

1.Introdução

A produção sustentável de madeira de eucalipto constitui um dos factores de sucesso imprescindíveis à competitividade global da indústria portuguesa de pasta e papel, uma vez que a madeira representa cerca de 70% do custo de produção de pasta. *Eucalyptus globulus*, pelas suas vantagens comparativas em termos de adaptabilidade às condições edafo-climáticas do país, elevada taxa de crescimento e qualidade da sua madeira, tem sido uma das espécies mais plantadas no país, ocupando uma área de aproximadamente 600000 ha. A sustentabilidade da capacidade produtiva das florestas de eucalipto, sob os prismas económico e ecológico, requer uma adequada gestão do recurso natural solo. A gestão florestal sustentável tem como principal objectivo a produção de madeira a curto, médio e longo prazo de forma economicamente viável, ecologicamente equilibrada e socialmente justa. Assim, plantação florestal sustentável pode ser definida como aquela que mantém (ou aumenta) não só a viabilidade económica da produção de madeira mas também a base de recursos naturais, especialmente solo e água (Nambiar & Brown, 1997). Uma maneira prática de assegurar que as plantações florestais sejam enquadradas neste princípio é integrar os elementos de sustentabilidade nas metas de gestão florestal.

A produtividade florestal potencial ou a qualidade da estação, frequentemente referida por “site index”, é determinada pela acção e interacção de diversos factores do meio e influenciada pelas práticas de gestão florestal. Vários autores têm estudado a relação entre produtividade florestal e características do ambiente. Entre estas, destacam-se pela sua importância variáveis climáticas (precipitação, radiação incidente e temperatura), topográficas (declive, exposição, forma do relevo, posição na paisagem e altitude) e edáficas (químicas, físicas, morfológicas e mineralógicas) (Braga *et al.*, 1999; Amaral, 1999; O’Carrol & Farrell, 1993; Weston, 1991; Noble *et al.*, 1991; Buckley 1988; Fabres *et al.*, 1987; Barros, 1974). Mais especificamente para Portugal, em relação às propriedades do solo, consideram-se como variáveis particularmente importantes para a produtividade do eucalipto a profundidade efectiva, a pedregosidade, a textura, a densidade aparente (adensamento/compactação), o tipo de horizonte A e a fertilidade do solo. De entre os parâmetros da fertilidade do solo, destacam-se a matéria orgânica (principalmente como fonte de azoto, enxofre, fósforo e boro, efeito sobre a capacidade de troca catiónica e capacidade de retenção de água); saturação de bases do complexo de troca; formas químicas de fósforo, potássio, cálcio e magnésio prontamente disponíveis e disponíveis a médio prazo pela meteorização de minerais primários, dependentes fundamentalmente da mineralogia do solo.

Num ecossistema florestal, a dinâmica de suprimento de nutrientes para as plantas envolve processos de transferência interna e externa ao ecossistema, constituindo factores primordiais para a produção vegetal. As transferências internas consistem nos fluxos de nutrientes entre os diferentes compartimentos do ecossistema e incluem os vários componentes da biomassa (folhas, ramos, madeira, casca e raízes), a manta orgânica (detritos vegetais acumulados na superfície do solo), a matéria orgânica do

¹ Trabalho apresentado no 1º Simpósio Iberoamericano de *Eucalyptus globulus*, de 30 a 31 de Outubro de 2003, em Montevideo, Uruguay.

² Engenheiro agrónomo, M.Sc., Consultor e Gestor de Projectos de I&D Florestal, RAIZ – Instituto de Investigação da Floresta e Papel, Quinta de S. Francisco, Ap. 15 – 3801-501 Eixo (Aveiro), Portugal. e-mail: sfabres@raiz-iifp.pt

solo, a solução do solo e a fracção mineral do solo. Estes fluxos de transferência interna são governados por processos como a queda de folhada, mineralização e imobilização, capacidade de troca catiónica e adsorção aniónica do solo, disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas. Os processos de transferência externa são representados pelas entradas de elementos químicos via precipitação atmosférica (deposição seca ou húmida), aplicação de fertilizantes e meteorização de minerais primários, e pelas saídas via exploração florestal (remoção da biomassa), volatilização, perdas eólicas de elementos minerais (principalmente como consequência de queimadas) e perdas por erosão e lixiviação.

As espécies florestais são mais eficazes na utilização de recursos abióticos do que as culturas agrícolas, nomeadamente em nutrientes e água, sendo, por isso, mais conservativas do ecossistema. Assim, numa floresta natural, não perturbada, as entradas e saídas de cada elemento estão em equilíbrio. Todavia, num ecossistema florestal de produção, seminatural ou antropomorfizado, principalmente nas plantações florestais de ciclo mais curto e exploração mais intensiva, este equilíbrio é quebrado pela exportação de biomassa, podendo haver, consequentemente, um balanço negativo de nutrientes no sistema. Além disso, de um modo geral, as plantações florestais ocupam na paisagem as extensões de terra com solos de fertilidade natural mais baixa, de modo a não competir com os terrenos de aptidão eminentemente agrícola, como normalmente sugerem os ordenamentos agro-florestais. Assim, a extensão e o alcance da perda de sustentabilidade da produção vegetal dependerá de um conjunto de factores críticos, de entre os quais destacam-se as práticas silviculturais utilizadas, desde a instalação do povoamento até a idade de corte, e o método de exploração florestal (Brañas *et al.*, 2000; Cortez, 1996; Lima, 1993; Ochôa *et al.*, 1986), a espécie e respectivas taxas de crescimento e acumulação de nutrientes na biomassa, período de duração da rotação, reservas de nutrientes do solo e manejo dos resíduos florestais após o corte (Gonçalves *et al.*, 2000; Azevedo, 2000; Pacheco *et al.*, 2000; Fabres *et al.*, 1987).

Neste trabalho, embora de forma sintética, pretende-se abordar os principais aspectos envolvendo a nutrição de povoamentos de *E. globulus* em Portugal, nomeadamente aqueles relacionados com a fertilidade do solo e indicadores do estado nutricional, exportação de nutrientes e sustentabilidade da produtividade florestal.

2. Indicadores da fertilidade do solo para povoamentos de *E. globulus*

2.1. Resposta à fertilização

Entre os nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, o azoto e o fósforo têm sido os mais relevantes para as espécies florestais, na generalidade dos casos, dado o grande impacto que causam na produtividade florestal, com ganhos de até 100 % quando se consideram os efeitos aditivos de ambos (Barros *et al.*, 2000, Gonçalves *et al.*, 1997; Fabres *et al.*, 2001). Ainda, em Portugal, têm sido constatadas respostas expressivas à aplicação de fertilizantes boratados, cuja magnitude de ganhos varia consoante a região edafoclimática do país (Coutinho *et al.*, 2001; Rafael *et al.*, 2000). Para os restantes nutrientes, nomeadamente potássio e cálcio, os estudos realizados até o presente momento sugerem haver respostas significativas apenas em condições de solos com fertilidade natural muito baixa nestes elementos, tais como alguns Arenossolos dos Vales do Tejo e Sado, e alguns Leptossolos e Umbrissolos das regiões Centro-Litoral e Norte de Portugal.

As ferramentas de diagnóstico da fertilidade do solo e a respectiva solução técnica e operacional, relativamente a fósforo, potássio, cálcio, magnésio e boro, já se encontram razoavelmente desenvolvidas (Barrocas & Fabres, 2003; Rafael & Fabres, 2002; Coutinho *et al.*, 2001; Gonçalves *et al.*, 1997; Novais *et al.*, 1986) e têm

permitido uma gestão florestal optimizada, nas vertentes técnica, económica e ambiental, com ganhos expressivos de produtividade florestal e, nalguns casos, com ganhos de qualidade da madeira, consoante o uso a que se destina. Não obstante esses avanços no conhecimento e na sua aplicação efectiva à gestão das florestas cultivadas, continua a haver uma grande lacuna de conhecimento, quer básico quer aplicado, precisamente em relação a um dos factores mais limitantes da produtividade florestal, que é a capacidade de predição de suprimento de azoto de forma compatível com as necessidades da planta em cada condição específica.

Azoto e Fósforo

Têm sido obtidas respostas de grande magnitude de *E. globulus* à aplicação de N e P, sob diferentes condições edafo-climáticas de Portugal, facto que corrobora a afirmação generalizada da literatura sobre a importância da fertilização fosfatada para o sucesso de plantações de eucalipto em praticamente todo o mundo (Novais & Smyth, 1999; Gonçalves *et al.*, 1997; Barros *et al.*, 2000). Estas respostas têm proporcionado ganhos de produtividade, cuja magnitude tem variado entre 25 e 60% para N e até mais de 100% para P, quer em povoamentos em primeira rotação quer em segunda (Figuras 1 e 2).

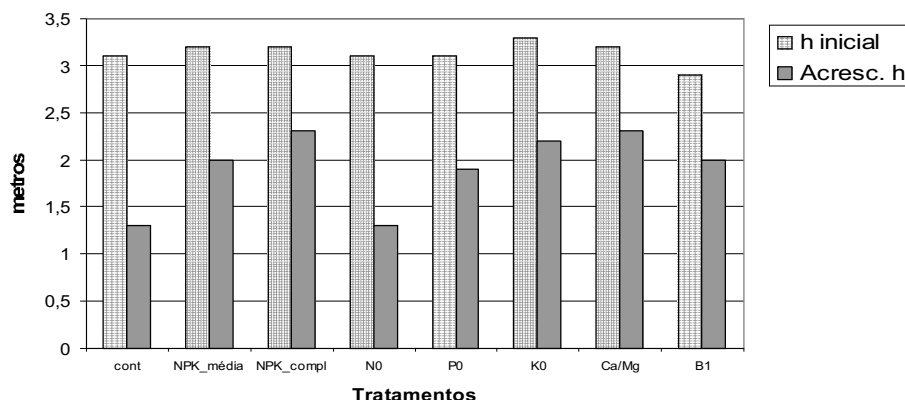


Figura 1. Resposta de *E. globulus*, em segunda rotação, à fertilização azotada e fosfatada, aplicada aos 1,5 anos de idade imediatamente após o desbaste das toijas. Os tratamentos consistiram de um factorial incompleto NPK, cujas doses foram 0, 60 e 105 kg/ha combinadas entre si (cont – sem qualquer fertilização; NPK_média – 60 kg de N, P_2O_5 e K_2O /ha; NPK_compl – 105 kg de N, P_2O_5 e K_2O /ha; N0 – 105 kg de P_2O_5 e K_2O /ha e sem N; P0 – 105 kg de N e K_2O /ha e sem P; K0 – 105 kg de N e P_2O_5 /ha e sem K; Ca/Mg – tratamento constituído para aplicação de calcário se os níveis de cálcio + magnésio no solo fossem inferiores a 0,8 cmol/kg (como o solo apresentava valores superiores, a calagem não foi efectuada, sendo assim na prática uma repetição do NPK_compl); B1 – 5,5 kg de B e 60 kg de NPK/ha.

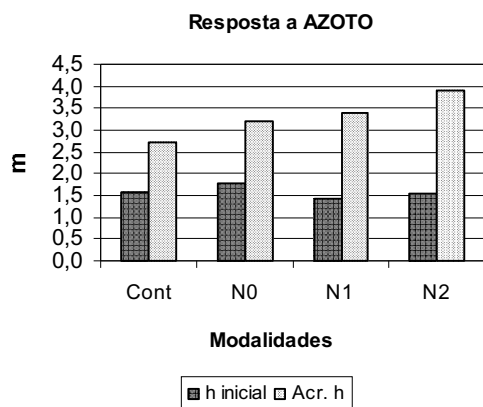


Figura 2. Acréscimo de altura de *E. globulus* entre a idade de 1 e 3 anos, em função da aplicação de N (Cont – sem qualquer fertilização; N0 – sem N; N1 – 30 kgN/ha; N2 – 60 kgN/ha), na região Centro Interior de Portugal.

A fertilização fosfatada de fundo, necessária para o “arranque” inicial das plantas e para a manutenção do crescimento durante os primeiros anos, representa muitas vezes o sucesso da plantação. Assim, a Figura 3 mostra a curva de resposta à fertilização fosfatada na instalação de um povoamento de *E. globulus* num solo do sudoeste de Portugal, um Cambissolo léptico ródico de textura franco argilosa e com um teor médio de 4 mg P/kg solo. A dose óptima para proporcionar 90% do crescimento máximo, aos 12 meses de idade, foi de 9,3g de P/cova.

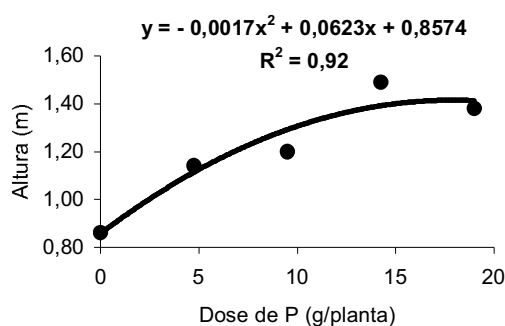


Figura 3. Resposta de *E. globulus* à fertilização fosfatada de fundo, aos 12 meses de idade. A fonte de fósforo utilizada foi o fosfato monocalcico, com 18% de P_2O_5 , aplicada na cova de plantação.

Em outro ensaio, avaliou-se a eficácia da fertilização fosfatada, comparando fontes de P com diferentes constantes de solubilidade, aplicadas como adubação de fundo em plantações de *E. globulus* (Figura 4). As conclusões são assim sumariadas.

- i) A fertilização fosfatada proporcionou ganhos de produtividade que variaram entre 20 e 66%, aos seis anos de idade, independentemente da fonte de fósforo utilizada.
- ii) Os maiores ganhos de produtividade foram obtidos quando a fonte de P aplicada foi o Superfosfato 18%, ou a combinação de 1:1 (Superfosfato 18% + Gafsa). A aplicação de uma fonte solúvel, como o superfosfato, foi necessária para fazer face às necessidades da planta na fase inicial de crescimento e, aparentemente, manteve-se superior às restantes fontes até pelo menos aos seis anos de idade.

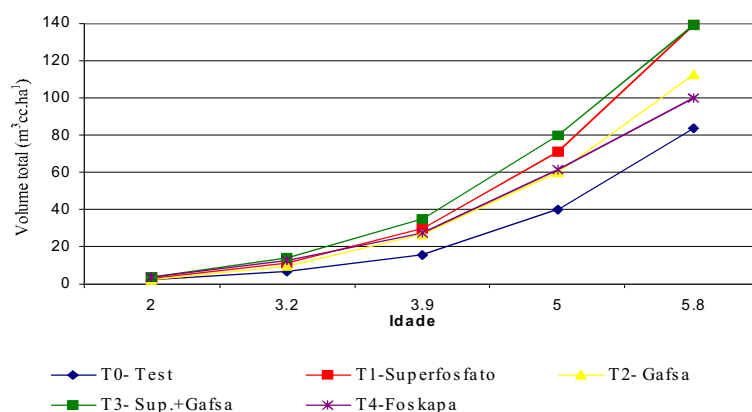


Figura 4. Evolução da produção de madeira com casca, em m^3ha^{-1} , ao longo do ciclo de crescimento de um povoamento de *E. globulus*, em função da aplicação de 90 kg de $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ sob diferentes fontes de fertilizante fosfatado, num Leptosolo úmbrico da Região Centro de Portugal. O tratamento T0 não recebeu qualquer fertilização, excepto a aplicação de um fertilizante de libertação lenta (30 g de NPK 11-22-9/planta), igual em todos os tratamentos.

iii) A disponibilidade de P para as plantas depende da relação entre as taxas de solubilização do fosfato natural e a velocidade de adsorção pelo solo do P “solubilizado” e a sua consequente passagem para formas não lábeis. Os trabalhos mais recentes sobre a eficácia dos fosfatos naturais (Fernandez, 1996; Novais & Smyth, 1999) têm mostrado que essa relação favorece mais a “fixação” de P do que a sua disponibilidade, quando se aumenta a superfície de contacto do solo com o fertilizante, sobretudo para os solos com elevado poder-tampão de P. Embora este efeito especificamente não tenha sido testado neste ensaio, uma vez que a aplicação de qualquer dos fertilizantes foi feita de forma localizada no sulco de plantação, é provável que para solos com baixo factor capacidade de P (solos mais arenosos e de mineralogia menos sesquioxídica), como o são alguns solos florestais de Portugal, este efeito não seja tão evidente quanto nos solos tropicais fortemente meteorizados.

iv) A utilização de uma fonte solúvel, aplicada de maneira localizada, tem sido a técnica actualmente empregada para assegurar a quantidade de P necessária para o “arranque inicial das plantas”.

A quantidade de P a aplicar é variável com a produtividade esperada e com características físicas e químicas dos solos, critério considerado pelo **NUTRIGLOBUS 2002** para recomendação da dose de fertilizante fosfatado (Fabres *et al.*, 2002). Aparentemente, para grande parte dos solos de Portugal, a quantidade de fertilizante fosfatado recomendada na instalação do povoamento tem sido ainda suficiente para assegurar uma taxa normal de crescimento do eucalipto ao longo da rotação. Não obstante, para solos com concentrações de P muito baixas ($\leq 4 \text{ mg P/kg solo}$), é provável que, além da fertilização de fundo, haja a necessidade de aplicação de uma fonte de solubilidade mais lenta, aplicada em faixas, para manter uma concentração de P razoável em pelo menos parte da massa de solo, de modo a não restringir as taxas de crescimento por deficiência de P ao longo da rotação.

Potássio, Cálcio e Magnésio

Em Portugal, contrariamente ao verificado para N, P e B, não se têm observado respostas à aplicação de K, Ca e Mg para grande parte dos solos com plantações de eucalipto. Isto explica-se principalmente pelo facto de as concentrações destes nutrientes no solo estarem acima dos níveis críticos, pelo menos para a gama de produtividade obtida nessas condições (ver 2.2).

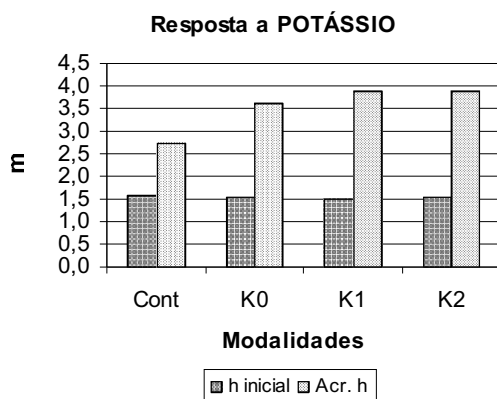


Figura 5. Acréscimo de altura de *E. globulus* entre a idade de 1 e 3 anos, em função da aplicação de K (Cont – sem qualquer fertilização; K0 – sem K; K1 – 40 kgK/ha; K2 – 80 kgK/ha), na região Centro Interior de Portugal. Todos os tratamentos receberam a aplicação de 60 kgN/ha, excepto o controle.

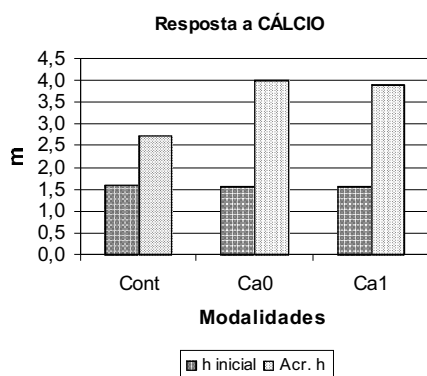


Figura 6. Acréscimo de altura de *E. globulus* entre a idade de 1 e 3 anos, em função da aplicação de Ca (Cont – sem qualquer fertilização; Ca0 – sem Ca; Ca1 – 400 kgCa/ha), na região Centro Interior de Portugal. Todos os tratamentos receberam a aplicação de 60 kgN/ha, excepto o controle.

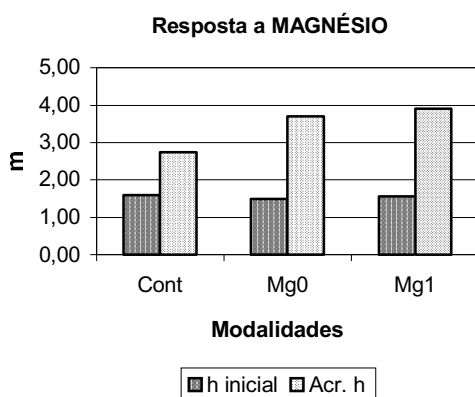


Figura 7. Acréscimo de altura de *E. globulus* entre a idade de 1 e 3 anos, em função da aplicação de Mg (Cont – sem qualquer fertilização; Mg0 – sem Mg; Mg1 – 20 kgMg/ha), na região Centro Interior de Portugal. Todos os tratamentos receberam a aplicação de 60 kgN/ha, excepto o controle.

Boro

Em algumas regiões de Portugal, tem havido respostas expressivas de *E. globulus* à aplicação de boro (Figura 8).

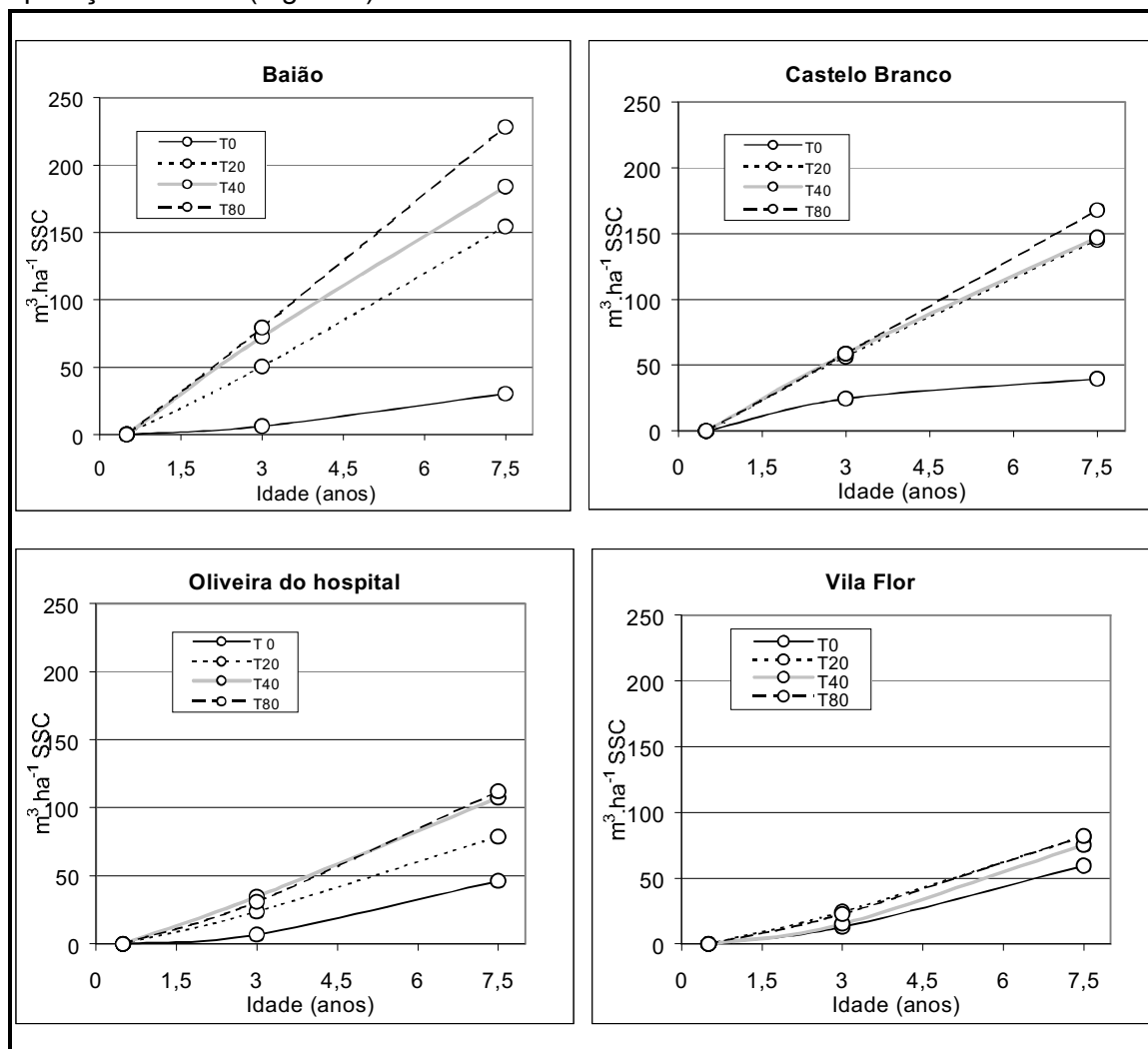


Figura 8 – Evolução do volume de madeira sem casca, em m³/ha, ao longo do ciclo de crescimento de *E. globulus*, sob quatro níveis de fertilização boratada (0, 20, 40 e 80 g de Na₂B₄O₇.5H₂O/planta), em diferentes regiões de Portugal: Baião (Norte Litoral), Castelo Branco (Centro Interior), Oliveira do Hospital (Centro Litoral) e Vila Flor (Norte Interior). (Adaptado de Rafael *et al.*, 2001).

Em três povoamentos de *E. globulus*, que exibiam fortes sintomas de deficiência de boro, fez-se um corte total da madeira. Após o desbaste das toíças, que ocorreu aos 2,5 anos de idade, deixando-se dois fustes/toiça, foram constituídos quatro tratamentos correspondentes a quatro níveis de B. Num dos povoamentos (Baião), a aplicação de boro ocorreu aos 2,5 anos de idade em 1ª rotação. Os solos predominantes nos locais de ensaio variaram entre o Leptossolo paralítico úmbrico, o Cambissolo léptico districo e o Umbrissolo léptico arénico, derivados de granitos leucocráticos (Figura 8).

A fertilização boratada propiciou uma recuperação dos povoamentos, com ganhos volumétricos que variaram de 50 m³ a 170 m³/ha, consoante o potencial de produtividade de cada local (Coutinho *et al.*, 2001; Rafael *et al.*, 2001). Nesse estudo, apenas se realizou uma aplicação, embora seria desejável distribuir o boro em duas

aplicações (uma entre um e dois anos e outra entre dois e quatro anos de idade), de modo a evitar, por um lado, eventuais sintomas de toxicidade e perdas por lixiviação, e, por outro lado, assegurar a manutenção de níveis mais elevados de B no solo nas fases de crescimento de maior demanda deste nutriente. Espera-se que, uma vez que o B faça parte da biomassa em concentrações mais elevadas, assim que começam a operar os mecanismos de ciclagem biogeoquímica, a probabilidade de ocorrência de deficiência de B diminuirá com a idade ou será mesmo inexistente.

2.2 Avaliação da fertilidade do solo – ferramentas de diagnóstico

Azoto

O azoto encontra-se no solo em cinco compartimentos: (1) – N na matéria orgânica; (2) – N mineral na solução do solo e adsorvido nos sítios de troca existentes na superfície dos colóides do solo; (3) – N constituinte de resíduos de plantas (caídos sobre o solo); (4) – N amoniacal fixado em minerais de argila; (5) – N na forma de gases (N_2 , NH_3 , NO_2 , NO e N_2O) presentes na atmosfera do solo. O intercâmbio entre as várias formas é muito dinâmico e se dá primariamente via actividade microbiológica (Barber, 1995). As perdas de N para fora do sistema solo-planta abrangem basicamente as perdas gasosas (por volatilização, desnitrificação e nitrificação), as perdas por lixiviação e escoamento superficial, e as perdas por erosão (Azevedo, 2000). Assim, a disponibilidade de N para as plantas dependerá, por um lado, da quantidade total de azoto existente em um dado ecossistema e, por outro, da velocidade de transformações entre as suas diferentes formas, uma vez que as plantas praticamente só o absorvem sob formas minerais, nomeadamente amoniacal e nítrica. Não obstante essa diversidade de formas químicas existentes no solo, a quantidade de azoto mineral é geralmente pequena comparada com aquela presente na fracção orgânica, que varia entre 95 e 98%. Assim, a disponibilidade de N para as culturas depende efectivamente da quantidade e da qualidade da matéria orgânica disponível e das respectivas taxas de decomposição e mineralização. Por conseguinte, usualmente, são grandes as quantidades de azoto aplicadas na maioria dos campos agrícolas, uma vez que os solos agrícolas normalmente têm baixos teores de matéria orgânica e as taxas de mineralização não satisfazem as elevadas necessidades das culturas. Daí advêm riscos de poluição ambiental pela contaminação de cursos hídricos e do lençol freático, caso o manejo da fertilização azotada não seja preciso. Todavia, para as espécies florestais, que têm taxas de crescimento mais lentas, exploram um volume de solo maior e reutilizam grande parte dos nutrientes via mecanismos de ciclagem biogeoquímica, o conhecimento da dinâmica do azoto no solo, tendo como fontes principais a matéria orgânica do solo e a manta orgânica (*litter*), é fundamental para a optimização da gestão silvícola de povoamentos florestais na óptica da sustentabilidade, nas suas vertentes económica e ecológica. Neste sentido têm sido sugeridas diferentes abordagens para avaliar a disponibilidade de N no solo, tais como análise do N mineral do solo, inferência da disponibilidade do N pelo teor de matéria orgânica do solo (procedimento mais comum nas análises de solo de rotina), biotestes com isótopo ^{15}N , avaliação da qualidade da matéria orgânica, determinação de taxas de decomposição em condições de campo ou medidas que estimam a quantidade de N potencialmente disponível a partir da incubação de amostras de solo em laboratório e, mais recentemente, o método de incubação sequencial de *cores* de amostras de solo, que permite estudar os fluxos de N mineral em condições de campo. Obviamente, todos esses métodos têm vantagens e limitações, mas nenhum deles isoladamente permite avaliar com precisão e simplicidade metodológica a capacidade de o solo suprir N para as plantas, de modo a constituir uma ferramenta pragmática para a gestão optimizada da fertilização azotada e do manejo dos resíduos florestais na área após a exploração florestal.

Assim, com o objectivo de estudar a dinâmica de C e N e desenvolver um modelo de predição da disponibilidade de N para povoamentos de eucalipto, de modo a otimizar as intervenções de fertilização, o RAIZ está a iniciar um projecto nesse sentido. Até ao momento, não se dispõe de uma ferramenta precisa para avaliar o N disponível no solo. As recomendações de fertilização são baseadas em evidências experimentais e teor de matéria orgânica do solo, em cada condição específica.

Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio

O nível crítico de um dado nutriente no solo pode ser definido como a concentração mínima do nutriente que proporciona a produção de máxima eficiência económica, quando os outros nutrientes ou factores de produção se aproximam do nível adequado. Assim, o conhecimento do nível crítico do nutriente no solo torna-se fundamental uma vez que, em termos práticos, permite separar populações de solo com alta probabilidade de resposta à fertilização de populações com baixa probabilidade (Alvarez V., 1996). e, deste modo, fazer uma recomendação de fertilização muito mais precisa.

Ao longo das fases do ciclo de crescimento do eucalipto há diferentes necessidades nutricionais e, assim, diferentes concentrações no solo são requeridas para a manutenção da taxa óptima de crescimento em cada fase. Uma estimativa mais precisa da necessidade de nutrientes de um povoamento pode ser obtida com base nas curvas de acumulação de biomassa e de nutrientes, em função da idade da planta. De um modo geral, a idade de quatro anos corresponde sensivelmente à altura em que ocorre o fechamento da copa e ao período de maior necessidade de nutrientes (Gonçalves *et al.*, 2000). Pode dizer-se que, por um lado, com o aumento da idade do povoamento, o nível crítico de cada nutriente tenderá a diminuir. Isto ocorre porque, ao longo da rotação, vai havendo maior volume de solo explorado pelas raízes, pode haver alguma disponibilidade de nutrientes a partir de formas químicas inicialmente indisponíveis e tornam-se cada vez mais eficazes os mecanismos de ciclagem biogeoquímica (Barros *et al.*, 2000; Gonçalves *et al.*, 2000; Fabres *et al.*, 1987). Além disso, até ao fechamento da copa, a acumulação relativa de nutrientes é maior que a acumulação relativa de biomassa, havendo uma maior proporção de biomassa na forma de folhas e ramos novos que possuem elevados teores de nutrientes (Barros *et al.*, 2000; Gonçalves *et al.*, 1997 e 2000). Após o fechamento da copa, haverá uma rápida e maior alocação de biomassa para o tronco, que possui menores teores de nutrientes, diminuindo, deste modo, a necessidade relativa de nutrientes. Ademais, os nutrientes móveis (N, P, K e Mg) serão redistribuídos no interior da planta – ciclagem bioquímica – e começa também a deposição, mineralização e reabsorção de nutrientes – ciclagem biogeoquímica – resultando numa menor “exigência” sobre as reservas de nutrientes do solo (Barros *et al.*, 2000; Gonçalves *et al.*, 1997 e 2000). Por conseguinte, os conceitos de nível crítico (de nutrientes) de instalação e nível crítico de manutenção adquirem relevância para a gestão otimizada da fertilização de povoamentos de eucalipto. Neste contexto, Novais *et al.* (1986) propuseram originalmente valores de níveis críticos de implantação (instalação) e manutenção para eucaliptos cultivados no Brasil.

Com base em evidências experimentais empíricas e algum exercício teórico, sugerem-se as seguintes definições para níveis críticos (NC) de instalação e manutenção:
nível crítico de instalação (NCI) – concentração do nutriente no solo, na vizinhança das raízes das plantas, no tempo t₀ (início da plantação), necessária para o crescimento óptimo do eucalipto até ao tempo t₁ (≈2 a 3 anos de idade, dependendo da taxa de crescimento do *site*).

nível crítico de manutenção (NCM) – concentração do nutriente no solo, no tempo t1 (≈2 a 3 anos de idade), necessária para o crescimento óptimo do eucalipto até ao final da rotação, para uma dada profundidade efectiva e determinado grau de pedregosidade do solo.

A partir de modelos de produção e respectivas curvas alométricas e de valores de concentração óptima de nutrientes em cada componente da biomassa, ao longo do ciclo de crescimento de *E. globulus*, foram estimadas as curvas de absorção de nutrientes e, assim, derivados os níveis críticos de P, K, Ca e Mg no solo para manutenção das taxas de crescimento óptimas para uma dada produtividade esperada – NCM. Para a estimativa do NCI, para além da demanda da planta na fase inicial de crescimento, foram considerados coeficientes graduais de utilização de volume do solo pelas raízes, com o aumento da idade das plantas.

Há um estreito relacionamento entre a produtividade florestal e o NC no solo (Figuras 9, 10, 11 e 12). Embora haja diferenças entre o NCI e o NCM para todos os nutrientes, diferença expressiva só é verificada para P. Os elevados valores de NCI de P explicam-se, por um lado, pela elevada exigência metabólica em P e, por outro lado, pelo restrito volume de solo explorado pelas raízes, na fase inicial de crescimento. Estes valores de NC estimados estão a ser validados por uma rede de ensaios de campo (projecto NUTRICEL/RAIZ), a partir dos quais pretende-se obter a curva de absorção de nutrientes e determinar o NC de nutrientes no solo (Quadro 1 da página 14), a partir de equações de regressão que relacionam parâmetros de produtividade como variáveis dependentes da concentração de nutrientes no solo (Figura 13).

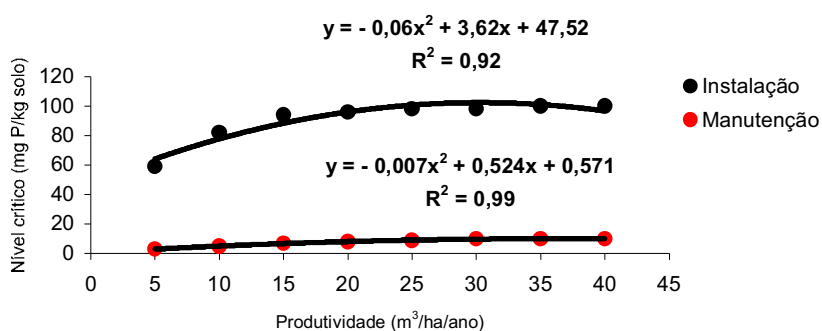


Figura 9. Níveis críticos de **fósforo** no solo para a instalação e manutenção de povoamentos de *E. globulus* com diferentes produtividades.

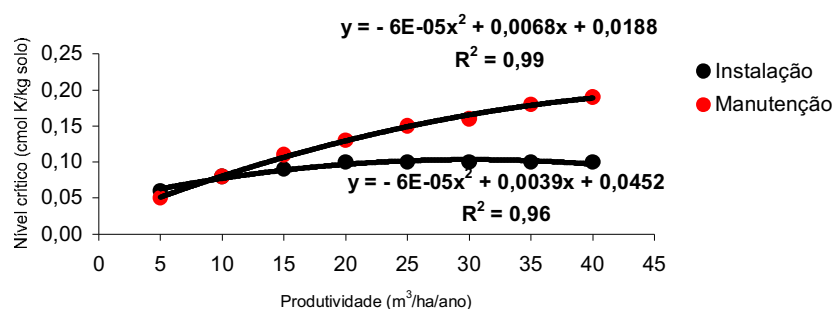


Figura 10. Níveis críticos de **potássio** no solo para a instalação e manutenção de povoamentos de *E. globulus* com diferentes produtividades.

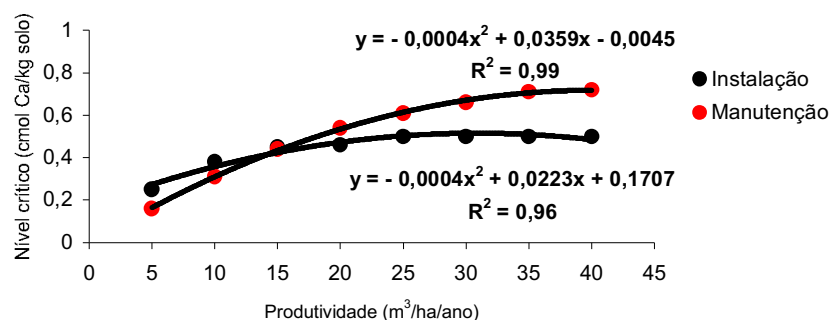


Figura 11. Níveis críticos de **cálcio** no solo para a instalação e manutenção de povoamentos de *E. globulus* com diferentes produtividades.

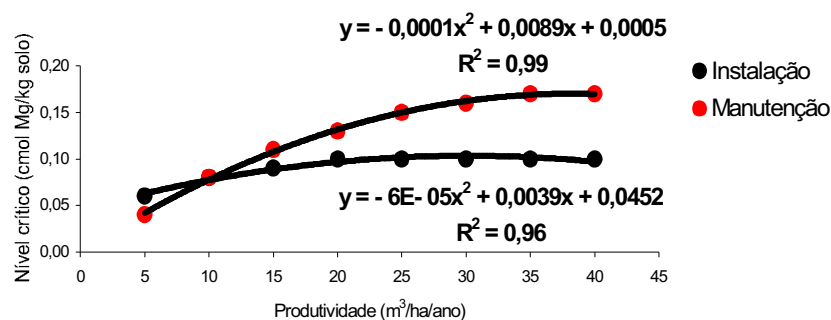
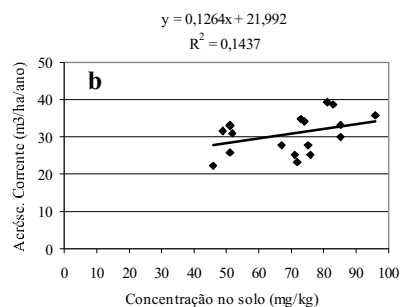
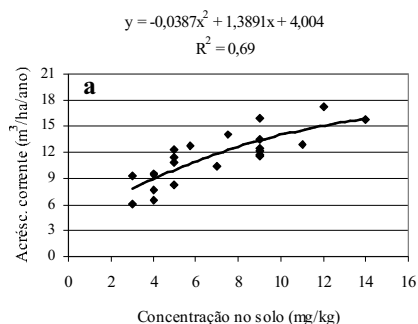
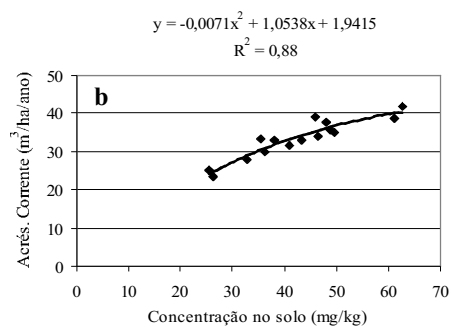
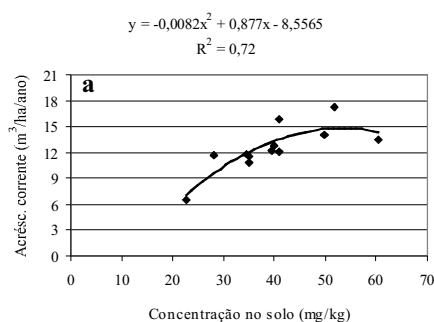


Figura 12. Níveis críticos de **magnésio** no solo para a instalação e manutenção de povoamentos de *E. globulus* com diferentes produtividades.

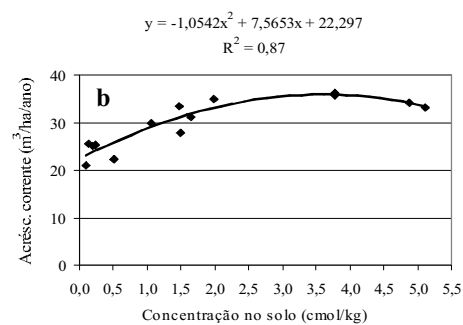
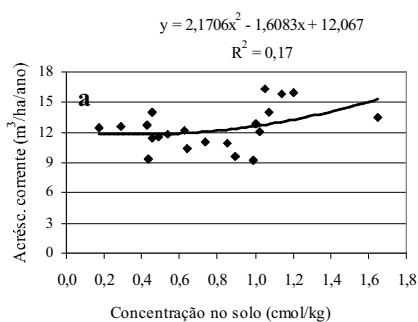
Fósforo



Potássio



Cálcio



Magnésio

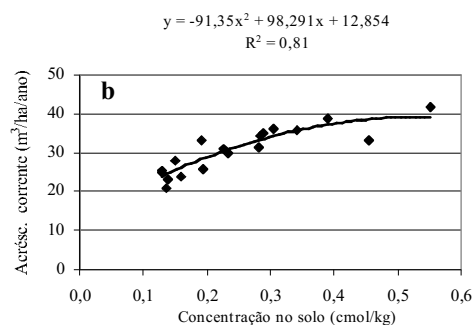
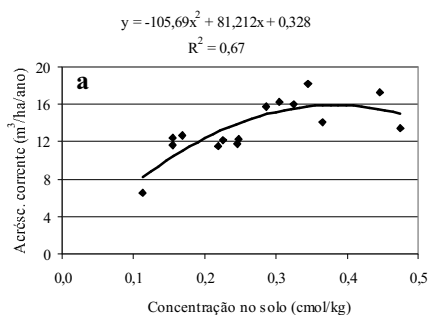


Figura 13. Equações de regressão que relacionam o acréscimo corrente de madeira com casca como variável dependente da concentração de P, K, Ca e Mg no solo, em duas regiões representativas de Portugal: Vale do Tejo (a) e Norte Litoral (b).

Micronutrientes

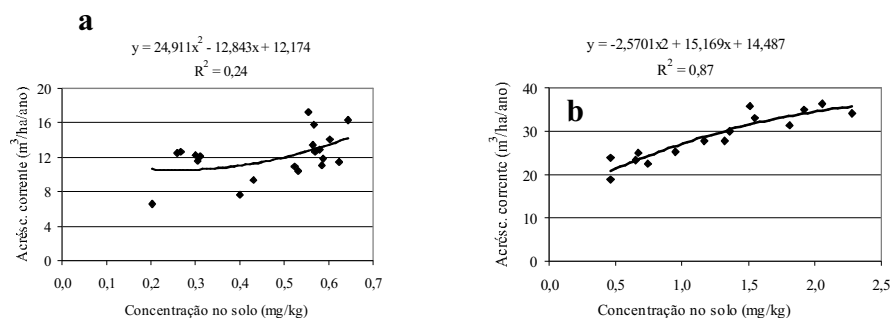
O teor de micronutrientes no solo é dependente, fundamentalmente, da composição mineralógica da rocha que lhe deu origem. Na maioria dos casos, os teores existentes no solo não são limitantes, com excepção de algumas culturas agrícolas mais exigentes. Não obstante, solos arenosos derivados de rochas félsicas (como, por exemplo, os granitos), pobres em minerais máficos, podem apresentar baixa fertilidade em relação a micronutrientes, especialmente boro, como tem sido constatado em diversos ambientes de Portugal, em solos sob povoamentos de eucalipto. Nesses ambientes, foram obtidas expressivas respostas do eucalipto à aplicação de fertilizante boratado (Coutinho *et al.*, 2001; Rafael *et al.*, 2001).

A análise de micronutrientes no solo, como método de diagnóstico da sua disponibilidade para as plantas, não tem sido muito utilizada recorrendo-se mais frequentemente à diagnose foliar. Na realidade, continua a investigação e o debate, ainda, para definir o melhor extractor para micronutrientes e a magnitude de resposta das culturas à fertilização com estes elementos. Além disso, esses trabalhos foram realizados predominantemente para culturas agrícolas e apenas estabelecem classes de fertilidade do solo (LQARS, 2000; Lopes & Abreu, 2000).

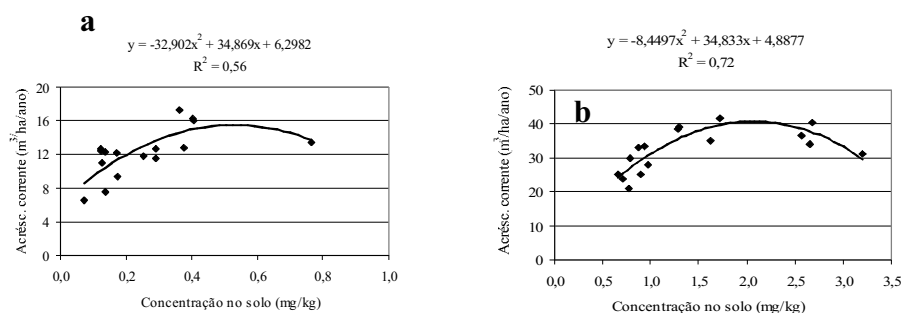
Em Portugal, o método Mehlich 3 revelou ser um bom extractor também para micronutrientes, uma vez que os teores disponíveis no solo, de um modo geral, se correlacionaram significativamente com a absorção pelas plantas e, aparentemente, com parâmetros de produtividade (Figura 14).

De um modo geral, para o conjunto dos micronutrientes estudado, as equações de regressão que relacionam o acréscimo de produção de madeira como variável dependente da concentração destes no solo (Figura 14) foram significativas, permitindo, assim, calcular o seu nível crítico no solo para 90% da produção máxima (Quadro 1). A única excepção foi boro na região do Vale do Tejo, onde não se obteve correlação. Nos restantes casos, os níveis críticos pelo Mehlich 3 foram 1,7 mg/kg para B (Norte Litoral); 0,31 mg/kg e 1,36 mg/kg para Cu; 0,54 mg/kg e 1,0 mg/kg para Zn; 69,8 mg/kg e 280 mg/kg para Fe; 0,8 mg/kg e 4,5 mg/kg para Mn, para as regiões de Vale do Tejo e Norte Litoral, respectivamente.

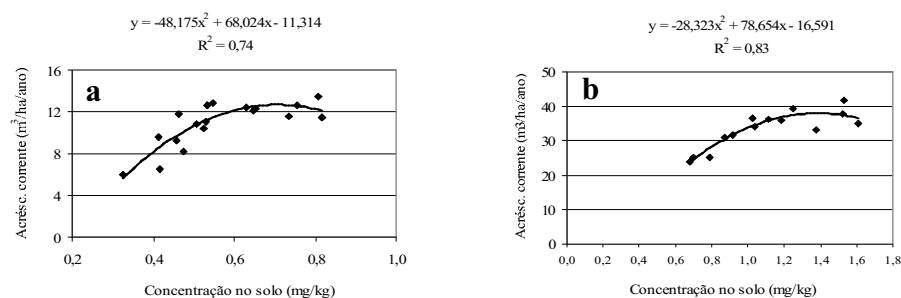
Boro



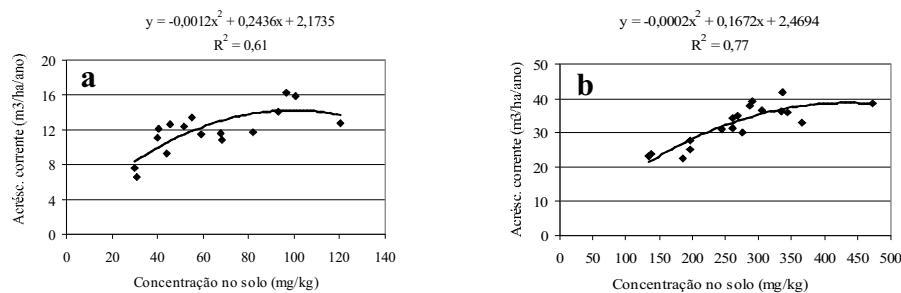
Cobre



Zinco



Ferro



Manganês

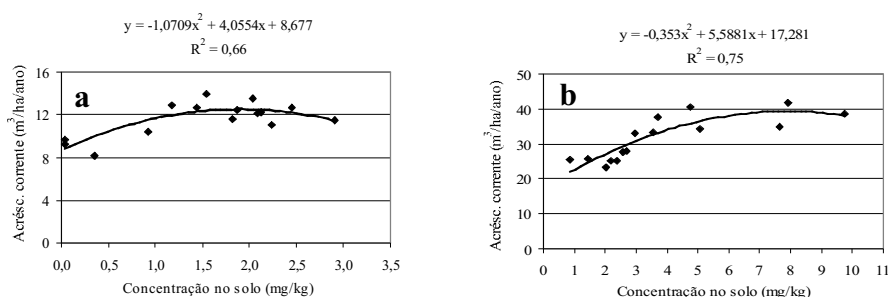


Figura 14. Equações de regressão que relacionam o acréscimo corrente de madeira com casca como variável dependente da concentração de B, Cu, Zn, Fe e Mn no solo em duas regiões Vale do Tejo (a) e Norte Litoral (b).

Quadro 1. Nível crítico de macro e micronutrientes no solo pelo Mehlich 3, obtidos para 90% da produção máxima de *E. globulus*, aos quatro anos de idade, em dois locais de Portugal. Valores obtidos em ensaios de calibração para validação do Nutriglobus 2002 (software de recomendação de adubação para *E. globulus*, desenvolvido pelo RAIZ em 2002)

Nutriente	Nível Crítico	
	Vale do Tejo	Norte Litoral
	90% prod. máx: 12 m ³ /ha/ano	90% prod. máx: 34 m ³ /ha/ano
P (mg/kg)	11,4	> 11,4
K (mg/kg)	40	55
Ca (cmol/kg)	0,40	0,70
Mg (cmol/kg)	0,15	0,25
B (mg/kg)	---	1,70
Cu (mg/kg)	0,31	1,36
Zn (mg/kg)	0,54	1,0
Fe (mg/kg)	66	280
Mn (mg/kg)	0,8	4,5

3. Indicadores do estado nutricional de povoamentos de *E. globulus*

Diversos trabalhos, em várias partes do mundo, têm demonstrado a relação entre a produção de madeira de eucalipto e as concentrações de nutrientes no tecido vegetal ou no solo (Barros *et al.*, 1986; Gonçalves *et al.*, 1986; Bennett *et al.*, 1996; Judd *et al.*, 1996; Kriedmann & Cromes, 1996; Ismael *et al.*, 1998). Todavia, a diagnose foliar do *status* nutricional das plantas requer uma série de cuidados, nomeadamente em termos de amostragem, uma vez que a concentração de nutrientes nas folhas (para um dado genótipo) pode variar com a idade das plantas, posição das folhas na copa e estação do ano. A diagnose foliar de um dado nutriente pode ainda ser influenciada pela interacção com outros nutrientes ou com os níveis de outros factores de crescimento presentes no ambiente.

Num diagnóstico sobre o estado nutricional de povoamentos adultos de *E. globulus* em Portugal, encontraram-se como valores de referência de concentração foliar os seguintes intervalos médios: 9,6 – 13,3 para N; 0,6 – 0,9 para P; 4,6 – 5,8 para K; 8,2 – 12,4 para Ca e 1,3 – 1,8 para Mg, em g/kg de matéria seca, e 20,4 - 40 mg B/kg de matéria seca. Estes valores parecem sugerir que há uma deficiência generalizada em N e P, enquanto que para os restantes macronutrientes só pontualmente se verifica a ocorrência de deficiência.

Num ensaio de fertilização para avaliar a resposta de *E. globulus* a diferentes níveis de N, K, Ca e Mg, aplicados no primeiro ano de idade, não obstante tenham sido obtidas respostas significativas à aplicação de N (Figura 2), a concentração foliar de N apresentou uma tendência de queda nos dois anos seguintes à fertilização, embora tenha havido uma correlação significativa entre o teor foliar de N e a produtividade ($r=0,96$, $p<0,01$). Isto, provavelmente, aconteceu devido ao efeito de diluição do N na biomassa, por um lado, e à efemeridade do efeito da adubação azotada no nível de N no solo, por outro lado (Figura 15).

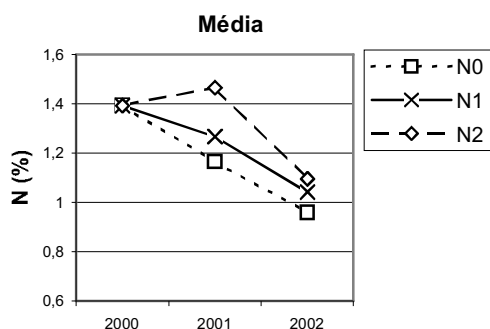


Figura 15. Evolução da concentração foliar de azoto em diferentes fases de crescimento de *E. globulus* (1,5; 2,5; 3,5 anos de idade) após uma aplicação de 0 (N0), 30 (N1) e 60 (N2) kgN/ha ao primeiro ano de idade.

Para os restantes nutrientes, não houve nem ganhos de crescimento (Figuras 5, 6 e 7), nem respostas significativas em termos de concentração foliar (Figuras 16, 17, 18). Ainda assim foi constatada uma tendência de declínio na concentração foliar de K, Ca e Mg nos dois anos subsequentes à fertilização.

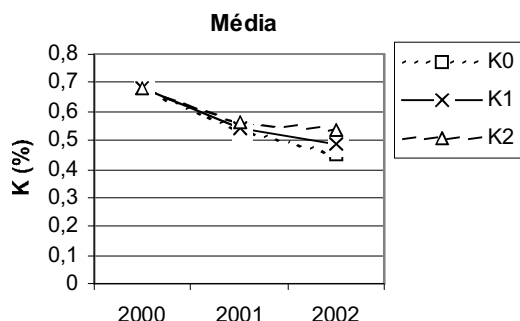


Figura 16. Evolução da concentração foliar de potássio em diferentes fases de crescimento de *E. globulus* (1,5; 2,5; 3,5 anos de idade), em função da aplicação de três níveis de K aos 12 meses de idade: 0 (K0), 33 (K1) e 66 (K2) kgK/ha. Todos os tratamentos receberam ainda uma aplicação de 60 kgN/ha.

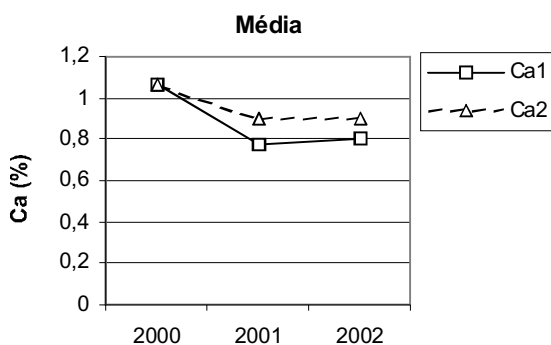


Figura 17. Evolução da concentração foliar de cálcio em diferentes fases de crescimento de *E. globulus* (1,5; 2,5; 3,5 anos de idade), em função da aplicação de dois níveis de Ca aos 12 meses de idade: 0 (Ca0) e 400 (Ca1) kgCa/ha. Todos os tratamentos receberam ainda uma aplicação de 60 kgN/ha.

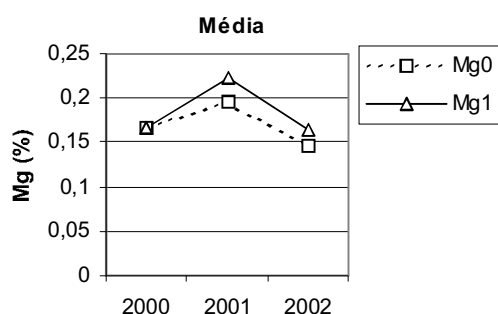


Figura 18. Evolução da concentração foliar de **magnésio** em diferentes fases de crescimento de *E. globulus* (1,5; 2,5; 3,5 anos de idade), em função da aplicação de dois níveis de Mg aos 12 meses de idade: 0 (Mg0) e 20 (Mg1) kgMg/ha. Todos os tratamentos receberam ainda uma aplicação de 60 kgN/ha.

Além dos ganhos de produtividade florestal referidos em 2.1 (Figura 8), a aplicação de doses crescentes de **boro** levou a aumentos da concentração foliar de B de grande magnitude logo após a aplicação, mas havendo um decréscimo acentuado nos anos seguintes (Figura 19). Os valores de concentração foliar óptima parecem situar-se entre 25 e 40 mg/kg.

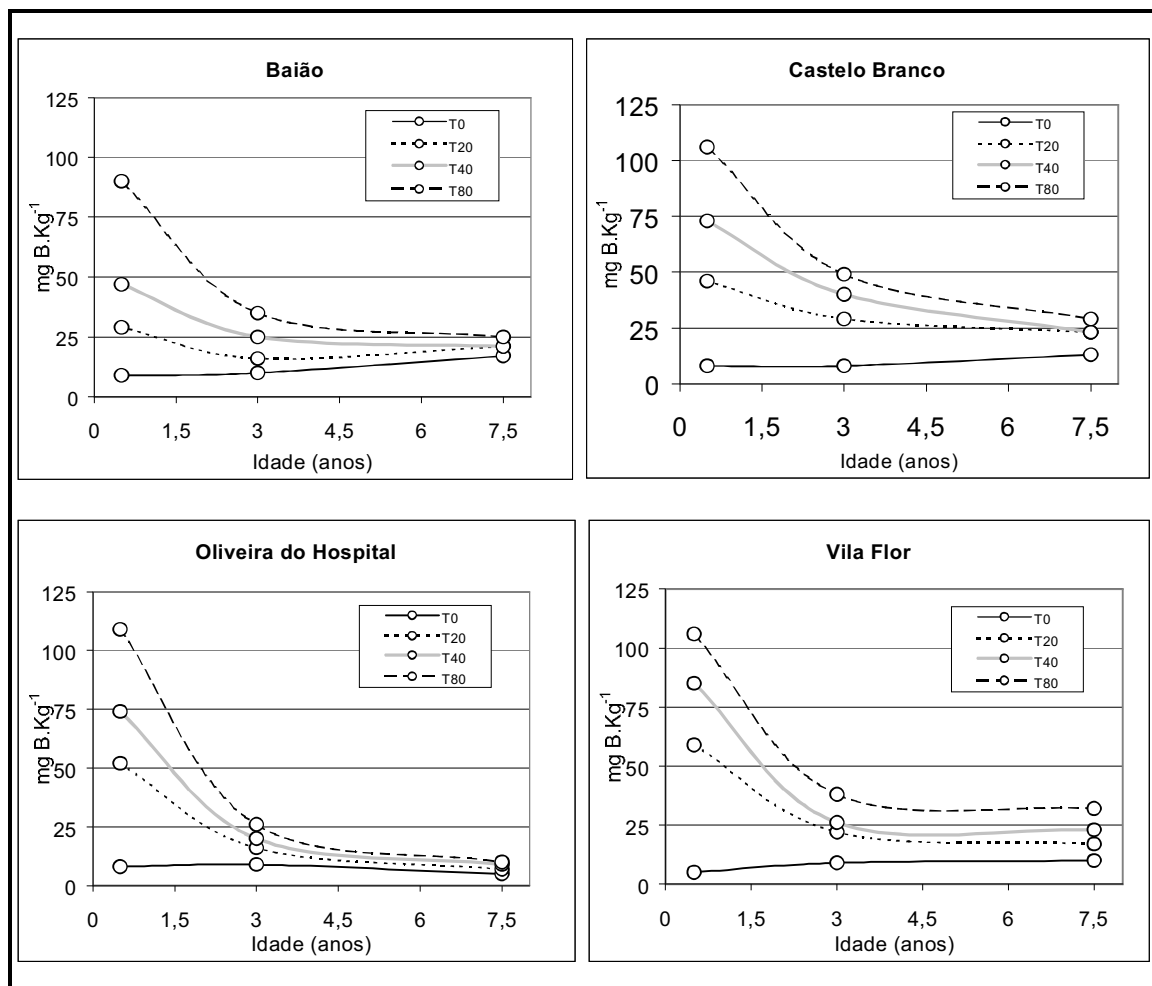


Figura 19. Variação do teor foliar de boro ao longo do ciclo de crescimento de *E. globulus*, sob quatro níveis de fertilização boratada (0, 10, 20, 40 e 80 g de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ /planta), em diferentes regiões de Portugal: Baião (Norte Litoral), Castelo Branco (Centro Interior), Oliveira do Hospital (Centro Litoral) e Vila Flor (Norte Interior).

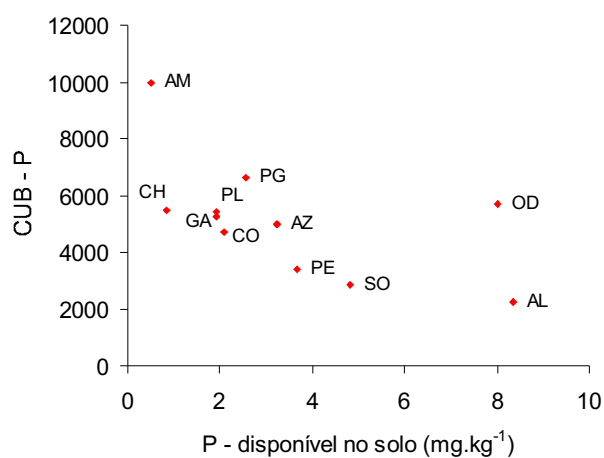
Coeficiente de Utilização Biológica (CUB)

Uma outra forma de exprimir a relação entre o estado nutricional das plantas e o seu crescimento é pelo conceito de utilização de nutrientes, sendo o “quociente de utilização”, proposto por Steenberg & Jakobsen (1963), a medida da quantidade de matéria seca produzida por unidade de nutriente na planta. Assim, o coeficiente de utilização biológica pode ser definido como a quantidade de matéria seca produzida, total ou por componente da parte aérea, por unidade do nutriente imobilizada na parte aérea total ou na componente da árvore considerada, respectivamente. Na verdade, este índice é o inverso da concentração de nutrientes e deve, por isso mesmo, ser interpretado também com muito cuidado (Borrow, 1978 *in* Grove *et al.*, 1996). Em 1986, Barros *et al.* propuseram uma metodologia para recomendação de adubação para plantações de eucalipto, que considera simultaneamente a produtividade potencial da estação, a quantidade de nutrientes existentes na biomassa, a quantidade de nutrientes disponíveis no solo e o coeficiente de utilização biológica para cada nutriente (CUB). Originalmente, e sobretudo para efeito de recomendação de adubação, esses autores consideraram a componente tronco (madeira + casca) para o cálculo do CUB.

Assumindo-se o CUB como um indicador biológico do estado nutricional das plantas, espera-se que, tal como ocorre com a concentração de nutrientes no tecido vegetal, o CUB de um determinado genótipo seja variável entre diferentes ambientes edafo-climáticos, reflectindo assim as diferenças de disponibilidade dos nutrientes no solo. Espera-se também que o CUB seja variável entre diferentes genótipos num mesmo ambiente, reflectindo o controle genético sobre a eficiência nutricional. Diferenças genotípicas podem ocorrer principalmente em termos de eficiência de absorção, distribuição interna e utilização de nutrientes (Grove *et al.*, 1996). A interacção genótipo-ambiente pode ser descrita como uma *performance* diferencial de diferentes genótipos quando plantados em diferentes ambientes (Matheson & Cotterill, 1990 *in* Rojas *et al.*, 2000). Os mecanismos potenciais das diferenças de absorção e utilização de nutrientes podem ser separados em componentes funcionais tais como variação genotípica em crescimento e morfologia das raízes, variações inerentes à capacidade de absorção, translocação e utilização de nutrientes e processos relacionados com a fixação de carbono e alocação de fotoassimilados (Rojas *et al.*, 2000).

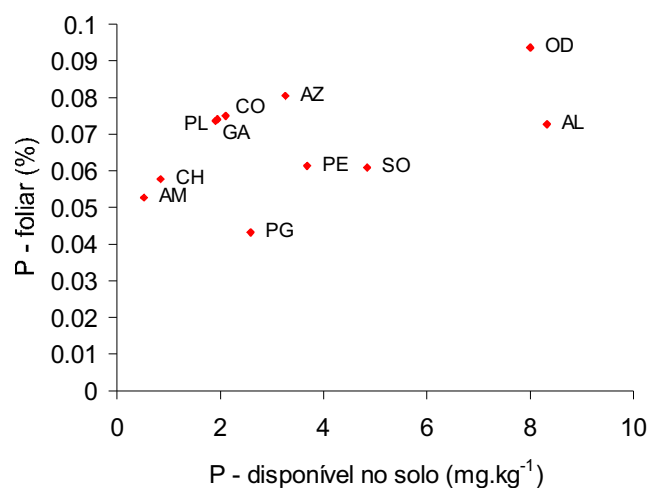
A mesma relação existente entre produção de biomassa e concentração de nutrientes também se aplica à relação entre produção de biomassa e CUB, uma vez que o CUB é o inverso da concentração. Contudo, é provável que em povoamentos com idade mais avançada, próxima à idade de corte, os valores de CUB reflectam melhor o “historial nutricional” do ciclo de crescimento da floresta. Em árvores adultas, a estabilidade ou “capacidade-tampão” da madeira ou do tronco é em princípio maior do que a das folhas, em termos de concentração de nutrientes. O CUB representaria assim um valor integrado do estado nutricional da floresta de eucalipto e, por extensão, da fertilidade do solo na qual ela se encontra.

De facto, os valores de CUB correlacionam-se melhor do que a concentração foliar com os teores disponíveis de nutrientes no solo, com a excepção de N, indicando que, provavelmente, para povoamentos adultos, o CUB seja um melhor indicador do estado nutricional do que a concentração foliar (Figuras 20, 21, 22 e 23).



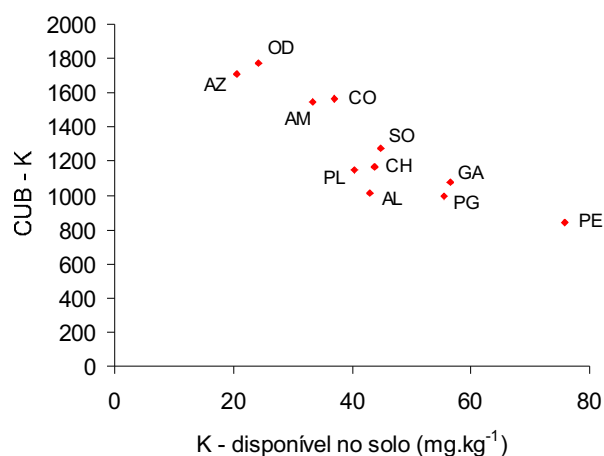
Local: AL – Alandroal; AM – Amarante; AZ – Azambuja; CH – Chamusca; CO – Coimbra; GA – Gavião; OD – Odemira; PE – Penamacor; PG – Pegões; PL – Póvoa Lanhoso; SO – Serra d’ Ossa

Figura 20. Relação entre o **fósforo** disponível no solo pelo Mehlich 3 (profundidade 0 a 40 cm) e **CUB de P** para o tronco (madeira + casca), em 11 povoamentos adultos de *E. globulus* de diferentes regiões de Portugal.



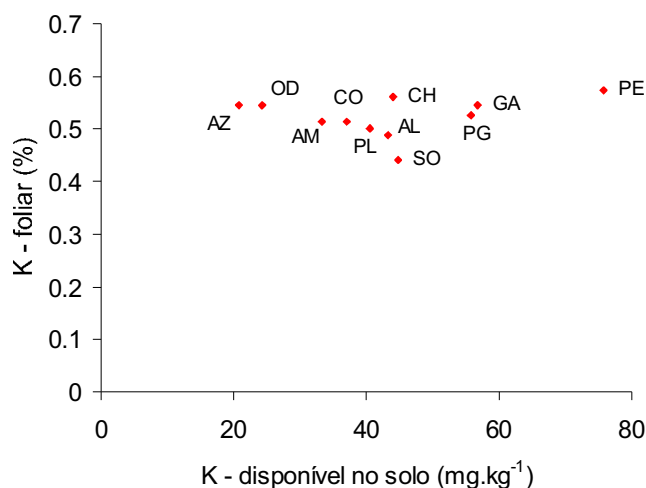
Local: AL – Alandroal; AM – Amarante; AZ – Azambuja; CH – Chamusca; CO – Coimbra; GA – Gavião; OD – Odemira; PE – Penamacor; PG – Pegões; PL – Póvoa Lanhoso; SO – Serra d’ Ossa

Figura 21. Relação entre o **fósforo** disponível no solo pelo Mehlich 3 (profundidade 0 a 40 cm) e **concentração foliar de P**, em 11 povoamentos adultos de *E. globulus* de diferentes regiões de Portugal.



Local: AL – Alandroal; AM – Amarante; AZ – Azambuja; CH – Chamusca; CO – Coimbra; GA – Gavião; OD – Odemira; PE – Penamacor; PG – Pegões; PL – Póvoa Lanhoso; SO – Serra d’ Ossa

Figura 22. Relação entre o **potássio** disponível no solo pelo Mehlich (profundidade 0 a 40 cm) e **CUB de K** para o tronco (madeira + casca), em 11 povoamentos adultos de *E. globulus* de diferentes regiões de Portugal.



Local: AL – Alandroal; AM – Amarante; AZ – Azambuja; CH – Chamusca; CO – Coimbra; GA – Gavião; OD – Odemira; PE – Penamacor; PG – Pegões; PL – Póvoa Lanhoso; SO – Serra d’ Ossa

Figura 23. Relação entre o **potássio** disponível no solo pelo Mehlich 3 (profundidade 0 a 40 cm) e **concentração foliar de K**, em 11 povoamentos adultos de *E. globulus* de diferentes regiões de Portugal.

É pressuposto que exista um valor ou uma faixa de CUB crítico, acima da qual há limitação ao crescimento das plantas pela deficiência nutricional e abaixo da qual há baixa eficiência de utilização do nutriente, causada por um “consumo de luxo”. Na realidade, esta baixa eficiência de utilização do nutriente pode estar associada a baixas produtividades em razão da restrição ao crescimento por outros factores limitantes (e.g. défice hídrico, baixa disponibilidade de outro nutriente, interacção entre nutrientes, compactação e pequena profundidade efectiva do solo). Pode ocorrer também baixa eficiência de utilização de um dado nutriente em condições de produtividade mais elevada, desde que haja alta disponibilidade deste no solo, embora isto seja atenuado pelo efeito de diluição do nutriente na biomassa.

Assim, o CUB como indicador do estado nutricional da planta e, por extensão, da fertilidade de solo, é-o em termos relativos. Quer isto significar que o estado nutricional da planta e/ou o nível da fertilidade do solo, indicados pelo CUB, são dependentes dos outros factores de produção, principalmente da água disponível para as plantas. Dito de outra forma, a avaliação do estado nutricional dos povoamentos, por meio do CUB, parece reflectir, para além do nível dos nutrientes no solo, o nível dos outros factores de produção presentes no ambiente.

Sugerem-se em primeira aproximação, os seguintes intervalos médios de referência para os coeficientes de utilização biológica (CUB) de nutrientes para povoamentos de *E. globulus* em Portugal: 900 - 1400 para N; 3700 - 6000 para P; 600 - 1000 para K; 400 - 800 para Ca e 1600 - 3000 para Mg. Estes valores referem-se ao CUB de tronco (razão entre a produção de madeira com casca e os conteúdos de nutrientes nela armazenados).

4. Exportação de nutrientes e sustentabilidade da produtividade florestal

Tem sido demonstrado que há um estreito relacionamento entre as taxas de crescimento do eucalipto e a acumulação de nutrientes na sua biomassa (Fabres *et al.*, 1987; Barros e Novais, 1996). Assim, em plantações de eucalipto de elevada produtividade, a exportação de nutrientes pela retirada de madeira com casca pode atingir cerca de 800 kg de N, 40 kg de P, 550 kg de K, 600 de Ca e 60 kg de Mg (Gonçalves *et al.*, 1997). Em média, a madeira, que representa cerca de 70 % do peso seco da biomassa, acumula aproximadamente 50 % do conteúdo total de P, K e S e cerca de 25 % de N, Ca e Mg (Brañas *et al.*, 2000; Cortez, 1996). A casca, que constitui cerca de 11 % da biomassa, acumula em média 45 % de Ca, 30 % de Mg e 20 % de N, P e K (Gonçalves *et al.*, 1997; Cortez, 1996; Brañas *et al.*, 2000). Assim, a sustentabilidade da produtividade florestal ao longo das sucessivas rotações dependerá fundamentalmente da reserva lábil de nutrientes no solo e da intensidade de retirada de biomassa. Neste sentido, a quantificação da exportação de nutrientes, via exploração florestal, e o conhecimento do capital de nutrientes do solo permitiria gerir as plantações florestais de modo a avaliar a necessidade de reposição dos nutrientes extraídos do sistema.

Por um lado, o conhecimento da curva de absorção de nutrientes permite prever as necessidades nutricionais do eucalipto ao longo do seu ciclo de crescimento. Por outro lado, a quantificação da exportação de nutrientes, via exploração florestal, permite conhecer o impacto desta sobre o capital de nutrientes do solo. A integração destas informações e o conhecimento da disponibilidade de nutrientes no solo permite gerir as plantações florestais de modo a efectuar a reposição de nutrientes extraídos do

sistema e, assim, assegurar a sustentabilidade da produtividade florestal ao longo das sucessivas rotações ou ciclos de crescimento.

Embora a extracção de nutrientes pela cultura do eucalipto seja relativamente pequena quando comparada com a da maioria das culturas agrícolas, a absorção e acumulação de nutrientes na biomassa de povoamentos de eucalipto pode ser significativa, nomeadamente nos locais de elevada produtividade (Fabres *et al.*, 1987; Novais *et al.*, 1990; Gonçalves *et al.*, 1997). Como referência para Portugal, estudos desenvolvidos no RAIZ (Fabres *et al.*, 2001) indicam as seguintes necessidades de nutrientes por hectare, num ciclo de 12 anos (árvore total), respectivamente para uma produtividade de madeira com casca de 10 e 20 m³.ha⁻¹.ano⁻¹:

Azoto – 290 e 400 kg/ha
Potássio – 140 e 220 kg/ha
Magnésio – 45 e 70 kg/ha

Fósforo – 25 e 40 kg/ha
Cálcio – 280 e 450 kg/ha
Boro – 1,0 e 1,3 kg/ha

Ainda, este mesmo estudo mostrou que a distribuição média da produção de biomassa entre os diferentes componentes aéreos da árvore foi de 75, 9, 5, 5 e 6% para madeira, casca, ramos, raminhos e folhas, respectivamente. Os conteúdos totais dos nutrientes armazenados na biomassa dos diferentes povoamentos foram influenciados pela produtividade florestal e pelo nível de fertilidade do solo, sendo tanto maiores quanto maiores estes factores. Em relação ao total acumulado na biomassa, os conteúdos médios de azoto, fósforo e potássio armazenados na madeira (sem casca) foram de 41, 62 e 45%, respectivamente. Enquanto que 46% do cálcio está armazenado na casca e apenas 21% na madeira. Assim, as duas opções de exploração florestal – extracção somente da madeira ou da madeira com casca – têm impactos bastante diferentes sobre o capital de nutrientes do ecossistema. O conteúdo total de nutrientes existentes na biomassa bem como a sua distribuição entre os diversos componentes da árvore, variaram muito entre locais, reflectindo as diferentes taxas de crescimento dos povoamentos, conforme tem sido referido por outros autores (Barros & Novais, 1996). Não obstante, este efeito não se explica unicamente pelas diferenças de produtividade, havendo uma influência significativa da fertilidade do solo sobre os níveis internos de nutrientes na planta e, assim, sobre a quantidade acumulada na biomassa. Este fenómeno foi bem caracterizado por Bielecki (1973) e referido por outros autores (Chapin *et al.*, 1982; Fabres, 1987b; Barros e Novais, 1996; Gonçalves *et al.*, 1997).

O balanço de nutrientes indica que o fósforo e, provavelmente, o azoto são os elementos mais limitantes à produtividade florestal, em praticamente todos os locais estudados, confirmando a evidência empírica de maiores respostas às adubações em ensaios conduzidos pelo RAIZ. A sustentabilidade da produtividade florestal ao longo de sucessivas rotações, calculada pela simulação de uma série de balanços de nutrientes consecutivos para seis rotações, seria afectada pela seguinte ordem de limitação nutricional: $P \geq N > K > Ca > Mg$, caso não se efectuassem fertilizações de reposição para a generalidade dos casos estudados.

Agradecimentos

O autor agradece ao professor doutor João Coutinho da UTAD, ao eng.º José Rafael e à dr.ª Helena Barrocas pela colaboração e discussões sempre enriquecedoras. À eng.ª agrónoma Clara Lemos e às eng.ªs florestais Daniela Ferreira, Maria do Céu Martins, Sofia Lavoura e Tânia Onofre, cuja ajuda foi imprescindível para a concretização deste trabalho. Ao doutor Nuno Borralho, director do Centro de Investigação Florestal do RAIZ, pelas discussões científicas e constante incentivo e apoio.

Referências bibliográficas

- Alvarez V., 1996. Correlação e calibração de métodos de análise de solos. In: O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. V. H. Alvarez V, L. E. Fontes e M.P. Fontes (Eds); S.B.C.S; U.F.V, Viçosa, MG, pp: 615 – 646.
- Amaral, G., 1999. Influência de características químicas e físicas de cinco diferentes solos da zona metalúrgica mineira na produtividade de eucalipto. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – 109 pp (Tese M.Sc.).
- Azevedo, A., 2000. Estudo da dinâmica do azoto e do carbono em plantações florestais intensivas. Tese de Doutorado, 296p, ISA – UTL, Lisboa.
- Barber, S.A., 1995. Soil Nutrient Bioavailability. A mechanistic approach. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Barrocas, H.M.; Fabres, A.S., 2003. Relação entre concentração de nutrientes no solo e produtividade de *E. globulus* Labill nas regiões Centro e Norte de Portugal. RAIZ, Portugal.
- Barros, N. F.; Neves, J. C. L. e Novais, R. F., 2000. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: Nutrição e fertilização florestal. J. L. Gonçalves e V. Benedetti (Eds); IPEF, Piracicaba, SP, pp; 269 – 286.
- Barros, N. F. e Novais, R. F., 1996. Eucalypt nutrition and fertiliser regime in Brazil. In: Nutrition of Eucalyptus P. M. Attiwill e M. A. Adams (Eds); CSIRO, Austrália, pp: 335 - 355.
- Barros, N.F.; Novais, R.F.; Carmo, D.N. e Neves, J.C.L., 1986. Classificação nutricional de sítios florestais – Descrição de uma metodologia. Revista Árvore, **10** (1): 112 – 120.
- Barros, N. F., 1974. Contribuição ao relacionamento de características pedológicas e topográficas com culturas de Eucalyptus na região Santa Bárbara – Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 89 pp. (Tese M. Sc.)
- Bennett, L. T.; Weston, C. J.; Judd, T. S.; Attiwill, P. M. e Whiteman, P. H., 1996. The effects of fertilizers on early growth and foliar nutrient concentrations of three plantation eucalyptus on high quality sites in Gippsland, Southeastern Australia. Forest Ecology and Management, **89**, 213 – 226.
- Bieleski, R. L., 1973. Phosphate pools, phosphate transport and phosphate availability. Ann. Rev. Plant Physiol., Palo Alto, **24** – pp 225 – 252.
- Braga, F. A.; Barros, N. F.; Sousa, A. L. e Costa, L. M. (1999) Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucaliptos. R. Bras. Ci. Solo, **23**: 291-298.
- Brañas, J.; González-Rio, F. & Merino, A. 2000. Contenido y distribución de nutrientes en plantaciones de Eucalyptus globulus del noroeste de la Península Ibérica. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. **9**(2): 317-335.
- Buckley, G. P., 1988. Soil factors influencing yields of Eucalyptus camaldulensis on former tin-mining land in the Josplateau region, Nigéria. Forest Ecology and Management, **23**: 1-17.
- Chapin, F. S.; Follett, J. M. e O'Connor, K. F., 1982. Growth, phosphate absorption, and phosphorus chemical fractions in two chionochloa species (III). J. Ecol., London, **70**: pp 305 – 321.
- Cortez, N.R.S., 1996. Compartimentos e ciclos de nutrientes em plantações de *Eucalyptus globulus* Labill. ssp. *globulus* e *Pinus pinaster* Aiton, UTL Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 289 pp. (Tese Ph.D.).
- Coutinho, J., Bento, J e Vale, R., 2001. Efeito da aplicação de Boro em povoamentos de Eucalyptus globulus no Norte e Centro de Portugal - Relatório do triénio 1997-1999. Projecto de Investigação aplicada do CEDR - UTAD, SOPORCEL e BORAX, Vila Real.
- Fabres, A. S., Rafael, J.M.L, Borralho, N., 2002. Nutriglobus 2002 – Sistema de recomendação de fertilização para *E. globulus*. RAIZ, Portugal.
- Fabres, A. S.; Barrocas, H.M.; Ferreira, D. & Lavoura, S., 2001. Exportação e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto em 11 regiões edafo-climáticas de Portugal. Relatório técnico – RAIZ, 48p.
- Fabres, A. S.; Barros, N. F. e Novais, R. F., 1987. Produtividade e exportação de nutrientes em eucaliptos e identificação de sítios visando o manejo de solo e o manejo florestal em áreas da CENIBRA. Relatório anual 86/87 (convénio SIF/CNB – F), UFV, Viçosa, MG, 142 pp.
- Fabres, A. S., Novais, R.F., Neves, J.C.L, Barros, N.F., Cordeiro, A.T., 1987b. Níveis críticos de diferentes frações de fósforo em plantas de alface cultivadas em diferentes solos. R. Bras. Ci. Solo, **11**:51-57, Campinas, Brasil.
- FAO, 1998. World reference base for soil resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Soil Resources Reports, 84. FAO, ISRIC & ISSS.
- Fernández, J.Q.P.,(1996). Produção de *Eucalyptus camaldulensis* influenciada por fontes, doses e localização de fertilizantes fosfatados. Departamento de solos, centro de ciências agrárias, Universidade Federal de Viçosa, Brasil, 39 pg.
- Gonçalves, J. L. M.; Stape, J. L.; Benedetti, V.; Fessel, V. A. G. e Gava, J. L., 2000. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: Nutrição e fertilização florestal. J. L. Gonçalves e V. Benedetti (Eds); IPEF, Piracicaba, SP, pp; 1 – 57.
- Gonçalves, J.L.M; Barros, N. F.; Nambiar, E. K. S. e Novais, R. F., 1997. Soil and stand management for short – rotation plantations In: Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forest. E. K. Sadanandan Nambiar, Alan G. Brown (Eds) CSIRO Canberra Australia, pp 379 – 417.
- Gonçalves, J. L. M., 1995. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da mata atlântica. Documentos Florestais, 15, ESALQ, USP, Piracicaba, SP, pp: 1-23.

- Gonçalves, J.L.M.; Barros, N.F.; Neves, J.C.L. & Novais, R.F., 1986. Níveis críticos de fósforo no solo e na parte aérea de eucalipto na presença e ausência de calagem. *Revista Árvore* **10**: 91–104.
- Grove, T. S.; Thomson, B. D e Malajczuk, N., 1996. Nutritional physiology of eucalypts: uptake, distribution and utilization. In: *Nutrition of Eucalyptus*, Attiwill, P., M. e Adams, M., A. (Eds) CSIRO, Austrália – pp: 77–108.
- Ismael, J.J.; Valeri, S.V.; Corradini, L; Alvarenga, S.F.; Valle, C.F.; Ferreira, M.E. & Banzatto, D.A., 1998. Níveis críticos de fósforo no solo e nas folhas para implantação de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, em quatro tipos de solos. *Scientia Florestalis*, 54: 29–40.
- Judd, T.S.; Attiwill, P.M. & Adams, M.A. 1996. Nutrient concentrations in Eucalyptus: A synthesis in relation to differences between taxa, sites and components. In: Attiwill, P. M. e Adams, M.A. (Eds) *Nutrition of Eucalyptus* p: 123–153, CSIRO, Austrália.
- Kriedemann, P.E. & Cromer, R.N., 1996. The nutritional physiology of the Eucalypts – Nutrition and Growth. In: Attiwill, P.M. e Adams, M.A. (Eds) *Nutrition of Eucalyptus*. p: 109–121 CSIRO, Austrália.
- Lima, W. P., 1993. Impacto ambiental do eucalipto. 2ª ed., Universidade de São Paulo, 301 pp.
- Lopes, A. S. e Abreu, C. A., 2000. Micronutrientes na agricultura brasileira: evolução histórica e futura. In: *Tópicos em ciência do solo*, Vol 1, R. F. Novais; V. H. Alvarez V. e C. E. G. R. Schaefer (Eds); SBCS, Viçosa, MG, pp: 265–298.
- LQARS, 2000. Manual de fertilização das culturas. INIA, Laboratório Químico agrícola Rebelo da Silva (Eds), Lisboa, 221 pp.
- Malavolta, E., 1976. Manual de química agrícola. 2ed., Agronômica Ceres (Eds), SP, 528 pp.
- Marschner, H., 1986. Mineral nutrition of higher plants, Academic Press, New York, 674 pp.
- Nambiar, E.K.S.; Brown, A.G., 1997. Towards Sustained Productivity of Tropical Plantations: Science and Practice in Management of Soil Nutrients and water in Tropical Plantation Forests. CSIRO Australia. 527-559.
- Noble, A. D., Donkin, M., J. e Smith , 1991. The importance of soil properties as indicators of site quality for Eucalyptus grandis on the Zululand coastal plain. Proc. IUFRO Symposium – Intensive Forestry: the Role of Eucalypts. Durban, South Africa, Vol.1: 433 - 443.
- Novais, R. F.; Barros, N. F. e Neves, J. C. L., 1986. Interpretação de análise química do solo para o crescimento de *Eucalyptus* spp – níveis críticos de implantação e de manutenção. *Revista Árvore* **10** (1); pp: 105–111.
- Novais, R.; Smyth, T., (1999). *Fósforo em Solo e planta em condições tropicais*. Universidade Federal de Viçosa, Brasil, 123-164 pg.
- Novais, R.F.; Barros, N.F. e Neves, J.C.L., 1990. Nutrição mineral do Eucalipto. In: *Relação Solo-Eucalipto*. Barros, N.F. e Novais, R.F. (Eds), VV, Viçosa, Brasil, p:25-98.
- O'Carrol, C. e Farrel, E. P., 1993. Relationships between soil characteristics and yield for Norway spruce on fen peat in central Ireland. *Forest Ecology and Managment*, **57**: 61-70.
- Ochôa, P.; Pereira, H. e Sardinha, R., 1986. Biomass and nutrient content of *Eucalyptus globulus* LABILL. stands in different locations of Portugal. ISA, Lisboa.
- Pacheco, C.A.; Tomé, M. & Tomé, J., 2000. Gestão integrada da utilização da água e nutrientes do solo por *E. globulus*. Apresentação dos resultados dos projectos PAMAF IED nº 8038 e PRAXIS/3/3.2/FLOR/2115/95, RAIZ, 16 de Novembro de 2000.
- Rafael, J.; Fabres, A.S., 2002. Fertilização de povoamentos de eucalipto em Portugal. Guia de boas práticas culturais. RAIZ, Portugal
- Rafael, J.; Lemos, L. e Ramalho, R., 2000. National map of the “Regions of Boron deficiency risk for *Eucalyptus* sp in Portugal”. International Symposium, Managing Forest Soils for Sustainable Productivity, 18-22 Setembro, Vila Real, Portugal
- Raij, B. V., 1983. Avaliação da fertilidade do solo. Instituto da Potassa & Fosfato/Instituto Internacional da Potassa, 142 pp.
- Rojas, J. C.; Allen, H. L.; Li, B. e Wright, J., 2000. Clone and environmental effects for growth and foliar nutrient concentrations in the eucalypt urograndis hybrid.
- Silva, D. J., 1986. Necessidade de calagem e diferentes relações Ca:Mg para a produção de mudas de eucalipto. Tese de Mestrado, UFV, Viçosa, MG, 53. pp.
- Silveira, R.L.V.A.; Higashi, E.N.; Sgarbi, F. & Muniz, M.R.A., 2001. Seja doutor do seu eucalipto. Arquivo do Agrônomo, 12:1 – 31, POTAFOS, Piracicaba, Brasil.
- Steenberg, F. e Jakobsen, S. T. (1963) Plant nutrition and yield curves. *Soil Science* **95**, 69-88.
- Weston, C. J.; Attiwill, P. M. e Cameron, J. N., 1991. Growth of eucalypt plantations in relation to soil type and former land use in Gippsland, Victoria. Proc. IUFRO Symposium-Intensive Forestry: the Role of Eucalypts. Durban, South Africa, Vol.1: 480 – 491.