

PRINCÍPIOS PARA A MODELAGEM DE ECOSSISTEMAS FLORESTAIS

Hubert Hasenauer

A utilização de modelos para representação e explicação de uma realidade essencialmente mais complexa constitui estratégia de grande valia para o desenvolvimento da ciência, nos diferentes campos do conhecimento. No caso específico das florestas, três formas de modelagem de ecossistemas merecem destaque. Os modelos destinados à prognose da produção florestal, como as tabelas de produção e os que tomam por base as árvores singulares, os modelos de clareiras (gap models), que servem à descrição da sucessão florestal, e, por fim, os modelos denominados mecanísticos ou biogeoquímicos, que consideram a circulação, transformação e acumulação de energia, água e nutrientes em estruturas vivas. Não há, contudo, supermodelos capazes de responder a todas as questões. O princípio a ser utilizado dependerá sempre do objeto e do objetivo da modelagem.

A modelagem de ecossistemas

Ecossistemas são unidades muito complexas que não podem ser descritas através de poucos parâmetros. Além disso, existem múltiplas interações entre os diferentes componentes que dificultam ainda mais seu equacionamento. Em contraposição, os modelos de ecossistemas devem preencher três requisitos, muitas vezes concorrentes entre si: ser simples, lógicos e reproduzir a realidade biológica¹. Já que os levantamentos a campo, via de regra, só são possíveis em períodos relativamente curtos e em espaços reduzidos, os modelos representam um valioso instrumento, especialmente para a descrição de processos de longa duração. Desta forma, podem ser feitas extrapolações para comportamentos dinâmicos de longa duração e para grandes espaços, com suas diversas interações.²

A complexidade e a multiplicidade dos ecossistemas exigem, para sua descrição, a formulação de modelos que possam apresentar o conhecimento existente de forma sistemática, transparente e, sobretudo, reprodutível, na dependência dos objetivos desejados. O conhecimento sobre as propriedades e processos inerentes a um determinado ecossistema pode ser rudimentar em muitos aspectos, o que faz com que os modelos assumam um importante papel na pesquisa, pois que podem evidenciar lacunas do conhecimento. Nestes casos são assumidas suposições simples que podem ser complementadas, quando houver disponibilidade de resultados de pesquisas.

Na linguagem científica, entende-se por modelo a apresentação simplificada de uma realidade essencialmente mais complexa³ ou a apresentação igualmente simplificada de uma parcela do mundo real⁴. Os modelos, portanto, contêm sempre certo grau de abstração. Através da modelagem se constroem sistemas mais simples que a realidade, mas que, mesmo assim, apresentam as propriedades de interesse e o padrão de comportamento do sistema real.⁵ Os modelos podem-se apresentar sob diferentes formas. Por um lado, diferenciam-se os internos, isto é, conceituais e, por outro lado, os externos, construídos sobre os primeiros (modelos físicos, gráficos, matemáticos e, ultimamente, os computacionais).⁶

A modelagem pressupõe uma abordagem analítica e sistemática de um problema (Figura 1). Após a formulação do problema, são determinados os objetivos a alcançar. Com isto ocorre uma delimitação do modelo quanto à sua aplicabilidade e capacidade de reprodução da realidade. Quando se pretende entender os processos envolvidos em um ecossistema, o objetivo pode ser a descrição de suas características estruturais ou o estudo de interferências no mesmo por um grande espectro de condicionantes. Num processo retroativo de refinamento, a partir de um con-

¹ PACALA, S. W., CANHAM, C. D., SAPONARA, J., SILANDER, J. A. Jr., KOBE, R. K. and RIBBENS, E. Forest Models Defined by Field Measurements: Estimation, Error Analysis and Dynamics. *Ecological Monographs*, 66 (1): 1-43, 1996.

² PACALA, S. W., CANHAM, C. D., SAPONARA, J., SILANDER, J. A. Jr., KOBE, R. K. and RIBBENS, E. Op. cit., 1996.

³ SHUGART, H. H. *Terrestrial Ecosystems in Changing Environments*. Cambridge: University Press, 1998.

⁴ BOTKIN, D. B. *Forest Dynamics. An Ecological Model*. Oxford: Oxford University Press, 1993.

⁵ VAN TONGEREN, O. and PRENTICE, I. C. A Spatial Simulation Model for Vegetation Dynamics. *Vegetation*, 65:163-173, 1986.

⁶ KIMMINS, J. P. *Forest Ecology: Models and The Role in Ecology and Resource Management*. New York: Macmillan Publishing Company, 1987. p. 460-474.

ceito (princípio) é desenvolvido, como produto final, um modelo, geralmente computacional. Nesse trabalho deve-se realizar o planejamento dos recursos, isto é, o uso do conhecimento existente (na forma de consulta a experts, a publicações específicas), o emprego dos dados disponíveis (quantidade e precisão) e a aplicação criteriosa de materiais (hardware, software, recursos financeiros)

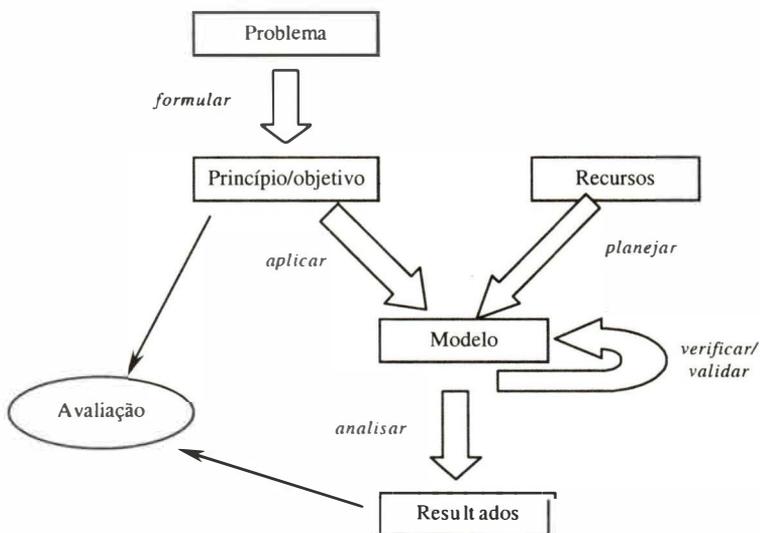


Figura 1
Esquema da análise de um sistema.

Um passo decisivo na modelagem é a verificação de sua consistência com observações diretas na natureza. Outro passo é o seu teste de consistência com um conjunto de dados que não tenha sido utilizado para o próprio desenvolvimento do modelo (validação)⁷. Somente a verificação e a validação podem levar a um sistema funcional que permita a generalização do mesmo. Na seqüência, os resultados são analisados e avaliados em relação aos objetivos definidos.

O grau de detalhamento dos dados de entrada limita o detalhamento da saída. O número de variáveis de entrada é também decisivo para a praticabilidade do modelo. Quanto mais dados são necessários para a parametrização, tanto mais custoso é o levantamento e tanto mais provável é a possibilidade de que os dados de um determinado setor estejam disponíveis apenas para curto período de tempo. Isto é mais válido para dados dinâmicos do que para dados estáticos. Em princípio, o alcance temporal e espacial do modelo é determinado pelo conhecimento metodológico, pela disponibilidade de dados e pelos objetivos da modelagem.

⁷ SHUGART, H. H. Op. cit., 1998.

Os diversos processos desenvolvem-se geralmente em escalas espaciais e temporais bem distintas (Figura 2). Na modelagem deve-se atentar para que as partes unitárias do modelo apresentem escalas semelhantes (*well-balanced model*), atenção tanto mais necessária quanto mais se procura pesquisar as interações entre os diferentes processos.

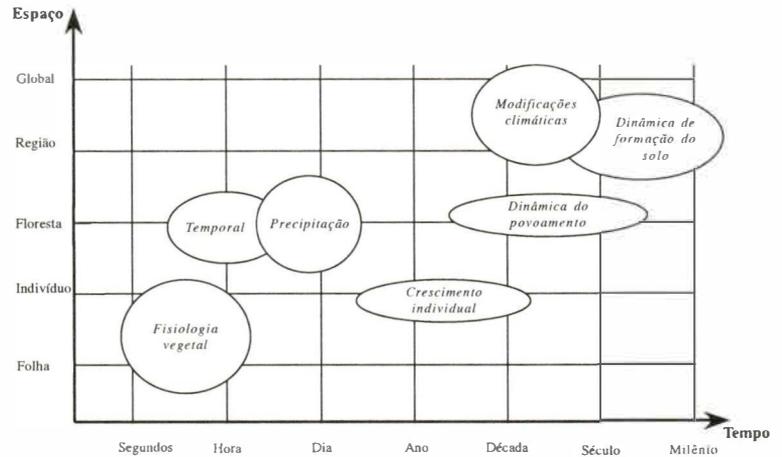


Figura 2
Dimensões temporais e espaciais em diferentes processos ecossistêmicos.

Dado o diferente alcance espacial e temporal, fica claro que não pode existir um modelo válido de forma genérica, sem que se incorra em problemas de precisão ou de validade dos resultados simulados para determinados setores. Ao invés disso, se deveria procurar construir modelos divididos em módulos que, segundo a necessidade, pudessem ser modificados e ampliados.

Os modelos servem para a reunião de informações sobre um determinado sistema em questão (esclarecimento da realidade, demonstração das propriedades do sistema, teste de hipóteses, identificação de falhas de informação) e devem permitir também verificar as modificações e os processos envolvidos. Exatamente para o estudo de dinâmicas que, em regra, decorrem muito lentamente (longos períodos de produção, sucessões em períodos de décadas até séculos), os modelos representam importantes instrumentos de diagnose e planejamento. Os progressos na tecnologia computacional durante os últimos trinta anos possibilitaram o desenvolvimento e a aplicação de modelos muito exigentes em cálculos e em memória. Neste processo, foram e estão sendo desenvolvidos sempre novos princípios que, em essência, podem ser divididos conforme o esquema da Figura 3.

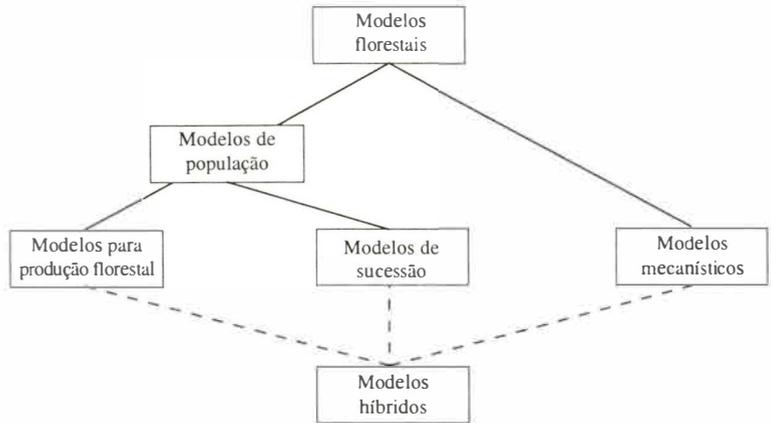


Figura 3

Classificação dos princípios da modelagem de ecossistemas.

Modelos para produção florestal

A situação das florestas em um dado momento é obtida por censos ou por amostragens dos povoamentos. Tais levantamentos periódicos representam a situação florestal atual de uma determinada região. No planejamento e na execução de intervenções na floresta, feitos pela silvicultura e manejo, fica patente a impossibilidade da adoção de ações objetivas sem o conhecimento da situação atual e o provável desenvolvimento da floresta. Paralelamente ao levantamento estático, interessa, portanto, a dinamização das informações obtidas.

Evolução histórica

A estimativa do desenvolvimento futuro da floresta é feita com base em modelos que descrevem o crescimento de povoamentos puros e equiâneos, usando valores médios (diâmetro médio, altura média) e valores acumulados por unidade de área (número de árvores/ha, área basal/ha e volume/ha). Pressupõe-se que um povoamento, em um determinado habitat, percorre um desenvolvimento típico próprio. Com base nessa premissa, criam-se povoamentos de referência, para cada espécie e sítio em forma de tabelas de produção.⁸ Esses modelos de crescimento florestal sustentam-se, em parte, no paradigma de cronosséries⁹, conceito que parte da idéia de que um povoamento jovem irá se desenvolver exatamente da mesma forma que se desenvolveu outro mais velho, situado em iguais condições ecológicas e, portanto, percorrerá as mesmas fases de desenvolvimento durante sua vida. Assim a seqüência temporal (cronossérie), obtida por parcelas de observação permanente, é substituída por uma seqüência espacial. A

⁸ WEISE, W. *Ertragstafeln für die Kiefer*. Berlin: Verlag Springer, 1880.

SCHWAPPACH, A. *Wachstum und Ertrag normaler Fichtenbestände*. Berlin: Verlag Julius Springer, 1890.

GUTTENBERG, A. Die Aufstellung von Holzmassen- und Geldertragstafeln von Stammanalysen. *Österr. Vierteljahresschrift. f. Forstw. Wien.*, 36: 203-237 und 319-345, 1896.

GERHARDT, E. *Ertragstafeln für reine und gleichartige Hochwaldbestände von Eiche, Buche, Tanne, Fichte, Kiefer, grüner Douglasie und Lärche*. Berlin: Verlag Julius Springer, 1930.

ASSMANN, E. und FRANZ, F. Vorläufige Fichten-Ertragstafeln für Bayern. *Forstw. Centralblatt*, 84: 1-68, 1963.

KENNEL, R. Die Buchen-durchforstungsversuche in Bayern von 1870 bis 1970. Institut für Ertragskunde der Forstl. *Forschungsanstalt München.*, 7: 264, 1972.

SCHÖBER, R. *Ertragstafeln wichtiger Baumarten*. Frankfurt/Main: J. D. Sauerländer Verlag, 1975.

MARSCHALL, J. *Hilfstafeln für die Forsteinrichtung*. Wien: Österr. Agrarverlag, 1975.

⁹ MARSCHALL, J. Op. cit., 1975.

¹⁰MARSCHALL, J. Op. cit., 1975.

¹¹ASSMANN, E. und FRANZ, F. Op. cit., 1963.

LEMBCKE, G., KNAPP, E. und DITTMAR, O. *DDR-Kiefern-Ertragstafel*. Institut für Forstwissenschaften, Eberswalde, 1975.

DITTMAR, O., KNAPP, E. und LEMBCKE, G. *DDR-Buchenertragstafel*. Institut für Forstwissenschaften, Eberswalde, 1983.

¹²PRETZSCH, H. *Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände*. Institut für Ertragskunde der Forstl. Forschungsanstalt München. 115-332, 1992.

HASENAUER, H. *Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände*. Forstl. Schriftenreihe, Univ. f. Bodenkultur, Wien. Österr. Ges. f. Waldökosystemforschung und experimentelle Baumforschung an der Univ. f. Bodenkultur. Band 8, 1994.

NAGL, J. BWERT: Programm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesbehandlung. *Deutscher Verband Forstl. Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde*. Eberswalde/Berlin. 184-198, 1995.

STERBA, H., MOSER, M., HASENAUER, H. und MONSERUD, R. *PROGNAUS ein abstandsabhängiger Wachstumssimulator für ungleichaltrige Mischbestände*. Deutscher Verband Forstl. Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde. Eberswalde/Berlin. 173-183, 1995.

¹³FILLA, K. Die Parametrisierung von Einzelstammwachstumsmodellen über die bei der Forstinventur erhobenen Daten. Diss. Univ. f. Bodenkultur, Wien, 1981.

STERBA, H. Single stem models from inventory data

aceitação do conceito de cronossérie como verdadeiro, conduz a uma metodologia que tem a vantagem de não necessitar longo tempo de observação para as prognoses.

Algumas tabelas de produção pressupõem uma forma de condução do povoamento¹⁰ ou permitem determinados princípios de tratamento através de fatores de redução do crescimento¹¹, mas os resultados das prognoses são igualmente valores médios e somatórios por unidade de área. Outra limitação dos modelos de tabelas de rendimento é sua aplicabilidade apenas para povoamento puros e equiâneos. A estimativa da porcentagem de cada espécie componente do povoamento, tradicionalmente feita para a prognose do crescimento florestal, corresponde à segregação de um povoamento misto, em povoamentos puros e equiâneos idealizados.

A idéia dos modelos baseados em árvores singulares segue um princípio totalmente diverso. O ponto de partida é a aceitação de que o desenvolvimento do povoamento pode ser captado pela soma das modificações observadas em cada árvore.

Consciente da necessidade prática da adaptação do sistema de prognose, iniciou-se na Europa, especialmente nos anos 90, o desenvolvimento de modelos que descrevessem o crescimento de cada árvore no povoamento. Os trabalhos de Pretzsch e de outros autores¹², são exemplos destes modelos, listados no Quadro 1. Trabalhos anteriores de Filla, Sterba e Eckmullner¹³ criaram os fundamentos para tanto. Em essência, os princípios já utilizados na América do Norte, há mais tempo, foram adaptados para florestas européias.¹⁴

Estrutura geral

A modelagem do crescimento florestal baseada em árvores singulares é composta por três módulos: crescimento dimensional (diâmetro e altura), mortalidade e regeneração (recrutamento ou ingresso de plantas). Para a concorrência há necessidade de modelagem da copa, de modo que suas dimensões sejam atualizadas a cada passo de simulação.

Uma importante hipótese adotada é a de que as modificações, com o passar do tempo, isto é, o crescimento de cada árvore, pode ser descrito com suficiente exatidão através de simples características do povoamento, da própria árvore e da concorrência. As variáveis mais importantes para a descrição da concorrência são a proporção de copa e diversos outros índices. A proporção de copa atual espelha a pressão sofrida no passado, enquanto os índices representam a concorrência atual sobre a árvore. Alguns modelos consideram ainda possíveis retardamentos ou acelerações temporárias, ocasionadas por liberações, cujo efeito é explicitamente adicionado como variável ao módulo de crescimento diamétrico e em altura.¹⁵

with temporary plots. *Mitt. d. Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien.*, 147: 87-101, 1983.
ECKMÜLLNER, O. WASIM - Waldwachstumssimulation. *Hozwirtschaft, Wald und Holz Rundschau.* 46(1): 24-25, 1990.

- ¹⁴NEWNHAM, R. M. The development of a stand model for Douglas-fir. Ph.D. thesis. Vancouver: Univ. of British Columbia, 1964.
MITCHELL, K. J. Simulation of growth of uneven-aged stands of white spruce. Ph. D. thesis, Yale Univ., New Haven, Conn., 1967.
BELLA, I. E. Simulating of growth, yield and management of aspen. Ph. D. thesis, Univ. of British Columbia, Vancouver, 1970.
STAGE, A. R. Prognosis model for stand development. USDA For. Serv. Res. Paper INT-137. p. 32, 1973.
MONSERUD, R. A. Methodology for simulating Wisconsin northern hardwood stand dynamics. Ph. D. thesis, Univ. of Wisconsin, Madison, 1975.
WYKOFF, W., CROOKSTON, N. L. and STAGE, A. R. *User's Guide to the Stand Prognosis Model.* USDA For. Serv. GTR INT-133, 1982.

¹⁵HASENAUER, H. Op. cit., 1994.

- ¹⁶STAGE, A. R. Op. cit., 1973.
EK, A. R. and MONSERUD, R. A. *FOREST: A computer model for simulating the growth and reproduction of mixed species stands.* Univ. Wisconsin, College of Agriculture and Life Sciences. Res. Rep. R2635, 1974.
PRETZSCH, H. Op. cit., 1992.
HASENAUER, H., MOSER, M. und ECKMÜLLNER, O. MOSES - Ein Einzelbaumwachstumssimulator zur Modellierung von Wachstumsreaktionen. *AFZ.*, 50 (4): 216-218, 1995.
NAGL, J. Op. cit., 1995.

Quadro 1
Seleção de modelos para produção florestal em diferentes ecossistemas

Modelo	Autor(es) ¹⁶	Ecossistema florestal representado
PROGNOSIS	Stage, 1973; Wykoff <i>et al.</i> , 1982	Independente da distância; florestas mistas inequidistantes noroeste dos EUA
FOREST	Ek and Monserud, 1974	Crescimento e reprodução de florestas mistas
SILVA	Pretzsch, 1992	Florestas puras e mistas
MOSES	Hasenauer <i>et al.</i> , 1995	Dependente da distância; florestas alpinas mistas
PROGNAUS	Sterba <i>et al.</i> , 1995	Independente da distância; florestas alpinas mistas inequidistantes
BWERT	Nagl, 1995	Avaliação e manejo de florestas mistas

Os exemplos apresentados no Quadro 1 podem ser classificados em dois grupos. Uma parte deles baseia-se no conceito de potencial, propagado pela primeira vez por Newnham¹⁷ e usado posteriormente nos modelos de clareiras (*gap-models*)¹⁸. O fundamento deste princípio é a aceitação de que o crescimento de cada árvore no povoamento depende de um potencial definido anteriormente (= incrementos máximos em diâmetro e em altura). O incremento real resulta da aplicação de fatores de redução, deduzidos, por sua vez, da concorrência exercida sobre cada árvore. Neste tipo enquadram-se os modelos FOREST, SILVA, MOSES, BWERT.

A outra parte dos exemplos não define nenhum potencial de crescimento. Os incrementos diamétrico e em altura são estimados diretamente dos dados disponíveis. Com base neste princípio, trabalham os modelos PROGNOSIS, PROGNAUS e STAND.

Outra interessante caracterização de tais modelos se refere ao cálculo dos índices de concorrência. Se for considerada explicitamente a distância até suas vizinhas, o que pressupõe o conhecimento das coordenadas de cada árvore, trata-se de modelos dependentes da distância também chamados espaciais (FOREST, MOSES, SILVA). Ao contrário, aqueles que não precisam da posição das árvores para o cálculo da concorrência, são ditos modelos independentes da distância ou não espaciais (PROGNOSIS, PROGNAUS, BWERT, STAND).

Aplicações

O modelos para produção florestal, sejam eles as tabelas de produção ou os que tomam por base árvores singulares, representam o fundamento para a determinação da taxa de exploração nas empresas florestais. Outra área de aplicação, especialmente dos

STERBA, H., MOSER, M., HASENAUER, H. und MONSERUD, R. A. Op. cit., 1995.

PUKKALA, T. and MIINA. A method for stochastic multiobjectives optimization of stand management. *Forest Ecol and Manage.*, 98: 189-203, 1997.

¹⁷NEWHAM, R. M. Op. cit., 1964.

¹⁸BOTKIN, D. B. ; JANAK, J. F. and WALLIS, J. R. Some Ecological Consequences of a Computer Model of Forest Growth. *Journal of Ecology*, 60:849-872, 1972 .

¹⁹HASENAUER, H. and MONSERUD, R. A. Biased predictions for tree height increment models developed from smoothed "data". *Ecol. Modelling*, 98: 13-22, 1997.

²⁰STAGE, A. R. Prediction of height increment for models of forest growth. *USDA For. Serv. Res. Paper INT-164*, 1975.

²¹HASENAUER, H. Höhenzuwachsmodelle für die wichtigsten Baumarten Österreichs. *Forstwiss. Centralblatt*, 118: 14-23, 1999.

²²HASENAUER, H., MONSERUD, R. A. and GREGOIRE, T. G. Using simultaneous regression techniques with individual-tree growth models. *Forest Sci.*, 44 (1): 87-95, 1998.

²³HASENAUER, H. *Die simultanen Eigenschaften von Waldwachstumsmodellen*. Berlin: Paul Parey, 2000.

²⁴BOTKIN, D. B., JANAK, J. F. and WALLIS, J. R. Op. cit., 1972.

²⁵SHUGART, H. H. and SMITH, T. M. A Review of Forest Patch Models and their Application to Global Change Research. *Climatic Change*., 34:131-153, 1996.

SHUGART, H. H. Op. cit., 1998.

modelos baseados em árvores singulares, reside na simulação de variantes de desbaste e liberações, tanto em povoamentos equiâneos quanto nos inequiâneos.

Limitações

Já que os modelos para produção florestal têm como pressuposto a imutabilidade do sítio (habitat) e são deduzidos, exclusivamente, de relações estatísticas, a disponibilidade de dados apropriados constitui importante aspecto para sua parametrização. Dados apropriados significam que os mesmos devem ser independentes de oscilações casuais (por exemplo, influenciados por efeitos climáticos passageiros) e, sobretudo, representativos em relação à prognose desejada dos efeitos de intervenções silviculturais.

Além disso, deve-se considerar a precisão das medições das variáveis de entrada. Um exemplo típico é a medição do incremento em altura, obtido de árvores em pé, através de levantamentos periódicos. A imprecisão da medição muitas vezes é tão elevada que os resultados devem ser atribuídos mais ao acaso do que às correlações encontradas.¹⁹ Para a pesquisa do incremento em altura, a situação fica mais favorável quando se dispõe de dados oriundos de análise de tronco²⁰ ou de medições feitas em árvores abatidas²¹. Finalmente, deve-se apontar que as funções de crescimento dos modelos para produção florestal representam um sistema simultâneo de equações. Neste caso, deveriam, então, ser usados os assim chamados métodos simultâneos de regressão.²² Os modelos PROGNAUS e MOSES consideram esses aspectos com vistas a aumentar a precisão de estimativas futuras.²³

Modelos de sucessão (modelos de clareiras, gap-models)

Os modelos de sucessão representam um princípio da modelagem de ecossistemas que, semelhante aos de produção florestal, baseia-se na observação da árvore dentro de uma unidade maior. Assim, podem ser considerados como uma derivação dos modelos de população (ver Figura 3). Como nos modelos de árvores singulares, também aqui faz-se uso do conceito de crescimento potencial. Diferentemente dos modelos de produção florestal, o crescimento atual não é reduzido por índices de concorrência, mas sim através das chamadas funções-resposta para luz, água, nutrientes.²⁴

Os *gap-models* descrevem a sucessão de ecossistemas em um plano espacial relativamente pequeno. A área pesquisada tem a dimensão ocupada por um pequeno número de indivíduos maduros que, em regra, corresponde ao tamanho de um *plot* de mapeamento de vegetação (100 a 1.000 m²).²⁵ Os modelos de sucessão estruturam-se de acordo com a seguinte idéia: uma determinada área

- ²⁶BOTKIN, D. B., JANAK, J. F. and WALLIS, J. R. Op. cit., 1972.
BOTKIN, D. B. Op. cit., 1993.
- ²⁷SHUGART, H. H. and WEST, D. C. Development of an Appalachian deciduous forest succession model and its application to assessment of the impact of the chestnut blight. *Journal of Environmental Management*, 5: 161-179, 1977.
- ²⁸DOYLE, T. W. The Role of Disturbance in the Gap Dynamics of a Montaine Rain Forest: An Application of a Tropical Forest Succession Model. In: WEST, D. C., SHUGART, H. H. and BOTKIN, D. B. (eds.): *Forest Succession: Concepts and Application*. New York: Springer Verlag, 1981, p. 56-73.
- ²⁹VAN TONGEREN, O. and PRENTICE, I. C. Op. cit., 1986.
- ³⁰MENAUT, J. C., GIGNOUX, J., PRADO, C. and CLOBERT, J. Tree Community Dynamics in a Humid Savanna of the Cote-d'Ivoire: Modelling the Effects of Fire and Competition with Grass and Neighbors. *Journal of Biogeography*, 17: 471-481, 1990.
- ³¹COFFIN, D. P. and LAUENROTH, W. K. Disturbances and Gap Dynamics in a Semiarid Grassland: A Landscape-Level Approach. *Landscape Ecology*, 3: 19-27, 1989.
- ³²BUGMANN, H., XIAODONG, Yan, SYKES, M. T., MARTIN, Ph., LINDNER, M., DESANKER, P. V. and CUMMING, S. G. A comparison of forest gap models: Model structure and behaviour. *Clim. Change.*, 34:289-313, 1996.
- ³³BUGMANN, H. On the Ecology of Mountainous Forests in a Changing Climate: A

(*patch*, fragmento) representa a zona de influência de uma grande árvore adulta. Com sua morte forma-se uma clareira na qual se estabelece a regeneração que entra novamente em crescimento.

Evolução histórica

O primeiro modelo de sucessão típico foi o JABOWA, desenvolvido para a descrição da dinâmica da floresta experimental Hubbard Brook, no noroeste do EUA.²⁶ Apoiando-se no conceito de potencial difundido por Newham em 1964 para os modelos de produção florestal, Botkin e colaboradores expressaram o crescimento de cada árvore na dependência de luz, água e disponibilidade de nutrientes, através das citadas funções-resposta. Este princípio foi modificado por Shugart e colaboradores e ampliado para o modelo FORET.²⁷

Na seqüência foram desenvolvidos *gap-models* para os mais diversos ecossistemas florestais que, em sua concepção inicial, baseavam-se no modelo JABOWA-FORET, e que, desde então, não se diferenciam muito em sua estrutura. Utilizam apenas princípios mais detalhados, por vezes, mecanísticos e, portanto, mais reais (por exemplo, consideração explícita da concorrência espacial entre as árvores, inclusão de processos fisiológicos, simulação de uma larga faixa de condições ambientais).

Uma seleção de tais modelos encontra-se no Quadro 2. Além destes, foram desenvolvidos modelos de sucessão para florestas tropicais e subtropicais²⁸ (modelo FORICO), restingas²⁹, savanas³⁰ e pradarias³¹ (modelo STEPPE).

Estrutura geral

Os *gap-models* simulam os processos fundamentais: regeneração, crescimento e mortalidade de cada árvore em uma determinada área.³² Esta área corresponde a uma ou mais células (*plots*) com tamanho fixo entre 100 e 1.000 m², cada uma contendo várias árvores sem que sua posição espacial seja conhecida. A unidade de simulação, via de regra, é a árvore singular. Princípios alternativos empregam grupos de árvores como unidade básica (*cohort-based models*).³³

Como resultado, não se obtêm variáveis ao nível da árvore singular, mas ao nível do povoamento, como, por exemplo, o aumento da biomassa aérea das árvores de interesse. A dinâmica do desenvolvimento da floresta é apresentada continuamente através da atualização periódica dos parâmetros iniciais.

Os programas de computador são montados de forma modular. Em cada módulo estão programados os três processos fundamentais: crescimento, mortalidade e regeneração. Sub-módulos descrevem os fatores ambientais influentes (estimulantes ou limitantes) no crescimento.

Simulation Study. Ph.D. Thesis Nº 10638, Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Switzerland, 1994.

REED, K. L. An Ecological Approach to Modeling of Forest Trees. *Forest Science*, 26: 33-50, 1980.

³⁴ BOTKIN, D. B., JANAK, J. F. and WALLIS, J. R. Op. cit., 1972.

SHUGART, H. H. and WEST, D. C. Op. cit., 1977.

KERCHER, J. R. and AXELROD, M. C. A Process Model of Fire Ecology and Succession in a Mixed-Conifer Forest. *Ecology*, 65:1725-1742, 1984.

PASTOR, J. and POST, W. M. Influence of climate, soil moisture and succession on forest carbon and nitrogen cycles. *Biogeochemistry*, 2: 3-27, 1986.

SOLOMON, A. M. Transient Response of Forests to CO₂-Induced Climate Change: Simulation Modeling Experiments in Eastern North America. *Oecologia*, 68: 567-579, 1986.

KIENAST, F. FORECE - A Forest Succession Model for Southern Central Europe. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-10575, 1987.

LEEMANS, R. and PRENTICE, I. C. *FORSKA, a General Forest Succession Model*. Uppsala: Institute of Ecological Botany, 1989.

URBAN, D. L. *A Versatile Model to Simulate Forest Pattern: A User's Guide to Zelig 1.0*. Univ. of Virginia, Department of Environmental Sciences, Charlottesville, VA., 1990.

MARTIN, Ph. EXE: A Climatically Sensitive Model to Study Climate Change and CO₂ Enrichment Effects on Forests. *Australian Journal of Botany*, 40: 717-735, 1992.

KELLOMÄKI, S., VÄISÄNEN, H., HÄNNINEN, H., KOLSTRÖM, T., LAUHANEN,

Quadro 2

Seleção de modelos de sucessão para diferentes ecossistemas florestais

Nome	Autor(es) ³⁴	Ecossistema florestal representado
JABOWA	Botkin <i>et al.</i> , 1972	Florestas de folhosas, nordeste dos EUA
FORET	Shugart and West, 1977	Florestas de folhosas, ao sul dos Apalaches, EUA
SILVA	Kercher and Axelrod, 1984	Florestas mistas de coníferas
LINKAGES	Pastor and Post, 1985	Florestas de transição de zonas temperada para boreal
FORENA	Solomon, 1986	Florestas do leste dos EUA
FORECE	Kienast, 1987	Florestas da Europa Central
FORSKA	Leemans and Prentice, 1989	Florestas escandinavas
ZELIG	Urban, 1990	Florestas de folhosas ao sul dos Apalaches
EXE	Martin, 1992	Florestas de transição de zonas temperada para boreal
SIMA	Kellomäki <i>et al.</i> , 1992	Florestas escandinavas
SORTIE	Pacala <i>et al.</i> , 1993	Florestas de carvalho em transição para florestas de madeiras duras do nordeste dos EUA
FORCLIM	Bugmann, 1994	Florestas de montanha da Suíça
PICUS	Lexer and Hönninger, 2000	Florestas de montanha da Europa Central

Aplicações

Os modelos cumprem sua tarefa somente quando conseguem reproduzir e esclarecer as estruturas e processos existentes na natureza, isto é, a combinação de parâmetros realísticos na entrada deve reproduzir resultados igualmente realísticos. Deve-se salientar que os modelos de clareira foram desenvolvidos, em princípio, para a reconstrução de ecossistemas e, portanto, não previam qualquer variante de intervenção. Daí decorre sua denominação de modelos sucessionais. É necessário destacar que os modelos sucessionais tradicionais são apropriados para a descrição de ciclos de carbono, somente sob certas restrições, pois alguns parâmetros ecofisiológicos importantes para a fixação deste elemento não podem ser modelados.

Além disso, um grande número de possibilidades de emprego dos modelos de clareira pode, simultaneamente, ser compreendido como teste de sua sensibilidade³⁵ (Quadro 3).

A essência da análise de sensibilidade está no julgamento da resposta do modelo frente à modificação de algum de seus parâmetros. Para cada parâmetro é definida uma faixa específica de

R., MATTILA, U. and PAJARI, B. SIMA: a Model for Forest Succession Based on the Carbon and Nitrogen Cycles with Application to Silvicultural Management of the Forest Ecosystem. *Silva Carelica*, 22: 1-85, 1992.

PACALA, S. W., CANHAM, C. D. and SILANDER, J. A. Jr. Forest Models Defined by Field Measurements: I. The Design of a Northeastern Forest Simulator. *Canadian Journal of Forest Research*, 23: 1980-1988, 1993.

BUGMANN, H. Op. cit., 1994.

LEXER, M. J. and HÖNNINGER, K. A modified 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes. *For. Ecol. and Manage.* (in press), 2000.

³⁵SHUGART, H. H. Op. cit., 1998.

³⁶PACALA, S. W., CANHAM, C. D., SAPONARA, J., SILANDER, J. A. Jr., KOBE, R. K. and RIBBENS, E. Op. cit., 1996.

³⁷Os autores referidos no Quadro 3 são citados em SHUGART, H. H., Op. cit., 1998.

³⁸PACALA, S. W., CANHAM, C. D., SAPONARA, J., SILANDER, J. A. Jr., KOBE, R. K. and RIBBENS, E. Op. cit., 1996.

³⁹SHUGART, H. H., Op. cit., 1998.

valores, representada pelo melhor valor (*best value*), valor máximo e valor mínimo (*upper and lower bounds*). Em cada ciclo do modelo, o parâmetro sob julgamento é colocado em um destes três valores. Para possibilitar os cálculos (3¹⁰ combinações, com apenas 10 parâmetros), todos os outros parâmetros permanecem com seu melhor valor.³⁶

Quadro 3
Possibilidades de uso ou teste de *gap-models*.³⁷

Aplicabilidade/Teste	Autor (es)
Previsão de propriedades de povoamentos (biomassa, área foliar, número de árvores, área basal) através de parâmetros estimados a priori.	Phipps, 1979; Develice 1988
Ciclo do modelo de longo tempo, comparação do resultado com povoamentos super maduros da área estudada.	Leemans and Prentice, 1987; Busing and Clebsch, 1987
Calibração do modelo em um povoamento de determinada idade e previsão da estrutura de um povoamento de idade diferente.	El Bayoumi <i>et al.</i> , 1984; Busing and Clebsch, 1987
Simulação de calamidades ou modificações ambientais (p. ex. frequência de queimadas).	Shugart and West, 1977; Kercher and Axelrod, 1984
Previsão do incremento diamétrico.	Doble, 1981; van Daalen and Shugart, 1989
Previsão de tabelas de rendimento.	Leemans and Prentice, 1987; Kienast and Kuhn, 1989
Previsão da modificação da composição sociológica em gradientes ambientais específicos.	Botkin <i>et al.</i> , 1972; Bonan 1989
Previsão da modificação da composição sociológica em gradientes ambientais múltiplos.	Kercher and Axelrod, 1984; Kienast and Kuhn, 1989
Reconstrução da composição vegetal em paleoclimas	Solomon and Webb 1985; Bonan and Hayden, 1990

Ao contrário da análise de sensibilidade, a verificação de erro no sentido estatístico é executada muito raramente, já que a maioria dos parâmetros utilizados nas partes dinâmicas dos modelos sucessionais não é estimada por métodos estatísticos.³⁸

Limitações

Os modelos de clareiras foram desenvolvidos, inicialmente, para acompanhar as sucessões ocorridas em ecossistemas (florestais) e permitir comparações entre os mesmos. A estrutura do modelo permite a descrição dinâmica das interações entre a árvore e o ambiente, que se expressam pela reação de cada planta às condições ambientais reinantes ou às suas modificações.³⁹

Os modelos de clareira, entretanto, não são adequados apenas para simular o padrão da vegetação sob determinadas condições ambientais. Teste dos modelos demonstraram que, em princípio, os *gap-models* podem ser empregados para reconhecer reações e processos dinâmicos de ecossistemas, diante da modificação das condições ambientais.

Entretanto, muitos dos pressupostos simplificados, usados para formulação do crescimento das árvores, não são mais sustentáveis. Um ponto central para a continuidade do desenvolvimento destes modelos, situa-se, portanto, na substituição das simplificações por métodos mais detalhados, como os conhecidos nos princípios de modelagem mecanística (por exemplo, consideração explícita da fotossíntese, da respiração e da transferência do carbono). As dificuldades referem-se ao fato de que os modelos de clareira são basicamente modelos de árvores singulares, e os processos ecofisiológicos dificilmente podem ser definidos para cada indivíduo, sem incorrer em distorções grosseiras (problema de escala). Tais processos, discutidos adiante, são definidos de modo mais real para um povoamento do que para uma árvore, em especial quando existe ainda pouco conhecimento sobre os mesmos.⁴⁰

Outro ponto central para o aperfeiçoamento dos modelos sucessionais é o equacionamento da influência antrópica nos ecossistemas florestais (colheita da madeira, uso da terra), de forma que possam ser empregados como instrumentos para tomada de decisão.⁴¹ A evolução, no sentido da descrição de diferentes cenários de intervenções silviculturais, orienta-se nos objetivos dos modelos para a produção florestal. A dificuldade básica neste caso é que os modelos sucessionais não foram concebidos para a modelagem de manejo de povoamento e com isto não possuem, por exemplo, parâmetros para a descrição da concorrência ou possibilidades de modelar os efeitos de intervenções silviculturais.

Modelos mecanísticos-biogeoquímicos (modelos BGQ)

As teorias que conferem sustentação aos modelos mecanísticos baseiam-se na consideração de que um ecossistema corresponde a uma mistura de bioquímica, biofísica, ecofisiologia, microclimatologia, resultando na ligação entre diferentes disciplinas e na introdução do conceito de biogeoquímica. Os modelos mecanísticos descrevem a circulação, transformação e acumulação de energia e matéria. O meio para tais processos são as estruturas vivas (por exemplo, árvores ou outros organismos), o ambiente e suas interações. Quando observados em um contexto global são denominados ciclos biogeoquímicos ou modelos bio-

⁴⁰ SHUGART, H. H. and SMITH, T. M. Op. cit., 1996.

⁴¹ KELLOMÄKI, S., VÄISÄNEN, H., HÄNNINEN, H., KOLSTRÖM, T., LAUHANEN, R., MATTILA, U. and PAJARI, B. Op. cit., 1992.

- ⁴²LANDSBERG, J. J., KAUFMANN, M. R., BINKLEY, D. ISEBRANDS, J. and JARVIS, P. G. Evaluating progress toward closed forest models based on fluxes of carbon, water and nutrients. *Tree Physiology*, 9: 1-15, 1991.
- ⁴³BOYSEN JENSEN, P. *Die Stoffproduktion der Pflanzen*. Deutschland: Jena, 1932. 108 S.
- ⁴⁴RUNNING, S. W., WARING, R. H. and RYDELL, A. R. Physiological control of water flux in conifers: A computer simulation model. *Oecologia*, 18:1-16, 1975.
- ⁴⁵RUNNING, S. W. and COUGHLAN, J. C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42: 125-154, 1988.
- RUNNING, S. W. and GOWER, S. T. FOREST-BGC a general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, 9:147-160, 1991.
- ⁴⁶RUNNING, S. W. and HUNT, E. R. Generalisation of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. Pages 141-158 in J. R. EHLERINGER and C. FIELD, editors. *Levels Scaling Processes between Leaf and Landscape*. San Diego: Academic Press, 1993. p. 141-158.
- THORNTON, P. E. *Description of a numerical simulation model for predicting the dynamics of energy, water, carbon and nitrogen in a terrestrial ecosystem*. Missoula, MT: University of Montana, 1998.
- ⁴⁷WARING, R. H. and RUNNING, S. W. *Forest*

geoquímicos (BGQ). Os modelos mecanísticos são utilizados para a descrição dos ciclos de água, carbono e nutrientes e, ao tratarem de todos estes setores, representam sistemas fechados (*closed system model*).⁴²

Via de regra, os modelos mecanísticos agem ao nível do povoamento, ao contrário da maioria dos modelos para produção florestal e de clareiras, que têm cada árvore como nível de modelagem. A floresta é vista como se fora uma única grande árvore (*big leaf idea*). As grandezas a serem estimadas não são o incremento volumétrico, o número de indivíduos, etc., mas, a biomassa produzida, em forma de produção primária líquida (PPL), as taxas de transpiração, a acumulação de nitrogênio, entre outras. Como a PPL, resultante do ciclo fotossintético, é expressa em peso seco de carbono (g/m² ou t/ha), são também denominados modelos do ciclo de carbono.

Evolução histórica

Os primeiros modelos mecanísticos reportam-se às análises da fisiologia vegetal com vistas a identificar as causas do crescimento vegetal.⁴³ A partir da década de 60 foram construídos os primeiros modelos computacionais. A idéia básica consistia na sistematização de complexas interações e, de uma maneira retroativa, em descrever e compreender as interações entre os fatores participantes do crescimento. Inicialmente foram simuladas apenas partes do complexo ecossistema florestal, como o comportamento hídrico de árvores singulares por alguns dias (H₂OTRANS).⁴⁴ A disponibilidade de novos conhecimentos básicos e o avanço na tecnologia computacional, conduziu à evolução destes modelos, como por exemplo o FOREST-BGQ⁴⁵ e o BIOME-BGQ⁴⁶ (veja Quadro 4).

Estrutura geral

De forma genérica, o alvo da atenção não é mais a árvore singular, mas os ciclos determinantes do crescimento (radiação, ciclo da água e sobretudo os ciclos do carbono e de nutrientes) e suas interações em uma determinada área.⁴⁷ Existem também modelos mecanísticos baseados em árvores singulares (TREEDYN3)⁴⁸, porém representam exceções, já que parece muito difícil segregar em árvores isoladas os ciclos de matéria de um ecossistema florestal. Por este motivo, considera-se todo o povoamento como uma grande árvore, na qual os processos ocorrem. Para os cálculos é utilizada a massa de folhas em forma de índice de área foliar (*LAI = Leaf Area Index*). O alcance espacial dos modelos deste tipo contempla desde a descrição de processos fisiológicos individuais, passando por povoamentos (modelo para ecossistema/tecido), chegando até a modelagem de processos em escala global. Tais modelos representam simultaneamente processos ecofisiológicos com diferentes graus de detalhamento.

Ecosystems. Analysis at Multiple Scales. 2nd Edition. Academic Press, 1998.

⁴⁸ BOSSEL, H. TREEDYN3 forest simulation model. *Ecological Modelling*, 90: 187-227, 1996.

⁴⁹ PARTON, W. J., SCHIMEL, D. S., COLE, C. V. and OJIMA, D. S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Amer. J.*, 51: 1173-1179, 1987.

KNUDSEN, G. R. and HUDLER, G. W. Use of a computer simulation model to evaluate a plant disease biocontrol agent. *Ecological Modelling*, 35: 45-62, 1987.

MOHREN, G. M. J. and BARTELINK, H. H. Modelling the effects of needle mortality and needle distribution on dry matter production on Douglas Fir. *Netherlands journal of agricultural science*, 38 (1): 53-66, 1990.

RASTETTER, E. B., RYAN, M. G., SHAVER, G. R., MELILLO, J. M.; NADELHOFFER, K. J., HOBBI, J. E. and ABER, J. D. A general biogeochemical model describing the responses of the C and N cycles in terrestrial ecosystems to changes in CO₂, climate and N deposition. *Tree Physiology*, 9:101-126, 1991.

WEINSTEIN, D. A., BELOIN, R. M. and YANAI, R. D. Modeling changes in red spruce carbon balance and allocation in response to interaction ozone and nutrient stresses. *Tree Physiology*, 9:127-146, 1991.

MCMURTRIE, R. E. Relationship of forest productivity to nutrient and carbon supply – a modeling analysis. *Tree Physiology*, 9: 87-99, 1991.

ABER, J. D. and FEDERER, C. A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production

Quadro 4

Seleção de modelos mecanísticos para diferentes ecossistemas florestais

Nome	Autor(es) ⁴⁹	Ecossistema representado
CENTURY-FOREST	Parton <i>et al.</i> , 1987	C e N no solo e dinâmica de C, N, P e S
INHIBISM	Knudsen and Hudler, 1987	Efetividade no controle biológico de <i>Pinus resinosa</i> atacado por fungos
FORGRO	Mohren and Bartlink, 1990	Ciclos de C, N, P, água, mortalidade de acículas
MBL-GEM	Rastetter <i>et al.</i> , 1992	Relação C/N como reação de modificações climáticas
PnET-CN/CHESS	Aber and Federer, 1992	Produção e transporte de C em povoamentos florestais
FORSUM	Kräuchi and Kienast, 1993	Análise de cenários de manejo florestal
TEM	Melillo <i>et al.</i> , 1993	PPL em relação a cenários de modificações climáticas
BIOME-BGQ	Running and Hunt, 1993	C, N, água e energia em povoamentos puros e equiâneos
BIOMASS	McMurtrie <i>et al.</i> , 1991	Crescimento florestal e água na Austrália
BGQ++	Hunt <i>et al.</i> , 1996	Baseia-se no BIOME-BGQ, transporte de outros elementos
TREEDYN3	Bossel, 1996	Modelo de árvore singular; acácias do Sul da China
TREGRO	Weinstein <i>et al.</i> , 1991	Biogeoquímica detalhada, tratamento de estresse, modelo por árvore
3-PG	Landsberg and Waring, 1997	Povoamentos florestais da Austrália
FORECAST	Kirritains <i>et al.</i> , 1999	Modelo híbrido resultante do desenvolvimento do FORECYTE; rendimento, economicidade, energia, vida selvagem

A principal característica dos modelos mecanísticos é a reprodução exata dos processos bioquímicos. Em decorrência dos progressos na ecofisiologia, o conhecimento sobre balanço de radiação, ciclo de carbono, perdas por transpiração, respiração, necessidade nutricional e processos de decomposição, vem crescendo constantemente. Alguns modelos descrevem apenas processos isolados (Processo de solo SOMM)⁵⁰, enquanto outros tentam captar, o mais fielmente possível, diversos processos de um ecossistema (BIOME-BGQ⁵¹ e 3-PG⁵²).

in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia*, 92: 463-474, 1992.

KRÄUCHI, N. and KIENAST, F. Modeling subalpine forest dynamics as influenced by a changing environment. *Water Air and Soil Pollution*, 68(1-2): 185-197, 1993.

MELILLO, J. M., MCGUIRE, A. D., KICKLIGHTER, D. W., MOORE, B., VOROSMARTY, C. J. and SCHLOSS, A. L. Global climate change and terrestrial net primary productivity. *Nature*, 363:234-240, 1993.

RUNNING, S. W. and HUNT, E. R. Op. cit., 1993.

BOSSSEL, H. Op. cit., 1996.

HUNT, E. R. JR., PIPER, S. C., NEMANI, R., KEELING, D. C., OTTO, R. D. and RUNNING, S. W. Global net carbon exchange and intra-annual atmospheric CO₂ concentrations predicted by an ecosystem process model and three-dimensional atmospheric transport model. *Global Biogeochemical Cycles*, 10: 431-456, 1996.

LANDSBERG, J. J. and WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95:209-228, 1997.

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

⁵⁰PASTOR, J. and POST, W. M. Op. cit., 1986.

⁵¹RUNNING, S. W. and HUNT, E. R. Op. cit., 1993.

⁵²LANDSBERG, J. J. and WARING, R. H. Op. cit., 1997.

⁵³PARTON, W. J., SCHIMEL, D. S., COLE, C. V. and OJIMA, D. S. Op. cit., 1987.

Outro aspecto característico dos modelos de ecossistema/tecido é considerar a biomassa verde como uma categoria. Com isto elimina-se muito da influência da bioquímica que se encontra nos modelos mecanísticos. Os objetivos são muito variáveis, mas procuram englobar os efeitos de intervenções de manejo, de influências naturais e de modificações climáticas nos ecossistemas. Faz sentido considerar, de alguma forma, além do ciclo do carbono, também o ciclo de nitrogênio. Parece igualmente importante que se considere de forma separada a produção e a decomposição, pois variações relativas na modelagem de cenários globais podem ser assim melhor visualizadas. Produção e decomposição são apresentadas em graus de detalhamento bem diferenciados, por exemplo nos modelos CENTURY⁵³, MBL-GEM⁵⁴ e PnET-CN⁵⁵.

Existem dois motivos para a aplicação regional e global de modelos com base em processos ecológicos. Por um lado, o próprio estudo da ecologia que na seqüência pode ser dividido em modelos que prevêem a PPL e a decomposição em um continente ou no globo ou os que executam a combinação de modelos fisiológicos com banco de dados regionais de um sistema de informação. Por outro lado, os resultados devem servir para a parametrização de modelos atmosféricos, como por exemplo os modelos TEM⁵⁶ e BIOME-BGQ⁵⁷, que através de uma ampliação – divisão da região em rede (*grid*) com resolução determinada de área – podem ser utilizados para previsões regionais ou globais.

Aplicação

A teoria dos modelos biogeoquímicos ganhou muita importância com o aumento da disponibilidade de conhecimentos básicos nas áreas de edafologia, fisiologia, hidrologia, e em razão do seu interesse nas relações de causa e efeito no desenvolvimento de ecossistemas e no crescimento florestal. Dado o alto grau de detalhamento das relações entre os fatores determinantes do crescimento, esses modelos são especialmente apropriados para a descrição das interações entre as plantas e o seu ambiente. Os modelos mecanísticos não partem da premissa de que o habitat seja constante e, já em sua concepção, prevêem interações de diferentes ciclos de matéria, tornando-se aptos ao estudo de cenários que englobem modificações nas condições gerais de crescimento.

A aplicabilidade dos modelos mecanísticos cresce com a precisão com que se pode conhecer os efeitos de modificações dinâmicas no ambiente (modificações climáticas, poluição ambiental, acidificação dos solos) e de ações antrópicas (adubação, queimadas, desmatamentos, irrigação). Na América do Norte, para uma análise de sensibilidade, (Projeto VEMAP – Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis⁵⁸), foram testados com sucesso três modelos mecanísticos (BIOME-BGQ, TEM e CENTURY) na área de modificações climáticas e duplicação do dióxido de carbono.

- ⁵⁴ RASTETTER, E. B., RYAN, M. G., SHAVER, G. R., MELILLO, J. M.; NADELHOFFER, K. J., HOBBIE, J. E. and ABER, J. D. Op. cit., 1991.
- ⁵⁵ ABER, J. D. and FEDERER, C. A. Op. cit., 1992.
- ⁵⁶ MELILLO, J. M., MCGUIRE, A. D., KICKLIGHTER, D. W., MOORE, B., VOROSMARTY, C. J. and SCHLOSS, A. L. Op. cit., 1993.
- ⁵⁷ THORNTON, P. E. Op. cit., 1998.
- ⁵⁸ VEMAP Members. Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis Project: Comparing Biogeography and Biogeochemistry Models in an Continental-Scale Study of Terrestrial Ecosystem Responses to Climate Change and CO₂ Doubling. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(4): 407-437, 1995.
VEMAP Members. Modeled response of terrestrial ecosystems to elevate atmospheric CO₂: a comparison of simulations by the biogeochemistry models of the Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis Project (VEMAP). *Oecologia*, 114:389-404, 1998.
- ⁵⁹ MOHREN, G. M. J. and BURKHART, H. E. Contrasts between biologically-based process models and management-oriented growth and yield models. *Forest Ecology Management*, 69:129-132, 1994.
- ⁶⁰ LANDSBERG, J. J., KAUFMANN, M. R., BINKLEY, D. ISEBRANDS, J. and JARVIS, P. G. Op. cit., 1991.
TIKTAK, A. and VAN GRINSVEN, H. J. M. Review of sixteen forest-soil-atmosphere models. *Ecological Modeling*, 83: 35-53, 1995.
- ⁶¹ MÄKELÄ, A., LANDSBERG, J., EK, A. R., BURK, T. E., TER-MIKAEELIAN, M., AGREN, G. I., OLIVER, C. D.

Os modelos biogeoquímicos parecem suficientemente flexíveis para reproduzir, de maneira realística, as modificações ambientais e as correspondentes mudanças nos ciclos de matéria, pois diferentemente dos modelos de produção florestal ou de clareiras, foram concebidos visando a descrição de tais processos. Os modelos mecanísticos estão sendo usados cada vez mais como instrumentos eficazes de apoio a decisões e, igualmente, como instrumentos para as pesquisas de causas/efeitos em ecossistemas florestais (BIOME-BGQ, BIOMASS e FORECAST). Apesar de sua relevância prática ainda são vistos como instrumentos acadêmicos com aplicação na pesquisa para o equacionamento das ligações causais em fórmulas matemáticas, nas quais atenta-se mais à reprodução da realidade do que à precisão.⁵⁹ Isto decorre do fato de que os modelos mecanísticos necessitam de dados complexos para sua parametrização e de que o conhecimento restrito de diversos processos ecofisiológicos ainda limita a capacidade de fazer previsões mais robustas.

Outro fator favorável é o preenchimento de lacunas com conhecimentos sobre os processos e suas inter-relações, como também o fato de que novas questões surgidas neste contexto, podem ser identificadas como necessidades de pesquisas. Os estudos das relações causa-efeito ganham especial importância.

Limitações

Para transformar os modelos mecanísticos em instrumentos utilizáveis de forma concreta na atividade florestal, são necessárias simplificações na parametrização. Isto pode ser conseguido pela inclusão de relações empíricas, o que, entretanto, limita sua aplicabilidade (escala espacial, multiplicidade de espécie, previsões sob condições ambientais em modificação). Além disso, as relações dinâmicas entre hidrologia, biogeoquímica e crescimento das florestas podem ser eliminadas mediante a utilização de modelos parciais independentes para estes processos. O trabalho com variáveis agregadas traz mais uma possibilidade de simplificação.

Na dependência de sua utilização, os modelos apresentam diferentes graus de detalhamento. Quanto maior o espaço da simulação, tanto mais freqüente é o uso de relações empíricas e tanto maior pode ser também o espaço temporal. Diversos estudos têm encontrado nos modelos mecanísticos uma relativa superposição na descrição dos ciclos de radiação, água e carbono (as diferenças residem apenas no grau de detalhamento).⁶⁰ Na formulação dos ciclos de nutrientes, entretanto, aparecem grandes diferenças (transporte e locação de nutrientes). Igualmente, a descrição de situações de estresse não progrediu muito, necessitando mais observação. Os modelos, em sua maioria, ocupam-se com povoamentos puros. A ampliação deste princípio para povoamen-

and PUTTONEN, P. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art for practical implementation. *Tree Physiology*, 20:289-298, 2000.

⁶²RUNNING, S. W. and COUGHLAN, J. C. Op. cit., 1988.

⁶³RUNNING, S. W. and HUNT, E. R. Op. cit., 1993.
THORNTON, P. E. Op. cit., 1998.

⁶⁴THORNTON, P. E., RUNNING, S. W. and WHITE, M. A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, 190: 214-251, 1997.

⁶⁵THORNTON, R. E. and RUNNING, S. W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurement of temperature, humidity and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93:211-228, 1999.

⁶⁶HASENAUER, H., NEMANI, R. R., SCHADAUER, K. and RUNNING, S. W. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *Forest Ecology and Management*, 122:209-219, 1997.

Hubert Hasenauer é engenheiro florestal, doutor em Ciências Florestais e professor da Universidade Rural de Viena, Áustria.

tos mistos torna-se, portanto, um dos objetivos prioritários. Para isto é necessário encontrar um caminho que, considerando a estrutura do povoamento, consiga calcular pelo menos parte dos ciclos de matéria (por exemplo, fixação de carbono) para cada uma das espécies do povoamento.

Também aqui manifestam-se as mesmas dificuldades encontradas nos *gap-models* para a modelagem dos desbastes (ausência de dados sobre densidade do povoamento e número de indivíduos). Existem, entretanto, proposições para o uso de modelos mecanísticos com vistas à prognose da produção florestal.⁶¹

O FOREST-BGQ⁶² ou sua versão aperfeiçoada, o BIOME-BGQ⁶³, é um sistema que, em relação a sua resolução espacial e temporal, caracteriza-se por ser relativamente ponderado e fechado. Quando combinado com um gerador climático DAYMET⁶⁴ e MTCLIM⁶⁵, forma um sistema completo para a descrição de diversos processos fisiológicos (evaporação, produção primária líquida e ciclo de nitrogênio) em povoamentos equiâneos. Além disso, foi utilizado com sucesso para análise dos efeitos de mudanças climáticas.⁶⁶

A ampliação deste modelo para descrever povoamentos mistos (*Picea* e *Fagus* em especial) e a inclusão de medidas silviculturais, poderiam aumentar ainda mais seu interesse para o setor florestal. Também o ciclo do enxofre e do fósforo desempenham importante papel na modelagem de situações de estresse, com o que a inclusão desses ciclos no processo do solo poderia ter efeitos positivos.

Em síntese, pode-se afirmar que o princípio a ser utilizado depende do objetivo da modelagem. Não existe, portanto, um supermodelo, válido de forma genérica e que possa responder satisfatoriamente a todas as questões. Ao contrário, para a montagem, utilização ou adaptação de um modelo, é necessário responder às seguintes questões:

Quais os objetivos a alcançar?

Quais são os dados disponíveis (tipo, quantidade)?

Qual a abrangência temporal e espacial que deve ser considerada?