

SILVICULTURA DE PRECISÃO: APLICAÇÕES E IMPLICAÇÕES¹

PRECISION FORESTRY: APPLICATIONS AND IMPLICATIONS

Aurino MIRANDA NETO^{2,3}; Wanuza Helena CAMPOS²;
Kelly de Almeida SILVA²; Andressa Mineti do ROSÁRIO²; Elias SILVA²

RESUMO – O gerenciamento de florestas implantadas baseado na silvicultura de precisão facilita a tomada de decisão, pois oferece maior disponibilidade de informações que visam à redução de perdas, aumento do lucro e manutenção da qualidade do ambiente. A silvicultura de precisão é fundamental no alcance de maior eficiência no uso de recursos edáficos, hídricos e biológicos, bem como a utilização de serviços e insumos. Esta revisão relata a utilização da silvicultura de precisão no setor florestal, com destaque para suas diversas aplicações e suas consequências.

Palavras-chave: florestas implantadas; geoprocessamento; produção florestal.

ABSTRACT – The management of forests implanted based on precision forestry facilitates decision-making because it offers greater availability of information designed to reduce losses, increase profits and maintenance of environmental quality. The precision forestry is essential to achieve greater efficiency in use of edaphic, water and biological resources, and the use of services and inputs. This review reports the use of precision forestry in the forestry sector, highlighting its various applications and consequences.

Keywords: implanted forest; geoprocessing; forestry production.

¹Recebido para análise em 14.12.12. Aceito para publicação em 06.05.13.

²Universidade Federal de Viçosa – Campus UFV, Departamento de Engenharia Florestal, Av. P. H. Rolfs s/n, 36570-000 Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

³Autor para correspondência: Aurino Miranda Neto – aur.neto@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o aumento populacional dos últimos anos e a diminuição gradativa das reservas naturais aumentou o consumo dos produtos originários da madeira. Em função disso, a floresta implantada tornou-se o melhor meio de atender a demanda de madeira e assegurar a conservação das florestas remanescentes (Mattei, 2001). Assim, o setor florestal vem se tornando cada vez mais importante para a economia brasileira, com mais de 6,5 milhões de hectares de florestas plantadas, geração de aproximadamente 2,8 milhões de empregos diretos e indiretos, e contribuição de cerca de 7,6 bilhões em recolhimento de tributos (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF, 2012).

A tecnologia empregada nos povoamentos florestais, desde a produção de mudas até a colheita, já está bem desenvolvida. Práticas silviculturais como a geração e seleção de mudas, técnicas de preparo do solo e transplântio de mudas, desbaste, desrama, adubação e proteção contra insetos, doenças, fogo e erosões, têm sido responsáveis por considerável elevação na produtividade e na qualidade dos povoamentos florestais (Ribeiro, 2008). Porém, é importante ressaltar que existe uma grande variabilidade espacial referente aos fatores ambientais que também interferem na produtividade do talhão, formando florestas heterogêneas (Coelho, 2005).

A metodologia hoje utilizada é o enfoque em grandes áreas, entendidas como homogêneas, levando à técnica da necessidade média na aplicação dos insumos (Tschiedel e Ferreira, 2002). Essa técnica faz com que, por exemplo, a mesma formulação e/ou quantidade do fertilizante seja utilizada em toda área e desconsidera, portanto, as necessidades específicas de cada parte do campo (Tschiedel e Ferreira, 2002).

No entanto, o aprimoramento do setor, em busca da maior lucratividade e também da certificação florestal, intensificou a busca por processos de produção mais sustentáveis e a otimização no uso dos recursos ambientais (Klein et al., 2007). Nesse novo cenário, cresce a demanda por dados confiáveis que venham agilizar e aperfeiçoar o processo de tomada de decisões, de ordem estratégica e principalmente técnica. Essa demanda obriga a adoção de tecnologias mais avançadas, que visem à diminuição das diferenças entre a produtividade experimental e real (Klein et al., 2007).

Nesse contexto, surge a Silvicultura de Precisão, que pode ser definida como planejamento e condução de atividades de manejo localizado na floresta e operações para melhorar a qualidade e utilização do produto florestal, reduzir perdas, aumentar lucro e manter a qualidade do ambiente (Taylor et al., 2002). Trata-se de um modelo de manejo dos reflorestamentos de baixa utilização, baseado no conhecimento prévio que abarca a variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção e da própria produtividade. Nessa metodologia, a unidade florestal é tratada geograficamente ponto a ponto, ou seja, a área total é dividida em frações de unidades diferenciadas pelo índice de qualidade de sítio, sendo cada fração estabelecida referente a cada ponto (Brandelero et al., 2007a).

A silvicultura de precisão busca aliar o conhecimento já existente dos inventários florestais com a inclusão das variabilidades espacial e temporal dos fatores de produção e com o apoio de tecnologias como: fotogrametria e fointerpretação, cartografia, sistemas de informações geográficas, sensoriamento remoto e sistemas de posicionamento global (Brandelero et al., 2007a). Utiliza-se, também, de outras tecnologias, como sistemas computacionais embarcados e sistemas de software para gestão de dados (Mello e Caimi, 2008).

Silvicultura de precisão não significa total automatização ou informatização de cada operação silvicultural. Ela pode ser conduzida de uma forma rentável sem ser automatizada (Taylor et al., 2002), focada na obtenção e tratamento de dados de natureza espacial, e na busca, em cada atividade, da exatidão e precisão na tomada de decisão (Vetorazzi e Ferraz, 2000).

O gerenciamento de florestas implantadas baseado na silvicultura de precisão facilita a tomada de decisão, pois oferece maior disponibilidade de informações (Vetorazzi e Ferraz, 2000).

Enfim, silvicultura de precisão é um termo relativamente novo e que é cada vez mais utilizado na área florestal, similar ao empregado nas produções agrícolas (Taylor et al., 2002). A Agricultura de Precisão, por sua vez, pode ser definida como uma estratégia ambientalmente amigável e holística, em que os produtores rurais podem utilizar diversas entradas e métodos de cultivo para encontrar variações de solo e avaliar as condições das culturas no campo (Srinivasan, 2006).

No entanto, como há muitas diferenças entre os dois setores, os conceitos aplicados à agricultura de precisão nem sempre são diretamente aplicáveis à silvicultura de precisão (Taylor et al., 2002).

Com base no exposto, o presente trabalho relata a utilização da silvicultura de precisão no setor florestal, com destaque para suas diversas aplicações e consequências.

2 PREPARO DA ÁREA PARA IMPLANTAÇÃO DO FLORESTAMENTO/REFLORESTAMENTO

2.1 Mapeamento de Área de Preservação Permanente – APP e Reserva Legal em Atendimento à Legislação e Criação de Corredores Ecológicos

No mapeamento de APP e Reserva Legal em atendimento à legislação, as técnicas de geoprocessamento constituem um importante meio de obtenção de dados a serem utilizados no planejamento e zoneamento. Essas técnicas são constituídas, tanto em níveis regionais quanto municipais, por diversas ferramentas, como, mapas topográficos disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, modelos matemáticos gerados com base em sistemas de informações geográficas e imagens de satélite (Costa et al., 1996; Catelani e Batista, 2007). E essas ferramentas, segundo os mesmos autores, auxiliam sobremaneira a investigação da adequação do uso do solo em APPs, além das delimitações destas e da Reserva Legal.

O uso das diversas tecnologias disponíveis no mapeamento de áreas voltadas à proteção e preservação dos ecossistemas florestais, permite maior precisão e detalhamento dos dados topográficos, e assim, alcançar melhores resultados na definição e delimitação das áreas. Além disso, as mesmas ferramentas utilizadas no mapeamento de APP e Reserva Legal podem ser úteis na proposição de corredores ecológicos e sua interligação aos fragmentos florestais existentes dentro da empresa de base florestal.

Corredor ecológico é uma faixa de vegetação que liga diferentes habitats, permite a mobilidade de diversas espécies e aumento da mobilidade genética entre diferentes fragmentos de florestas (Vital, 2007).

Portanto, é uma estratégia de conservação ambiental. Em plantações comerciais, os corredores ecológicos consistem na manutenção de “linhas” de floresta nativa intercaladas com as plantações, formando paisagens em mosaico (Vital, 2007).

2.2 Otimização do Traçado das Estradas Florestais

O planejamento da malha viária florestal procura reduzir possíveis erros ou falhas na construção. Com a melhoria dos padrões de qualidade, diminuem-se os custos de construção e manutenção das estradas florestais (Malinovski, 2010). Esse planejamento visa à qualidade e à funcionalidade das estradas em relação ao transporte de pessoas e produtos da floresta, às necessidades de transporte de cargas e serviços, e às atividades de prevenção e combate a incêndios (Corrêa et al., 2006).

Na definição do traçado das estradas florestais são contemplados os parâmetros técnicos, como condições e tipo de tráfego, condições do terreno, tipo de solo, clima, regime pluviométrico e padrão de construção (Malinovski, 2010). Entre os fatores econômicos, contemplam-se a densidade e padrão da malha viária florestal e a organização da utilização e manutenção das estradas, além de outros, tais como, volume de madeira que será transportado, condições ambientais, entre outros (Malinovski, 2010).

Em razão dos altos custos de construção e manutenção de estradas florestais e do transporte, o uso de ferramentas como o SIG torna-se essencial na otimização do transporte florestal rodoviário e possibilita maior eficiência na tomada de decisão, especialmente na determinação do melhor traçado das estradas florestais (Oliveira Filho et al., 2005).

A utilização de SIG no planejamento e manutenção da malha viária florestal, em busca da otimização do transporte de madeira, tem sido reportada na literatura (Barddal, 1994; Motta et al., 1996; Venturi, 2000; Oliveira Filho et al., 2005). Na determinação da rota ótima de transporte florestal rodoviário em um povoamento florestal comercial, em Lençóis Paulista, SP, foi utilizado com sucesso o sistema de processamento de imagens georreferenciadas (SPRING®) em uma análise comparativa entre os critérios de desempenho operacional dos veículos e menor distância (Oliveira Filho et al., 2005).

2.3 Aplicação de Fertilizantes

A avaliação do índice de sítio em áreas florestais, ou seja, a capacidade produtiva de um local, contribui na avaliação das reais necessidades de cada área em relação à correção do pH e adubação mineral (Ortiz et al., 2006). Assim, as técnicas de geoprocessamento, análise geoestatística e os métodos estatísticos clássicos possibilitam a identificação das variáveis que afetam a variação da produtividade do local. Essas técnicas otimizam o processo de avaliação da qualidade de sítio das áreas de implantação florestal, através do mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo e do relevo e do potencial produtivo de um talhão florestal. Elas podem, por exemplo, relacionar a distribuição de areia total, argila total e alumínio com a distribuição do índice de sítio (Ortiz et al., 2006).

No manejo convencional do solo, assume-se que ele é homogêneo para uma vasta área agrícola e, geralmente, utiliza-se uma única prática de manejo para toda a área, desprezando-se as variabilidades (Lanças, 2002). No entanto, as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e a produtividade das culturas podem variar de local para local (Lanças, 2002). Além disso, o crescente aumento nos preços dos insumos e a busca por processos de produção sustentáveis exigem uma utilização cada vez mais racional de fertilizantes.

Em virtude das variações naturais que ocorrem nas características do solo, a silvicultura de precisão busca soluções de aplicações diferenciadas de insumos na área para sanar as possíveis deficiências ocorrentes em cada fração da área (Mello e Bentivenha, 2006). No processo de amostragem georreferenciada do solo, pode-se utilizar um quadriciclo equipado de GPS, computador de bordo e sistema amostrador. Isso permitirá mapear os pontos de retirada de amostras de solo, delimitá-los com coordenadas geográficas e, posteriormente, permitir a elaboração de mapas de fertilidade de solo que serão essenciais na recomendação de adubação (Petilio et al., 2007).

Na obtenção de maior produtividade e retorno financeiro, com um menor impacto negativo ao meio ambiente, a avaliação da fertilidade do solo e criação de mapas de fertilidade são extremamente relevantes (Ribeiro, 2008). Isso se deve, de acordo com esse autor, à variabilidade na fertilidade do

solo que se pode ter em pequenas frações na área de implantação. Portanto, o sistema de informações geográficas se torna uma ferramenta que possibilita a organização, manutenção e análise dos dados obtidos na tomada de decisão apropriada em cada situação recorrente em campo, e assim, a correta avaliação dos índices de sítio é de grande relevância no manejo diferenciado de cada fração da área (Ribeiro, 2008).

As máquinas agrícolas possuem implementos que permitem a distribuição adequada dos insumos de acordo com a necessidade em cada ponto da área, verificada pela leitura realizada pelos microcomputadores e softwares acoplados às máquinas (Mello e Bentivenha, 2006). Portanto, com as informações geradas no mapa de fertilidade, aplica-se o fertilizante em pré-transplante de mudas a taxas variáveis com equipamentos autopropelidos. Isso permite tratar de forma diferenciada cada ponto anteriormente amostrado (Fresco, 1995).

A capacidade de alterar as taxas de aplicação de fertilizantes para atender às necessidades de cada unidade de gestão conduz a uma utilização mais eficiente dos insumos com custos de produção e impactos ambientais negativos reduzidos (Taylor et al., 2002). Além disso, esse método tem a vantagem de permitir o planejamento das aplicações antes da máquina ir a campo e o controle da quantidade aplicada durante a operação, evitando a falta ou excesso de produto em relação ao recomendado (Mantovani et al., 1998).

Muitas experiências têm sido realizadas com a aplicação de fertilizantes a taxas variáveis, como o estudo de Taylor et al. (2002), que relata o desenvolvimento de um tipo de pulverizador para aplicação de fertilizantes líquidos, nos anos de 1999 e 2000, por especialistas, em povoamentos florestais no Alabama, nos Estados Unidos. A experiência com essa máquina indicou uma redução de 47% no custo total da operação em comparação com os métodos tradicionais de aplicação, além da redução de até 2/3 na quantidade de fertilizante utilizada (Taylor et al., 2002).

Na agricultura de precisão há registros de economia de até 50% em fertilizantes e de até 30% em herbicidas com a utilização de mapas de fertilidade, enquanto os estudos envolvendo esta técnica na silvicultura de precisão se apresentam ainda incipientes (Mello e Bentivenha, 2006).

Entre os ganhos com o advento das ferramentas de silvicultura de precisão na aplicação de fertilizantes destacam-se: maior rendimento operacional, maior agilidade e flexibilidade no transplante de mudas, diminuição da mão de obra contratada, redução dos gastos com equipamentos e diminuição do ativo imobilizado da empresa florestal (Petilio et al., 2007).

2.4 Controle de Erosão

A erosão hídrica é a ação da água de precipitação sobre o terreno, com o consequente carreamento de constituintes do solo, nutrientes e matéria orgânica para partes do terreno em que estes nutrientes minerais e orgânicos não podem ser aproveitados pelas culturas agrícolas ou implantações florestais (Ribeiro, 2008). Portanto, segundo o mesmo autor, se torna uma das principais causas de redução da produtividade. A inclinação do terreno é um forte fator no agravamento da erosão hídrica, que propicia de forma acentuada as perdas de solo e água, diminui a infiltração de água no solo e aumenta o seu volume e velocidade através do escoamento superficial (Cogo et al., 2003). Dependendo do uso do solo, das atividades desenvolvidas pelo homem, da importância relativa do clima e solo, das práticas conservacionistas e do tipo de vegetação presente, a erosão hídrica pode se manifestar de forma variável (Schick et al., 2000).

As perdas ocasionadas pela erosão hídrica podem comprometer a produção florestal e aumentar os custos com fertilização mineral. Dessa forma, o uso do SIG e do Modelo Digital de Elevação – MDE auxilia na obtenção de parâmetros hidrológicos e morfométricos de uma bacia hidrográfica para auxiliar na prevenção desses problemas (Ribeiro, 2008). O MDE pode fornecer com exatidão a modelagem do escoamento superficial, e assim, avaliar o potencial de erosão do terreno com o auxílio de outros fatores. Isso propicia a tomada de decisões por estabelecer métodos e estratégias de controle eficientes, enquanto o SIG permite o planejamento e controle da irrigação e drenagem, associando a dados climáticos e valores das lâminas de água aplicadas (Ribeiro, 2008).

2.5 Combate a Formigas Cortadeiras

Outra prática silvicultural importante é o combate a formigas cortadeiras, que apresenta diversas táticas de controle, como: manutenção de sub-bosque diversificado; controle químico, mecânico, biológico, cultural, comportamental e físico; e as tentativas de utilização de essências florestais resistentes ao ataque destes agentes (Della Lucia e Vilela, 1993; Cantarelli, 2005). Dentre essas técnicas o mais empregado tem sido o controle químico.

Para otimizar as técnicas de combate utilizadas, aumentar a eficiência, diminuir os custos e reduzir o impacto ambiental negativo proveniente de aplicações constantes de formicidas, o setor florestal tem adotado sistemas de monitoramento de formigas cortadeiras (Laranjeiro, 1994; Cantarelli, 2005). Nesses sistemas, de acordo com esses autores, são realizadas amostragens fundamentadas nos objetivos que se almejam, tais como, indicação do momento ótimo da intervenção contra as formigas; otimização dos recursos em cada método; formação de uma base de dados para gerar uma programação de controle, entre outros. Uma gama maior de informações obtidas no monitoramento permite atuar pontualmente no combate às formigas cortadeiras.

3 IMPLANTAÇÃO

3.1 Utilização de Árvores Geneticamente Modificadas

A engenharia genética merece destaque na silvicultura de precisão, pois, através das árvores geneticamente modificadas, também se busca o aperfeiçoamento e sustentabilidade das florestas (Valdetaro et al., 2011). A tecnologia dos transgênicos está sendo adotada pelo setor florestal, sobretudo nos países desenvolvidos, assim como ocorreu com as espécies anuais na década passada. A tendência mundial é que um número crescente de espécies florestais transgênicas, com novas características, seja liberado no mercado nos próximos anos, já que existem grandes investimentos em programas de melhoramento e estudos em campo com espécies e híbridos florestais transgênicos (Stuart-Guimarães et al., 2003).

Essa técnica se baseia na modificação direta do genoma de um organismo alvo pela introdução intencional de fragmentos de DNA exógenos, e que possuem uma função conhecida. Nesse ponto, o gene que contém as informações para a síntese de uma proteína, a qual por sua vez está inserida no mapa metabólico da síntese de uma molécula de interesse, pode ser transferido para outro organismo, que então expressará as características desejadas (Di Ciero e Amaral, 2002).

O estabelecimento de um eficiente sistema de transformação para qualquer espécie vegetal necessita de três etapas: (a) identificação, isolamento e introdução do DNA exógeno na célula; (b) seleção e crescimento das células transformadas, e (c) estabelecimento de um sistema simples e eficiente de regeneração das células transformadas (Brasileiro e Dusi, 1999). Diferentes sistemas de transferência de genes têm sido utilizados no cenário florestal. As estratégias com maiores destaques são o método indireto, baseado na patogenicidade de *Agrobacterium* e os métodos diretos, os quais dispensam o uso deste vetor intermediário (Babu, 2003).

Os benefícios dos organismos geneticamente modificados na silvicultura representam mais do que a melhoria no crescimento e forma das árvores, incluindo também benefícios potenciais na melhoria das características das mesmas (Balocchi e Valenzuela, 2004). Na área florestal, considera-se que a tecnologia de transferência de genes pode contribuir para minimizar as limitações intrínsecas do melhoramento de espécies arbóreas, tais como, o longo tempo para obtenção de novas gerações e a grande variabilidade existente entre e dentro de espécies (Studart-Guimarães et al., 2003). Segundo Valdetaro et al. (2011), alguns fatores que vêm sendo estudados e melhorados por meio da transgenia são: redução do teor e composição da lignina; resistência a pragas e doenças; tolerância à utilização de herbicidas; produção de biomassa (aumento da produtividade); remoção de poluentes do solo (fitorremediação) e aumento da eficiência de absorção do fósforo.

De acordo com Rautner (2001), entre os anos de 1988 a 2000, existiam cerca de 250 testes em campo envolvendo plantas lenhosas transgênicas, sendo, pelo menos 24 espécies vegetais em 17 países.

Dentre essas espécies, 51% eram plantas lenhosas do gênero *Populus*, seguido por *Pinus* com 23%, *Liquidambar* com 11% e *Eucalyptus* com 7% (Sartoretto et al., 2008). No Brasil, foram desenvolvidos dois projetos de genoma de *Eucalyptus*. Um financiado por um consórcio entre a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP e a iniciativa privada, e outro patrocinado por um consórcio entre o Governo Federal e a iniciativa privada. Esses projetos utilizam duas estratégias diferentes, uma baseada em sequenciamento de sequências expressas (Expressed Sequence Tags – EST) e outra baseada no uso de marcadores moleculares para localização de genes e QTLs (loci para característica quantitativa) através de uma rede experimental de clones instalados em diferentes regiões do Brasil (Di Ciero e Amaral, 2002).

Apesar do grande potencial dessa nova tecnologia de produção florestal, está claro que muitos estudos envolvendo o risco ambiental dos organismos geneticamente modificados deverão ser realizados, até que uma quantidade suficiente de conhecimento sobre os benefícios esperados e os possíveis riscos desta técnica seja estabelecido (Gartland et al., 2003). No entanto, é preciso considerar que o uso de árvores geneticamente modificadas também oferece impactos ambientais, culturais e socioeconômicos de caráter positivo, os quais devem ser igualmente considerados na avaliação a ser feita em relação ao uso deste tipo de tecnologia (Valdetaro et al., 2011).

4 CONDUÇÃO E MANUTENÇÃO

4.1 Monitoramento com Informações Georreferenciadas

O monitoramento através do geoprocessamento ou geomonitoramento, tem como utilidade: manter atualizada a base cartográfica e o banco de dados da empresa; dar suporte aos grupos envolvidos em proteção florestal por meio de identificação e mapeamento de áreas de risco ou de ocorrência de incêndios, ataques de pragas, doenças, entre outros; acompanhar a situação das áreas de preservação permanente e reservas legais; e avaliar a disponibilidade de matéria-prima em áreas de terceiros (Vettorazzi, 1996).

A constante necessidade de suprimento de matéria-prima do empreendimento florestal pode ser alcançada através da estruturação, adequação e atualização de bases cartográficas, que auxiliam na quantificação da área plantada, predição de volume, e ainda identificação das áreas de preservação (Kronka et al., 2005; Oliveira Filho, 2009).

Um banco de dados georreferenciado apoiado em um SIG pode gerar mapas. Esses mapas são direcionados para determinada variável ou atributo que se queira apresentar espacialmente através da visualização de quaisquer informações antes obtidas com as ferramentas de inventário florestal, prognoses de crescimento, entre outras estimativas e simulações (Oliveira Filho, 2009). Além disso, segundo esse autor, pode-se utilizar análises espaciais, como a produção de modelos digitais do terreno, no qual as variáveis x e y continuem expressando as coordenadas de localização da informação. Já a variável z passa a indicar outras variáveis, tais como, índice de sítio, área basal, diâmetro médio, volume total por hectare, volume para determinada finalidade, áreas destinadas para corte raso ou desbaste, custos e receitas, entre outras (Oliveira Filho, 2009).

4.2 Prevenção, Detecção e Controle de Incêndios Florestais

Agilidade e eficiência no monitoramento e na detecção dos incêndios florestais é primordial para o controle do fogo, diminuição dos custos nas operações de combate e redução dos danos. Assim, os métodos de detecção e monitoramento de incêndios florestais são importantes para o planejamento do controle (Batista, 2004).

A detecção de incêndios florestais pode ser feita por meio de vigilância terrestre através de torres de observação, patrulhamento aéreo com aeronaves ou por imagens de satélites, e a escolha do método dependerá das características do local, principalmente em relação a extensão da área a ser monitorada (Batista, 2004).

O uso de SIG para detecção de incêndios florestais proporciona maior precisão na identificação do foco inicial do incêndio e garante maior agilidade nas tomadas de decisão por parte da equipe responsável pelo primeiro combate (Venturini e Antunes, 2007).

4.3 Inventário Florestal

Informações precisas e de baixo custo são buscadas pelos gerentes de empreendimentos florestais. Uma das alternativas é o uso de um método que explore adequadamente as relações regionais existentes entre as unidades amostrais. Os métodos de análise de inventários florestais tradicionais utilizam uma medida de tendência central (média) e uma de dispersão (variância), mas não levam em consideração as possíveis correlações entre as observações vizinhas (Mello, 2004). Por outro lado, os métodos geoestatísticos avaliam melhor as estruturas de dependência espacial entre as características dendrométricas de uma espécie e as variáveis do seu meio físico. Portanto, obtêm resultados capazes de explorar adequadamente as relações espaciais entre os dados dendrométricos e o meio abiótico, de fundamental importância para o inventário (Bognola et al., 2008).

O desenvolvimento do processamento de imagens tornou possível combinar informações de imagem estereoscópica digital para que as fotos aéreas ou via satélite possam ser utilizadas para encontrar os topos das árvores, altura, DAP e volumes (Mikkonen, 2006). Ademais, segundo esse autor, essa informação pode ser usada para encontrar a localização exata de um objeto sob o dossel.

Os dados de inventário formam a base para a decisão do corte e para estimativas de estandes individuais. Essas informações podem ser transferidas para computadores de bordo das máquinas florestais para, por exemplo, a otimização da colheita (Mikkonen, 2006).

4.4 Controle de Pragas e Doenças

O registro da ocorrência de pragas pode ser feito através de um cadastro georreferenciado (Vettorazzi e Ferraz, 2000). O sensoriamento remoto possui grande utilidade no controle de pragas e doenças, pois permite obter imagens digitais de baixo custo em amplo espectro da radiação eletromagnética (Ribeiro, 2008). Através dessa tecnologia, é possível detectar estresses vegetativos nos seus estágios iniciais, e também, se a distribuição espacial de plantas daninhas, insetos e doenças ocorre de forma aleatória ou tendenciosa (Ribeiro, 2008).

Devido às pragas e doenças também apresentarem grande variação espacial nos povoamentos florestais, o sensoriamento remoto complementa as estratégias do manejo integrado de pragas, para aplicação de defensivos de forma preventiva (Daberkow, 1996; Brandelero et al., 2007b). Esse manejo é definido como estratégia de controle e indicará quando o controle deverá ser realizado para evitar possível queda no retorno econômico da produção. Essa utilização mais racional de defensivos resulta em ganhos econômicos e ambientais consideráveis (Daberkow, 1996; Brandelero et al., 2007b).

Cantarelli (2005) afirma que a utilização da tecnologia SIG/GPS apresenta um resultado de alta confiabilidade no controle de formigas cortadeiras (*Acromyrmex* e *Atta*) e confirma que o manejo integrado de pragas – MIP de precisão é possível em sistemas florestais. Ainda, segundo esse autor, as tomadas de decisões para o controle são facilitadas através da geração de mapas georreferenciados, que permitem visualizar a intensidade e a distribuição espacial dos formigueiros.

Outra ferramenta é a aplicação de técnicas de biotecnologia, que se apresentam como um novo desafio para a silvicultura clonal de *Eucalyptus*. Essas técnicas requerem a integração da microbiologia, bioquímica, genética e engenharia bioquímica (Xavier e Silva, 2010). Seu uso permitirá alterar o ciclo reprodutivo das plantas, aumentar a tolerância a herbicidas e estresses abióticos, modificar a arquitetura vegetal, manipular os teores de lignina e celulose, induzir resistência a doenças e pragas, entre outros (Xavier e Silva, 2010). Entretanto, de acordo com esses autores, é essencial a avaliação de biossegurança, que deve incluir a análise dos riscos potenciais das plantas ou das práticas relacionadas ao seu cultivo para o meio ambiente, a saúde humana e animal.

5 COLHEITA

5.1 Otimização da Colheita

A tecnologia dos SIGs é essencial na contribuição de resoluções de problemas frequentes no planejamento da colheita florestal (Leite, 2010).

Como exemplo, tem-se a inserção de variáveis complexas (declividade do terreno, espaçamento entre plantas, volume das árvores, manejo adotado, potência e produtividade das máquinas, entre outras) dentro das técnicas da pesquisa operacional, em busca do ótimo a ser estimado (Malinovski et al., 2008).

Na minimização dos custos das atividades de colheita florestal é fundamental a adoção de várias técnicas e procedimentos que tragam uma solução ótima do problema, tais como: programação linear, programações inteira e mista, programação dinâmica, utilização de algoritmos e simulações, entre outras (Malinovski et al., 2008).

A silvicultura de precisão permite obter um banco de dados de informação geoespacial, que inclui a fertilidade do solo, produtividade dos povoamentos florestais e, até mesmo, a qualidade da colheita (Taylor et al., 2002). As máquinas utilizadas na colheita possuem monitores de produtividade que coletam dados contínuos sobre a quantidade a ser colhida em função da localização no campo. Quando mapas de produtividade são combinados com mapas de fertilidade do solo e mapas de tipo de solo, cada unidade de gestão pode ter suas próprias taxas de fertilizantes, herbicidas e pesticidas prescritas, e conforme o aplicador se move no campo, as taxas dos insumos podem ser alteradas (Taylor et al., 2002). Segundo esse autor, conduz a uma utilização mais eficiente desses insumos, redução dos custos de produção e dos impactos ambientais negativos.

Nos países nórdicos, os novos *harvesters* são equipados com sistema de informação, GPS, mapa digital do povoamento florestal e possuem comunicação por redes móveis para transferência de dados relacionados com a colheita (Billingsley et al., 2008). Desse modo, a operabilidade das máquinas pode ser muito mais eficiente, os riscos ambientais menores e a produtividade mais elevada (Mikkonen, 2006).

5.2 Geração de Mapas de Produtividade

O mapa de produtividade é uma ferramenta que avalia a resposta da cultura ao manejo e aplicação de insumos agrícolas,

além de indicar a localização de áreas críticas em termos de rentabilidade (Klein et al., 2007). Esse artifício é muito difundido na agricultura, mas pode ser perfeitamente utilizado na área florestal (Taylor et al., 2002). Porém, com algumas diferenças, já que a rotação é muito maior para as florestas. Além disso, o manejo florestal pode realizar várias operações de desbaste, juntamente com o impacto de eventos ambientais e de gestão, os quais podem influenciar o crescimento e o rendimento final de madeira. No entanto, um mapa de produtividade pode fornecer informações valiosas na gestão de um sistema silvicultural (Taylor et al., 2006).

Esses mapas são elementos úteis para melhor visualização e entendimento, de forma mais simplificada, de um conjunto complexo de informações geograficamente referenciadas. Essas informações são alcançadas como uma representação dos resultados gerados de análises realizadas pela tecnologia do sistema de informações geográficas (Ribeiro, 2008). Os dados são obtidos por alguns tipos de equipamentos na atividade de colheita florestal e são de grande relevância por fornecer a variação espacial da capacidade produtiva da área avaliada (Ribeiro, 2008). Entretanto, segundo esse autor, eles não possibilitam saber as causas dessa variabilidade e necessitam das variáveis que interferem na produção.

Na construção dos mapas de produtividade, frequentemente, são utilizadas técnicas geoestatísticas, que estão fundamentadas na teoria das variáveis regionalizadas. Essas técnicas consideram a distribuição espacial das medidas e permitem um raio de correlação espacial entre as amostras (Klein et al., 2007). Vieira (1998) definiu variável regionalizada como uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples. Essa continuidade ou dependência espacial pode ser estimada pelo semivariograma. Este, por sua vez, pode ser definido como sendo um método estatístico que permite estudar a dispersão natural, o grau de continuidade dos dados

amostrados no campo e a estrutura de dependência espacial de dados georreferenciados (Klein et al., 2007).

Os dados para a criação dos mapas de produtividade poderão ser obtidos automaticamente durante a operação de colheita (Ribeiro, 2008), pois máquinas com sensores de dimensão avançados têm sido utilizadas nos atuais sistemas de colheita de madeira. Desse modo, a combinação dos dados dimensionais da árvore com a posição (GPS), torna possível o desenvolvimento de mapas de produtividade da floresta (Taylor et al., 2002). Contudo, tais mapas não fornecem informações sobre as causas da variabilidade, e por isso, devem estar acompanhados dos dados das diversas variáveis envolvidas na produção, de modo que possam ser interpretados em um SIG e possibilitar a tomada de decisões (Ribeiro, 2008).

Ortiz (2003) mapeou a capacidade produtiva (expressa pelo Índice de Sítio) em um talhão com clones de *Eucalyptus grandis*, numa área de 8,4 ha, pertencente à Suzano Bahia Sul Celulose, no município de Paraibuna, SP. O mapa de produtividade indicou que os valores de índice de sítio variaram entre 24 e 34 metros. Outro estudo envolvendo uma cultura perene foi realizado por Balastreire et al. (2002), através do mapeamento da produtividade de uma cultura de laranja em uma propriedade no município de Limeira, SP. Os resultados obtidos mostraram que a produtividade da área (3,3 ha) variou de 0,1 a 5,4 caixas de 31 kg/árvore, ou seja, uma alta variabilidade espacial dentro de um mesmo talhão.

Com o uso de geotecnologias é possível gerar mapas de produtividade que permitem a localização com precisão de variações no espaço e no tempo de pontos relevantes no gerenciamento da produção florestal (Mello e Bentivenha, 2006), isto auxilia na localização de áreas com maior ou menor rentabilidade. Com os mapas de relevo e atributos do solo pode-se ter o fornecimento de subsídios na identificação dos fatores limitantes da capacidade produtiva local (Mello e Bentivenha, 2006).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante de um mercado cada vez mais exigente nos âmbitos socioambiental e de qualidade dos produtos, torna-se necessário o alcance de maior eficiência no uso de recursos edáficos, hídricos e biológicos, bem como a utilização de serviços e insumos. Para atender a essas demandas, o auxílio da silvicultura de precisão é mais uma ferramenta, pois esta proporciona a otimização dos rendimentos operacionais, maior controle e qualidade nas operações executadas, diminuição dos impactos ambientais negativos, racionalização no uso de insumos e diminuição dos custos de produção.

A silvicultura de precisão ainda tem sido pouco adotada, mas possui potenciais de crescimento que permitem ao setor florestal o alcance da máxima produtividade sustentável, com integral respeito aos parâmetros ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2012**: ano base 2011. Brasília, DF, 2012. 150 p.
- BABU, R.M. Advances in genetically engineered (transgenic) plants in pest management – an overview. **Crop Protection**, v. 22, p. 1071-1086, 2003.
- BALASTREIRE, L.A.; AMARAL, J.R.; ESQUERDO, J.C.D.M. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade de uma cultura de laranja. In: BALASTREIRE, L.A. **Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1999-2001**. Piracicaba: ESALQ/LER, 2002. p. 151-157.
- BALOCCHI, C.; VALENZUELA, S. Introduction to GMOs and biosafety in forestry. In: KELLISON, R.; McCORD, S.; GARTLAND, K. (Ed.). PROCEEDINGS OF THE FORESTRY BIOTECHNOLOGY WORKSHOP, GLOBAL BIOTECHNOLOGICAL FORUM, 2004, Concepción. **Anais...** Concepción: Institute of Forest Biotechnology, 2004. p. 85-96.
- BARDDAL, S.M. A utilização do SIG na Klabin. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 1994, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 1994. p. 83-92.
- BATISTA, A.C. Detecção de incêndios florestais por satélites. **Floresta**, v. 34, n. 2, p. 237-241, 2004.
- BILLINGSLEY, J.; VISALA, A.; DUNN, M. Robotics in agriculture and forestry. In: SICILIANO, B.; OUSSAMA, K. **Springer handbook of robotics**. Berlin: Springer-Verlag, 2008. p. 1065-1077.
- BOGNOLA, I.A. et al. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L. **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 373-385, 2008.
- BRANDELERO, C. et al. Silvicultura de precisão: mapeamento, inventário e geoestatística. **Geomática**, v. 2, n. 1, p. 15-25, 2007a.
- _____.; ANTUNES, M.U.F.; GIOTTO, E. Silvicultura de precisão: nova tecnologia para o desenvolvimento florestal. **Ambiência**, v. 3, n. 2, p. 269-281, 2007b.
- BRASILEIRO, A.C.M.; DUSI, D.M.A. Transformação genética de plantas. In: TORRES, A.C.; CALDAS, L.S.; BUSO, J.A. (Org.). **Cultura de tecidos e transformação genética de plantas**. Brasília, DF: Embrapa-SPI: Embrapa-CNPq, 1999. pt. IV, p. 679-735.
- CANTARELLI, E.B. **Silvicultura de precisão no monitoramento e controle de formigas cortadeiras em plantios de Pinus**. 2005. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- CASTRO, B.F.D.; VIEIRA, G.R. Panorama da silvicultura de precisão no Brasil. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 2008, Curitiba. **Anais...** São Paulo: IPEF, 2008. Não paginado.
- CATELANI, C.S.; BATISTA, G.T. Mapeamento das Áreas de Preservação Permanente (APP) do município de Santo Antônio do Pinhal, SP: um subsídio à preservação ambiental. **Ambi-Água**, v. 2, n. 1, p. 30-43, 2007.
- COELHO, A.M. **Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 60 p. (Série Documentos: Embrapa Milho e Sorgo, v. 46).
- COGO, N.P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R.A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declives e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 743-753, 2003.

CORRÊA, C.M.C.; MALINOVSKI, J.R.; ROLOFF, G. Bases para planejamento de rede viária em reflorestamento no Sul do Brasil. **Floresta**, v. 36, n. 2, p. 277-286, 2006.

COSTA, T. et al. Delimitação e caracterização de áreas de preservação permanente por meio de um sistema de informações geográficas (SIG). **Revista Árvore**, v. 20, n. 1, p. 129-135, 1996.

DABERKOW, S. **The emerging role of precision farming in integrated pest management**. Beltsville: USDA: Current Research Information System – CRIS, 1996.

DELLA LUCIA, T.M.C.; VILELA, E.F. Métodos atuais de controle e perspectivas. In: DELLA LUCIA, T.M.C. (Ed.). **As formigas cortadeiras**. Viçosa-MG: UFV Imprensa Universitária, 1993. p. 151-162.

DI CIERO, L.; AMARAL, W. Árvores geneticamente modificadas na silvicultura intensiva. **Biociência e Desenvolvimento**, v. 29, p. 92-98, 2002.

FRESCO, L.O. Agro-ecological knowledge at different scales. In: BOUMA, J. et al. (Ed.). **EcoRegional approaches for sustainable land use and food production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1995. p. 133-141.

GARTLAND, K.M.A. et al. Genetically modified trees: production, properties, and potential. **Journal of Arboriculture**, v. 29, n. 5, p. 259-266, 2003.

KLEIN, W.L. et al. Altura do ipê-roxo (*Tabebuia avellanedae*) nos manejos convencional e de precisão, analisada pela geoestatística. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 4, p. 299-309, 2007.

KRONKA, F.J.N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R.H. **A cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005. 160 p.

LANÇAS, K.P. Instrumentação para avaliação do desempenho operacional de tratores e variabilidade espacial dos solos. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 437-498.

LARANJEIRO, A.J. Controle de formigas cortadeiras em reflorestamentos: propagação, operação e monitoramento. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO NO CONTROLE DE FORMIGAS CORTADEIRAS, 2., 1994, Piracicaba. Piracicaba: IPEF, 1994. 24 p.

LEITE, E.S. **Desenvolvimento de planos de colheita florestal de precisão utilizando tecnologias de geoprocessamento**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

MALINOVSKI, R.A. **Modelo matemático para otimização dos custos operacionais de transporte de toras com base na qualidade de estradas**. 2010. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MALINOVSKI, R.A. et al. Otimização da distância de extração de madeira com forwarder. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 79, p. 171-179, 2008.

MANTOVANI, E.C.; QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P. Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão. In: SILVA, F.M.; BORGES, P.H.M. (Ed.). **Mecanização e agricultura de precisão**. Poços de Caldas: UFLA: SBEA, 1998. p. 109-157.

MATTEI, V.L. Protetores físicos para semeadura direta de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 5, p. 775-780, 2001.

MELLO, B.A.; CAIMI, L.L. Simulação na validação de sistemas computacionais para a agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 666-675, 2008.

MELLO, E.J.; BENTIVENHA, S.R. Silvicultura de precisão. **Revista Opiniões**, v. 3, p. 26, 2006.

MELLO, J.M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 111 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MIKKONEN, E. Precision forestry: new challenge to Nordic logging. **Forestry Studies/Metsanduslikud Uurimused**, v. 45, p. 33-36, 2006.

MOTTA, L.P. et al. Utilização do sistema de informações geográficas e da distância virtual na otimização do transporte florestal rodoviário. **Revista Árvore**, v. 20, n. 3, p. 381-394, 1996.

OLIVEIRA FILHO, P.C. Sistemas de informações geográficas: um modelo de dados espacial florestal. **Ambiência**, v. 5, n. 3, p. 539-550, 2009.

OLIVEIRA FILHO, P.C. et al. Determinação da rota ótima de transporte com auxílio de um sistema de informação geográfica. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 4, p. 403-409, 2005.

ORTIZ, J.L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**. 2003. 205 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ORTIZ, J.L. et al. Relações espaciais entre o potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. **Scientia Forestalis**, v. 72, p. 67-79, 2006.

PETILIO, A. et al. Um breve estudo da viabilidade de aplicação de técnicas de agricultura de precisão. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 6, n. 11, 2007. Disponível em: <www.revista.inf.br>. Acesso em: 22 set. 2012.

RAUTNER, M. Designer trees. **Biotechnology and Development Monitor**, v. 44/45, p. 2-7, 2001.

RIBEIRO, C.A.A.S. Floresta de Precisão. In: MACHADO, C.C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa-MG: UFV, 2008. p. 328-351.

SARTORETTO, M.L.; SALDANHA, C.W.; CORDER, M.P.M. Transformação genética: estratégias e aplicações para o melhoramento genético de espécies florestais. **Ciência Rural**, v. 38, n. 3, p. 861-871, 2008.

SCHICK, J. et al. Erosão hídrica em cambissolo húmico aluminoso submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 427-436, 2000.

SRINIVASAN, A. **Handbook of precision agriculture**. Philadelphia: Haworth Press, 2006. 683 p.

STUDART-GUIMARÃES, C.; LACORTE, C.; BRASILEIRO, A.C.M. Transformação genética em espécies florestais. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 1, p. 167-178, 2003.

TAYLOR, S.E. et al. Precision forestry: operational tactics for today and tomorrow. In: INTERNATIONAL MEETING OF THE COUNCIL ON FOREST ENGINEERING, 23., 2002, Corvallis. **Annals...** Corvallis: Oregon State University Press, 2002. 6 p.

TAYLOR, S.E. et al. Precision forestry in the Southeast U.S. In: FIRST INTERNATIONAL PRECISION FORESTRY SYMPOSIUM, 2006, Stellenbosch. **Proceedings...** Stellenbosch: IUFRO, 2006. p. 397-414.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M.F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, v. 32, n. 1, p. 159-163, 2002.

VALDETARO, E.B. et al. Árvores geneticamente modificadas: técnicas, aplicações, riscos e os potenciais impactos associados a sua utilização. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 65, p. 51-61, 2011.

VENTURI, N.L. GIS aplicado na área florestal. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 4., 2000, Curitiba. **Anais...** Curitiba: casa publicadora, 2000. p. 143-157.

VENTURI, N.L.; ANTUNES, A.F.B. Determinação de locais ótimos para implantação de torres de vigilância para detecção de incêndios florestais por meio de sistema de informações geográficas. **Floresta**, v. 37, n. 2, p. 159-173, 2007.

VETTORAZZI, C.A. Técnicas de geoprocessamento no monitoramento de áreas florestadas. **Série Técnica IPEF**, v. 10, n. 29, p. 45-51, 1996.

VETTORAZZI, C.A.; FERRAZ, S.F.B. Silvicultura de precisão: uma nova perspectiva para o gerenciamento de atividades florestais. In: BORÉM, A. et al. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p. 65-75.

VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F.; BURROWS, I.T. Mapeamento da chuva máxima provável para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 11, p. 93-98, 1998.

VITAL, M.H.F. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES**, v. 14, n. 28, p. 235-276, 2007.

XAVIER, A.; SILVA, R.L. Evolução da silvicultura clonal de *Eucalyptus* no Brasil. **Agronomia Costarricense**, v. 34, n. 1, p. 93-98, 2010.