iniciales de la simulación, que reflejan la historia del uso y las perturbaciones naturales del bosque a simular. En la segunda fase se lleva a cabo la simulación propiamente dicha. El crecimiento anual potencial de la vegetación se deriva de la producción fotosintética de la biomasa foliar. A su vez, la capacidad productiva de una cantidad dada de biomasa foliar se asume que es dependiente de su contenido de nitrógeno, corregido por el grado de sombreado de la masa foliar. Las tasas fotosintéticas están expresadas por kilogramo de biomasa de follaje, ya que se ha comprobado que el contenido de nitrógeno es una mejor medida del funcionamiento del aparato fotosintético (BRIX, 1971; AGREN, 1983). Por último, una de las características más importantes de FORECAST es su capacidad de simular el cambio de calidad del rodal a lo largo del turno de corta, al tener en cuenta la reducción en la disponibilidad de nutrientes, cambios en las tasas de descomposición, etc. De esta forma, se mejoran las predicciones frente a los modelos tradicionales de crecimiento y producción, que comúnmente carecen de la habilidad de predecir mejoras o deterioros en la calidad productiva de un rodal como consecuencia de las actividades silvícolas.

ALGUNAS APLICACIONES ACTUALES DEL MODELO FORECAST

En el pasado, este modelo ha sido ampliamente utilizado en una gran variedad de aplicaciones de manejo forestal como son: (1) el establecimiento de la materia orgánica del suelo como un indicador de la sostenibilidad relativa de diferentes alternativas de manejo del rodal (MORRIS et *al.*, 1997); (2) la evaluación de la capacidad de fijación de carbono en ecosistemas boreales (SEELY et *al.*, 2002); (3) el análisis de la utilidad del sistema de cortas en dos fases en los bosques mixtos (WELHAM et *al.*, 2002); (4) el estudio del impacto del fuego y las cortas en la

productividad a largo plazo en pinares (WEI et *al.*, 2003); (5) la aplicación de un sistema de apoyo a la decisión que utiliza una jerarquía de modelos espaciales y no espaciales para la evaluación de diferentes estrategias de manejo forestal con múltiples objetivos (SEELY et *al.*, 2004); (6) Estudio de la productividad del rodal en choperas sometidas a múltiples turnos de corta a corto plazo en tierras previamente agrícolas, bajo diferentes regímenes de fertilización y competencia del sotobosque en el centro de Canadá (WELHAM et *al.*, 2007); y (7) la simulación de distintos regímenes de fertilización y aclareo en plantaciones de abeto Douglas en el oeste de Vancouver (BLANCO et *al.*, 2007). Algunas de las aplicaciones más destacadas del modelo en la actualidad se describen a continuación (ver Tabla 1 para una lista detallada de usos actuales del modelo).

Análisis de las posibles causas de disminución de la productividad en plantaciones de abeto en China. En las plantaciones de abeto chino (*Cunninghamia lanceolata*) en el suroeste de China se observa un importante descenso en la productividad de las plantaciones tras dos o más turnos de corta. Existe una variedad de hipótesis que intentan explicar este fenómeno, pero la dificultad de implementar experimentos de campo sugiere que un modelo ecosistémico es la opción más viable para examinar estas hipótesis. El modelo FORECAST se está utilizando para evaluar un modelo conceptual de relaciones entre los diferentes elementos del ecosistema (BI et *al.*, 2007). Los resultados del modelo sugieren que la disminución de la productividad está causada principalmente por un descenso en la fertilidad del suelo, principalmente como consecuencia de la quema de restos de corta en combinación con turnos demasiado cortos. Además, cuando la cobertura arbórea desciende después de una o dos rotaciones por debajo de un nivel crítico, se produce una cambio en la forma en la que sotobosque se regenera, pasando de regeneración por semillas a rizomas, con lo que la competencia con los árboles durante los primeros años de la rotación se intensifica hasta un punto en el cual los árboles apenas pueden desarrollarse (Figura 3), supo-

Tipo de bosque	Zona geográfica	Aplicación	Referencia
Boreal	Canadá norte	Simulación de regeneración en bosques boreales	BLANCO et *al.* (2009)
Semi-boreal	British Columbia, Canadá	Uso de la materia orgánica del suelo como un indicador de sostenibilidad	SEELY et *al.* (2010)
Templado	British Columbia, Canadá	Impacto a largo plazo de la introducción de árboles resistentes a plagas	SCHWAB et *al.* (2011)
Templado: Plantaciones de *Thuja plicata*	British Columbia, Canadá	Importancia de la alelopatía en la producción de madera	BLANCO (2007)
Templado: Plantaciones de *Pseudotsuga menzinesii*	British Columbia, Canadá	Efectos ecológicos a largo plazo del manejo intensivo para biomasa	BLANCO (2011)
Semitropical / Templado	China, Canadá	Búsqueda del nivel adecuado de complejidad en modelos forestales	KIMMINS et *al.* (2008)
Semitropical: Plantaciones de *Cunninghamia lanceolata*	SE de China	Contaminación atmosférica y plantaciones de abeto en China	BLANCO et *al.* (2011) WEI et *al.* (2011)
Tropical: Plantaciones de *Pinus caribaea*	Pinar del Río, Cuba	Optimización del sistema de producción de madera	BLANCO & GONZÁLEZ (2010a)
Tropical: Plantaciones de *Pinus caribaea*	Pinar del Río, Cuba	Efectos ecológicos a largo plazo del manejo intensivo para biomasa	BLANCO & GONZÁLEZ (2010b)

***Tabla 1**. Aplicaciones actuales del modelo FORECAST (KIMMINS et al., 1999, 2010)*

niendo el fallo de la plantación. Este problema se intensifica en los sitios pobres en nutrientes, en los que el sotobosque puede ser un competidor demasiado fuerte para los árboles.

Estudio del efecto del grosor de la capa de suelo y régimen de fertilización necesario para una recuperación de zonas de arenas bituminosas tras su explotación. Canadá es un productor de petróleo a nivel mundial, principalmente extraído en explotaciones a cielo abierto localizadas en la zona de arenas bituminosas del interior de Canadá. Tras acabar la extracción de petróleo, las compañías tienen la obligación de recuperar el ecosistema forestal existente en la zona. Para ello deben seleccionar una determinada cantidad de suelo que debe depositarse sobre las arenas lavadas, unas especies de árboles que pueden plantarse en la zona y un régimen de fertilización que ayuda a mejorar la productividad de las zonas recuperadas. En este contexto, FORECAST está siendo utilizado para ayudar a comparar distintas opciones de manejo con el objetivo de seleccionar el plan de recuperación que tiene más posibilidades de éxito. En los resultados se pudo apreciar claramente cómo es mucho más importante la profundidad de la capa del suelo que la cantidad de nitrógeno aportado por medio de la fertilización. La producción de volumen se triplica cuando se utiliza un suelo mucho más. También hay un salto importante de una situación sin fertilización a otra en la que aplica nitrógeno, si bien las diferencias entre 50, 100 y 150 kg por hectárea son pequeñas y además disminuyen con un suelo más grueso. Esto es un indicativo de que con un suelo más grueso, los árboles están cerca de alcanzar su potencial de producción máxima, y adiciones de nitrógeno de más de 50 $kg \cdot ha^{-1}$ no tienen prácticamente impacto en la producción de madera a largo plazo. En todos los casos, una parte importante de todos estos proyectos es el estudio de la fiabilidad de las predicciones producidas por el modelo. Esto se ha realizado comparando las predicciones del modelo con datos reales procedentes de parcelas experimentales. En todos los casos, el modelo se comportó de una forma más que adecuada produciendo predicciones suficientemente fiables. Un trabajo específico de evaluación de este modelo en plantaciones de abeto Douglas en la costa de la Columbia Británica está explicado con detalle en BLANCO et *al.* (2007).

Estudio del efecto del grosor de la capa de suelo y régimen de fertilización necesario para una recuperación de zonas de arenas bituminosas tras su explotación. En Cuba, la situación económica actual de falta de disponibilidad de energía y productos químicos ha hecho que el uso de las plantaciones de pino caribeño (*Pinus caribaea*) empiece a ir más allá de la típica producción de madera. Otras posibilidades son la producción de pulpa para fibra y otros productos

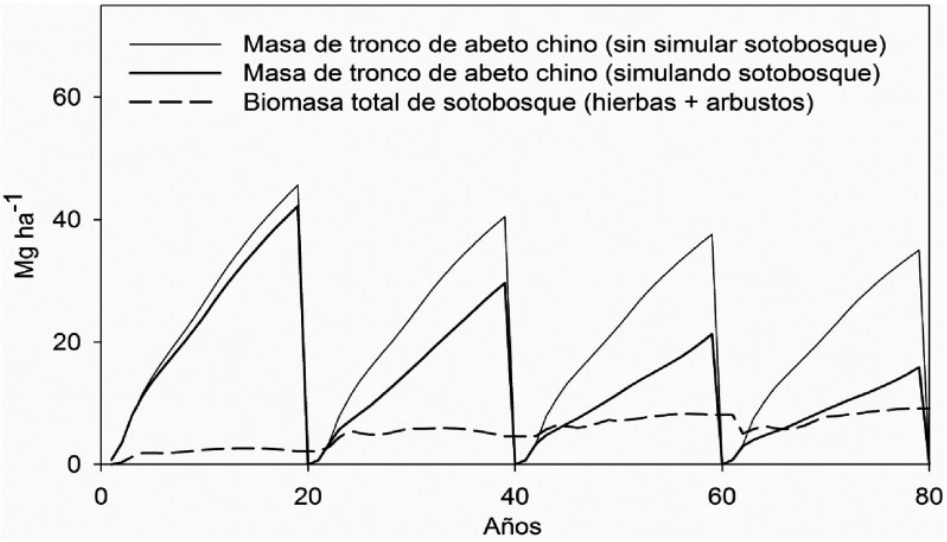


Figura 3*. Resultados de la simulación de cuatro turnos consecutivos de 20 años de duración cada uno en un rodal de abeto chino. Las líneas muestras resultados alternativos si se simula o no la presencia de sotobosque*

químicos o la producción de biomasa para la generación de energía. Sin embargo, el cambio de madera a otros sistemas más intensivos de producción puede provocar cambios en el ecosistema (Figura 4). En concreto, si se extrae más materia orgánica de las plantaciones y se reducen los turnos, el sotobosque puede expandirse al reducirse el sombreado de los árboles, así como la materia orgánica en el suelo podría reducirse al reducirse los aportes de hojarasca a la misma. Todo ello combinado produciría una paulatina reducción del crecimiento de los árboles, que se traduciría en una reducción en la capacidad de almacenamiento de carbono por parte de estos bosques (BLANCO & GONZÁLEZ, 2010a,b).

EL FUTURO DE LOS MODELOS FORESTALES

Una de las realidades más claras del uso de modelos forestales es que ningún modelo puede hacerlo todo (KIMMINS et *al*., 2010). Por lo tanto, en el manejo forestal sostenible, el futuro no es el desarrollo de un nuevo modelo que intente integrar todos los procesos ecológicos y datos de campo que existen a muy diversas escalas de tiempo y espacio. Por el contrario, ya existen modelos muy desarrollados que han sido diseñados para escalas específicas, y por lo tanto es más adecuado aumentar la interconexión de modelos entre sí. Hay dos formas típicas de conseguir este objetivo:

Modelos modulares. En la actualidad existe una gran experiencia acumulada en modelos forestales. Una forma de aprovechar esta experiencia a la vez que se expanden las escalas de aplicación de modelos individuales es el uso de modelos modulares. En estos modelos, cada modelo individual se convierte en un módulo que está conectado a otros modelos que funcionan a escalas diferentes. La particularidad de estos modelos es que funcionan de forma simultánea, influyendo las variables de estado de un módulo en las de los demás. Por lo tanto, es necesario un conocimiento profundo de todos los módulos para conseguir que funcionen de una forma coordinada. La ventaja es que se pueden estimar simultáneamente los efectos de una variable a una escala y extrapolarlos a otras esca-

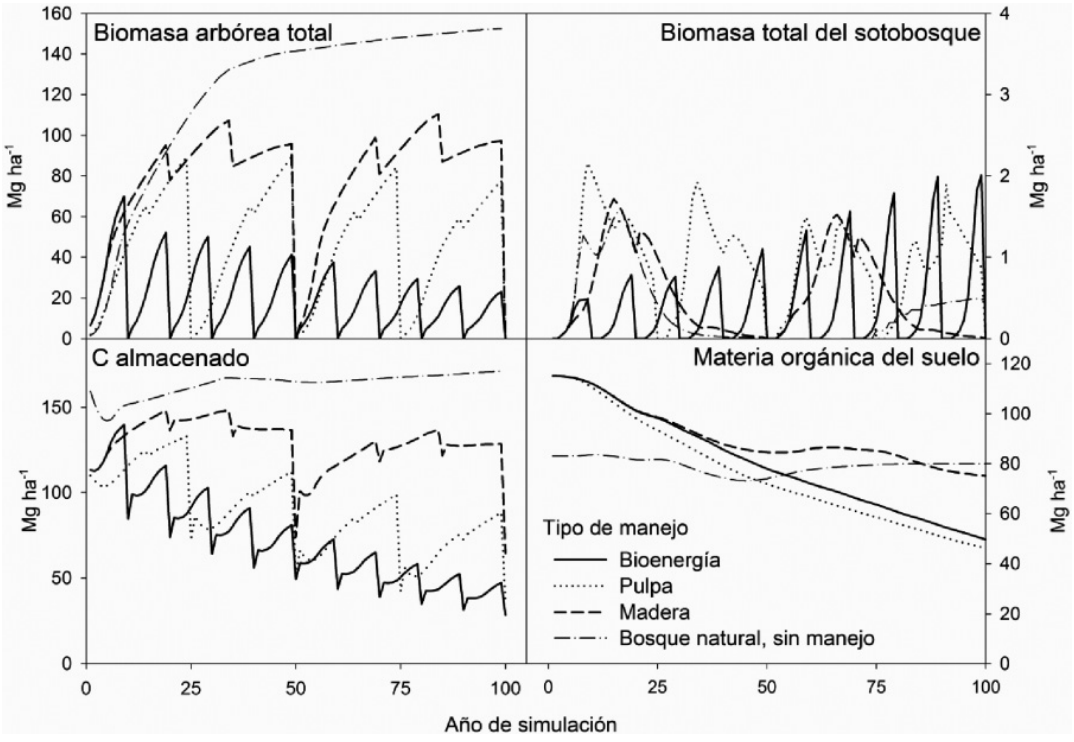


Figura 4. *Evolución de cuatro variables ecosistémicas en una plantación de Pinus caribaea en Pinar del Río (Cuba), sometida a cuatro tipos diferentes de manejo*

las. Un ejemplo es el trabajo en la Universidad de la Columbia Británica (Figura 5).

FORCEE (KIMMINS et *al.*, 2010) es un modelo diseñado para el análisis de rodales complejos, ya lo sean en estructura vertical, horizontal, composición de especies y edades o en la variación espacial de las características del suelo inducidas por la comunidad biológica. FORCEE es un modelo de árbol individual, espacialmente explícito, que funciona a nivel de rodal y con una orientación hacia el manejo forestal. Está basado en la misma filosofía de modelización que el modelo anteriormente descrito (FORECAST), del que es una extensión a escalas más pequeñas. Como en el caso anterior, FORCEE es un modelo híbrido en el cual las reglas de simulación están basadas en datos de entrada que describen el crecimiento observado de árboles y sotobosque en varios lugares de contrastada calidad nutricional. FORCEE simula el crecimiento de árboles y sotobosque, basándose en una simulación de la fotosíntesis, el ciclo de nutrientes, la regulación del crecimiento por limitación de nutrientes y la competencia interespecífica por la luz y nutrientes disponibles. FORCEE simula la luz disponible a diferentes alturas y localizaciones en una malla tridimensional de 10 x 10 cm. Además, en esa misma malla se incorporan datos de producción de hojarasca, y también tiene rutinas que simulan el ciclo de nutrientes, el sotobosque, las capas del suelo, la competición por nutrientes y su limitación al crecimiento, hábitats para fauna, cambio climático y perturbaciones naturales.

LLEMS (Local Landscape Ecosystem Management System) es el último de los componentes de esta familia de modelos (SEELY et *al.*, 2008; KIMMINS et *al.*, 2010). LLEMS está conectado conceptualmente al resto de modelos, y es un desarrollo de FORECAST y PFF. Este modelo ha sido específicamente diseñado para ayudar a los gestores forestales a analizar los impactos a largo plazo que la corta en retención variable puede producir en diversos indicadores de sostenibilidad. LLEMS ha sido desarrollado sobre una plataforma SIG para facilitar la unión entre diferentes modelos ya existentes y datos espaciales procedentes de inventarios, con el objetivo de desarrollar una herramienta de análisis de escenarios de manejo. Esta herramienta está basada en el conocimiento ecológico actual, es espacialmente explícita, y puede ser utilizada en el análisis de una amplia variedad de alternativas de formas de rodal, orientación y estrategias de

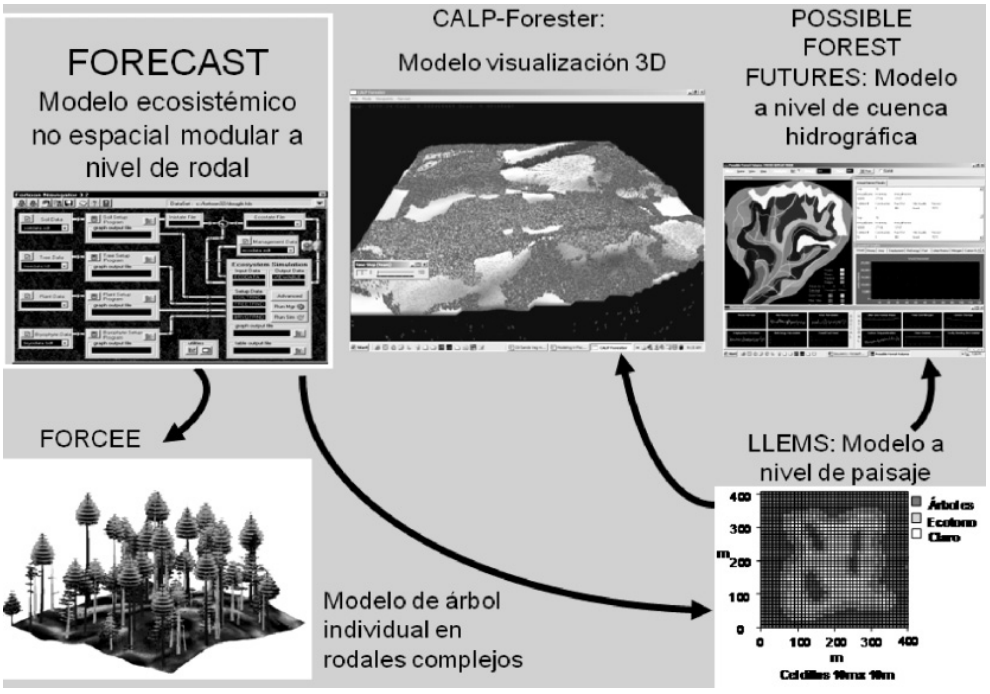


***Figura 5**. Relaciones entre los modelos desarrollados por el Grupo de Simulación Forestal de U.B.C.*

corta. Este modelo opera a una escala espacial intermedia equivalente a grandes rodales o a un grupo de rodales (de 20 a 2.000 hectáreas). El crecimiento del bosque en LLEMS se simula a nivel de píxeles o de grupos de píxeles con características ecológicas similares. Los principales componentes de LLEMS se centran en la simulación de la regeneración, crecimiento y desarrollo del bosque, una interfaz visual de manejo que representa el área en 3D y permite el diseño interactivo de los rodales (CALP-Forester), herramientas para exportar los resultados del modelo a otros sistemas de visualización y la evaluación del riesgo de daños por viento.

Meta-modelos. Distintos grupos de investigación pueden generar distintos modelos forestales que trabajen a distintas escalas espaciales y temporales. Es posible utilizar más de un modelo creado por distintos grupos para realizar proyectos que afecten a distintas escalas espaciales, temporales o de valores ecológicos y socio-económicos. Para ello es necesario que los datos de salida de un modelo sean fácilmente adaptados, leídos o interpretados por el modelo siguiente en la cadena de utilización (Figura 6). El modelo a nivel de rodal FORECAST genera una biblioteca de resultados con las distintas variables ecológicas (volumen, árboles muertos, carbono, cobertura del sotobosque, etc) para cada tipo de rodal. El modelo a nivel de paisaje ATLAS (NELSON, 2003) utiliza los datos generados por FORECAST para optimizar el calendario de cortas de una zona dividida en distintos polígonos, cada uno con un bosque homogéneo correspondiente con uno de los tipos de rodales simulados por FORECAST. Además, el modelo SIMFOR (DAUST & SUTHERLAND, 1997) utiliza los datos de FORECAST para similar cada uno de los pixeles en los que divide la región, asumiendo que cada pixel es un bosque homogéneo. Para ayudar a la interpretación, tanto los datos generados por FORECAST como por ATLAS pueden ser utilizados para calibrar SVS y ENVISION, dos herramientas de visualización creadas por el U.S.D.A. De esta forma, es posible explorar las implicaciones del manejo en muchas más facetas del manejo forestal sostenible que utilizando cada modelo por separado.

CONCLUSIONES

Si se unen modelos forestales creíbles con sistemas de visualización que representen las predicciones de esos modelos de una forma visual (fotos, películas) y no solamente por

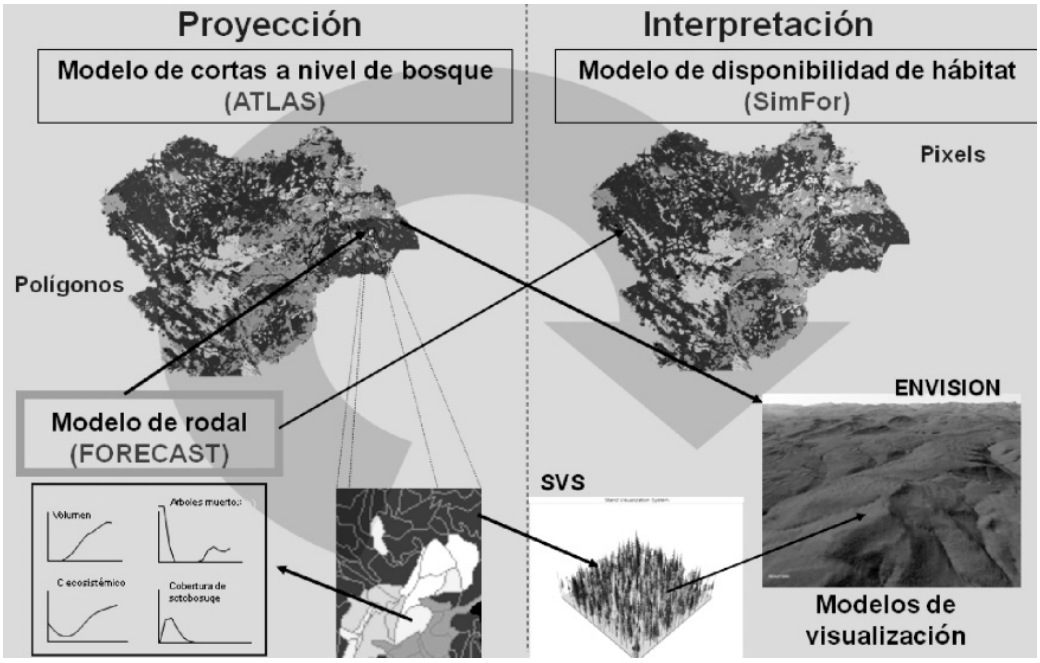


***Figura 6**. Interconexiones entre modelos desarrollados independientemente*

medio de tablas y gráficas (difíciles de entender para el público poco acostumbrado a tecnicismos forestales), los modelos ecológicos también pueden ayudar a comunicar las posibles consecuencias de distintas alternativas de manejo a grupos interesados en la gestión forestal que carezcan de habilidades técnicas. Esta característica es muy importante cuando se trata de desarrollar planes de manejo forestal en los cuales la comunicación entre distintos grupos implicados en el manejo con distintitos niveles de habilidades técnicas podría resultar problemática por las dificultades en transferir información ecológica y forestal entre esos grupos. Dado que los principales usuarios de los modelos mencionados hasta ahora y otras herramientas de modelización forestal son los gestores forestales, es importante que el flujo de información entre los científicos que desarrollan los modelos y los gestores forestales que los necesitan se mejore para construir modelos que se adapten mejor a sus objetivos. Los científicos necesitan proporcionar a los gestores no solamente predicciones cuantitativas, sino también información sobre la certeza de las predicciones de los modelos de manejo forestal (Blanco et *al.*, 2007).

BIBLIOGRAFÍA

Agren, G.I.; 1983. Nitrogen productivity of some conifers. *Can. J. For. Res.* 13, 494–500.

Agren, G.I.; McMurtrie, R.E.; Parton, W.J.; Pastor, J. & Shugart, H.H.; 1991. State-of-the-Art of models of production-decomposition linkages in conifer and grassland ecosystems. *Ecol. Appl.* 1: 118-138.

Barclay, H.J. & Hall, T.H.; 1986. *Shawn: A model of Douglas-fir Ecosystem Response to Nitrogen Fertilization and Thinning: A Preliminary Approach.* Forestry Canada, Pacific Forestry Centre, Victoria.

Bi, J.; Blanco, J.A.; Seely, B.; Kimmins, J.P.; Ding, Y. & Welham, C.; 2007. Yield decline in Chinese-fir plantations: A simulation investigation with implications for model complexity *Can. J. For. Res.* 37: 1615-1630.

Blanco, J.A.; 2011. Recovery of Douglas-fir forest ecosystems may take centuries after management for biofuel and pulp production. *Ecosystems*, en revisión.

Blanco, J.A.; 2007. The representation of allelopathy in ecosystem-level forest models. *Ecol. Model.* 209: 65-77.

Blanco, J.A. & González, E.; 2010a. The legacy of forest management in tropical forests: analysis of its long-term influence with ecosystem-level model. *For. Systems* 19: 249-262.

Blanco, J.A. & González, E.; 2010b. Exploring the sustainability of current management prescriptions for Pinus caribaea plantations in Cuba: a modelling approach. *J. Trop. For. Sci.* 22: 139-154.

Blanco, J.A; Welham, C.; Kimmins, J.P.; Seely, B. & Mailly, D.; 2009. Guidelines for modeling natural regeneration in boreal forests. *For. Chron.* 85: 427-439.

Blanco, J.A.; Zavala, M.A.; Imbert, J.B. & Castillo, F.J.; 2005. Evaluation of thinning sustainability using a nutrient cycling simulation model. *Forest Ecol. Manage.* 213, 209-228.

Blanco, J.A.; Seely, B.; Welham, C.; Kimmins, J.P. & Seebacher, T.M.; 2007. Testing the performance of a forest ecosystem model (FORECAST) against 29 years of field 2 data in a Pseudotsuga menziesii plantation. *Can. J. For. Res.* 37: 1808-1820

Blanco, J.A.; Wei, X.; Jiang, H.; Jie, C.Y. & Xin, Z.H.; 2011. Enhanced nitrogen deposition in south-east China could partially offset acid rain negative effects in Chinese fir plantations. *Env. Pollut.,* en revisión.

Brix, H.; 1971. Effects of nitrogen fertilization on photosynthesis and respiration in Douglas-fir. *For. Sci.* 17: 407–414.

Bossel, H. & Schafer, H.; 1989. Generic simulation model of forest growth, carbon and nitrogen dynamics and application to tropical acacia and European spruce. *Ecol. Model.* 48: 221-265.

Daust, D.K. & Sutherland, G.D.; 1997. SIMFOR: software for simulating forest management and assessing effects on biodiversity. *In*: I.D. Thompson (Ed.), *The Status of Forestry/ Wildlife Decision Support Systems in Canada: Proceedings of a Symposium*: 15–29. Natural resources Canada, Canadian

Forestry Service, Great Lakes Forestry Centre. Sault St. Marie.

DIXON, R.K.; MELDAHL, R.S.; RUARK, G.A. & WARREN, W.G.; 1990. *Process Modelling of Forest Growth Responses to Environmental Stress.* Timber Press. Portland.

GALINDO-LEAL, C. & BUNNELL, F.L.; 1995. Ecosystem management: implications and opportunities of a new paradigm. *For. Chron.* 71: 601-606.

KIMMINS, J.P.; 1988. Community organization: methods of study and prediction of the productivity and yield of forest ecosystems. *Can. J. Bot.* 66: 2654–2672.

KIMMINS, J.P.; 1990. Modelling the sustainability of forest production and yield for a changing and uncertain future. *For. Chron.* 66: 271–280.

KIMMINS, J.P.; 2004. *Forest Ecology. A foundation for sustainable management and environmental ethics in forestry.* Prentice Hall, New Jersey.

KIMMINS, J.P.; BLANCO, J.A.; SEELY, B.; WELHAM, C. & SCOULLAR, K.; 2010. *Forecasting Forest Futures: A Hybrid Modelling Approach to the Assessment of Sustainability of Forest Ecosystems and their Values.* Earthscan Ltd. Londres.

KIMMINS, J.P.; BLANCO, J.A.; SEELY, B.; WELHAM, C. & SCOULLAR, K.; 2008. Complexity in Modeling Forest Ecosystems; How Much is Enough? *Forest Ecol. Manage.* 256: 1646-1658.

KIMMINS, J.P.; BLANCO, J.A.; ZHONG, A.; SEELY, B. & WELHAM, C; 2006. Biofuels as an ecosystem management non-timber forest product: Assessing the tradeoffs. *IEA Bioenergy workshop. Biofuels and Bioenergy: Challenges and opportunities.* Vancouver.

KIMMINS, J.P.; MAILLY, D. & SEELY, B.; 1999. Modelling forest ecosystem net primary production: the hybrid simulation approach used in FORECAST. *Ecol. Model.* 122: 195-224.

KORZUKHIN, M.D.; TER-MIKAELIAN, M.T. & WAGNER, R.G.; 1996. Process versus empirical models: which approach for forest ecosystem management? *Can. J. For. Res.* 26: 879-887.

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

MORRIS, D.M.; KIMMINS, J.P. & DUCKERT, D.R.; 1997. The use of soil organic matter as a criterion of the relative sustainability of forest management alternatives: a modelling approach using FORECAST. *Forest Ecol. Manage.* 94: 61-78.

NELSON, J.; 2003. *Forest Planning Studio (FPS)-ATLAS Program: Reference Manual Version 6.* Faculty of Forestry, University of BC. Vancouver.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C. & OJIMA, D.S.; 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am.* J. 51: 1173-1179.

PASTOR, J. & POST, W.M.; 1985. *Development of a Linked Forest Productivity–Soil Process Model.* Oak Ridge Nat. Lab. Oak Ridge.

POWERS, R.F.; 2001. Assessing Potential Sustainable Wood Yield. *In*: J. EVANS (Ed.) *The Forestry Handbook. Vol 2. Applying Forest Science for Sustainable Management.* Blackwell Science Ltd. Oxford.

ROWE, J.S.; 1961. The level-of-integration concept and ecology. *Ecology* 42: 420-427.

RUNNING, S.W.; 1984. *Documentation and Preliminary Validation of H2OTRANS and DAYTRANS, Two Models for Predicting Transpiration and Water Stress in Western Coniferous Forests.* US For. Serv. Res. Portland.

SCHWAB, O.; MANESS, T.; BULL, G.Q.; WELHAM, C.; SEELY, B. & BLANCO, J.A.; 2011. Modelling the timber supply impact of introducing weevil-resistant spruce in British Columbia. *For. Pol. Econom.* 13: 61-68.

SCHWALM, C. & EK, A.R.; 2001. Climate change and site: relevant mechanisms and modeling techniques. *Forest Ecol. Manage.* 150: 241-257.

SEELY, B.; BLANCO, J.A.; WELHAM, C.; KIMMINS, J.P.; SCOULLAR, K. & CAVENS, D.; 2008. LLEMS: un modelo espacialmente explícito para el manejo forestal sostenible. *En*: F.T. Maestre, A. Escudero y A. Bonet (eds.), *Introducción al análisis especial en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones*: 677-696. Dykinson S.L. Madrid.

SEELY, B.; NELSON, J.; WELLS, R.; PETER, B.; MEITNER, M.; ANDERSON, A.; HARSHAW, H.; SHEPPARD, S.; BUNNELL, F.L.; KIMMINS, H. & HARRISON, D.; 2004. The application of a hierarchical, decision-support system to evaluate multi-objective forest management strategies: a case study in northeastern British Columbia, Canada. *Forest Ecol. Manage.* 199: 283-305.

SEELY, B.; WELHAM, C. & BLANCO, J.A.; 2010. Towards the application of soil organic matter as an indicator of ecosystem productivity: Deriving thresholds, developing monitoring systems, and evaluating practices. *Ecol. Indica.* 10: 999-1008.

SEELY, S.; WELHAM, C. & KIMMINS, H.; 2002. Carbon sequestration in a boreal forest ecosystem: results from the ecosystem simulation model, FORECAST. *Forest Ecol. Manage.* 169: 123-135.

SHUGART, H.H.; 1998. *Terrestrial ecosystems in changing environments.* Cambridge University Press. Cambridge.

SOLLINS, P.A.; BROWN, A.T. & SWARTZMAN, G.; 1979. *CONIFER: a model of carbon and water flow trough a coniferous forest (revised documentation).* Coniferous Forest Biome Bulletin 15, University of Washington. Seattle.

VERBUG, P.S.J. & JOHNSON, D.W.; 2001. A spreadsheet-based biogeochemical model to simulate nutrient cycling processes in forest ecosystems. *Ecol. Model.* 141: 185-200.

WALLMAN, P.; SVERDRUP, H.; SVENSSON, M.G.E. & ALVETEG, M.; 2002 Integrated modelling. *In*: H. Sverdrup & I. Stjernquist (eds), *Developing principles and models for sustainable forestry in Sweden*: 57-83. Kluwer Academic Publishers. Dodrecht.

WATSON, R.T.; ZINYOWERA, M.C. & MOSS, R.H.; (Eds); 1995. *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge.

WEI, X.; BLANCO, J.A.; JIANG, H. & KIMMINS, J.P.; 2011. Effects of nitrogen deposition on carbon sequestration in Chinese fir forests. *Ecosystems*, en revisión.

WEI, X.; KIMMINS, J.P. & ZHOU, G.; 2003. Disturbances and the sustainability of long-term site productivity in lodgepole pine forests in the central interior of British Columbia – an ecosystem modeling approach. *Ecol. Model.* 164: 239-256.

WELHAM, C.; SEELY, B. & KIMMINS, H.; 2002. The utility of the two-pass harvesting system: an analysis using the ecosystem simulation model FORECAST. *Can. J. For. Res.* 32: 1071-1079.

WELHAM, C.; SEELY, B.; VAN REES, K. & KIMMINS, H.; 2007. Projected long-term productivity in Saskatchewan hybrid poplar plantations: weed competition and fertilizer effects. *Can. J. For. Res.* 37: 356-370.

WILSON, B. & WANG, S.; 1999. Sustainable forestry--the policy prescription in British Columbia. *In*: A. Yoshimoto & K. Yukutake (eds.), *Global Concerns for Forest Resource Utilization--Sustainable Use and Management*: 35-45. Kluwer Academic Publishers. Londres.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT; 1987. *Our common future*. Oxford University Press. Oxford.