

## Balanço de Carbono no Eucaliptal – Comparação entre o Fluxo Turbulento de CO<sub>2</sub> e a Estimativa do Modelo CO2FIX V3.1

A.P. Correia<sup>1</sup>; J.S. Pereira<sup>1</sup>, G. Pita<sup>2</sup>, M. Carneiro<sup>1</sup>, C. Nogueira<sup>1</sup>, J. Silva<sup>2</sup>, A. Rodrigues<sup>3</sup>, A. Fabião<sup>1</sup>, M. Madeira<sup>1</sup>, J. Banza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, 1349-018 LISBOA.

<sup>2</sup>Instituto Superior Técnico, Depto. de Engenharia Mecânica, Av. Rovisco Pais, 1049-001 LISBOA

<sup>3</sup>Estação Florestal Nacional, Depto. de Silvicultura e Produtos Florestais, Quinta do Marquês, 2780-159 OEIRAS

### Introdução

A ratificação do Protocolo de Quioto pela Rússia em Fevereiro de 2005, encerrou um período de incerteza quanto à concretização de um dos mais importantes compromissos internacionais de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e potencialmente mitigar as consequências negativas das alterações climáticas. No seio da comunidade europeia, o acordo de partilha determinou para Portugal uma permissão de aumentar em 27% as suas emissões de GEE no 1º período de cumprimento de 2008-2012 em comparação com as emissões verificadas em 1990. Este valor já foi porém ultrapassado tendo-se registando um aumento na ordem dos 36.4% em 2001 (C.C.E. 2003). Se bem que o esforço de redução de GEE deva ser efectuado, em primeira instância, à custa da redução das emissões por parte do sector da indústria, energia e transportes que são os principais emissores de GEE, outras oportunidades de controlar as emissões deverão ser estudadas como por exemplo a maximização do serviço de sumidouro de carbono das florestas.

Os artigos 3.3, 3.4, 6 e 12 do Protocolo de Quioto referem especificamente a possibilidade de contabilizar o crescimento das florestas no balanço líquido nacional de GEE através de acções de florestação, reflorestação e aflorestação e ainda de gestão florestal e do solo. Ao abrigo dos mecanismos de *Implementação Conjunta e Desenvolvimento Limpo* (Artigo 26, nº3), o conjunto das acções elegíveis deverão ser implementados em áreas geográficas específicas (*Projectos Florestais*), onde seja possível medir, monitorizar e verificar as emissões/remoções de GEE antes e após a implementação da acção (*Critério da Adicionalidade*). Estas áreas são passíveis de gerar créditos de carbono, isto é, unidades adicionais de carbono sequestrado reconhecidos como activos financeiros no *Mercado Europeu de Direitos de Emissão*. Os projectos de investimento em novas áreas florestais ou na gestão de áreas existentes em 1990 no âmbito do Protocolo de Quioto, surgem como uma oportunidade de valorização económica da propriedade florestal em alternativa à tradicional exploração lenhosa.

A capacidade de sequestro de carbono pela floresta é a quantidade de CO<sub>2</sub> que é fixado pela vegetação e que pode ser acumulado a longo prazo no ecossistema (biomassa perene, matéria orgânica do solo). A quantidade de CO<sub>2</sub> fixado pelas plantas através da fotossíntese (Produtividade Primária Bruta - PPB), descontando a respiração das plantas (Respiração Autotrófica- Ra), é a Produtividade Primária Líquida (PPL). Se subtrairmos a respiração dos organismos heterotróficos (Respiração Heterotrófica - Rh), que na floresta é representada essencialmente pelos microrganismos do solo<sup>1</sup>, obtemos a Produtividade Líquida do Ecossistema (PLE), que representa o balanço anual de carbono do ecossistema.

---

<sup>1</sup> Respiração total do solo (Rt)= Ra+Rh

Algumas áreas florestais, nomeadamente eucaliptais, podem ser consideradas florestas de Quioto por terem sido plantadas após 1990 e se entretanto não forem sujeitas a corte no 1º período de cumprimento do protocolo de Quioto. O estudo das melhores alternativas de gestão do povoamento (por exemplo, a decisão de não cortar no 1º período de cumprimento) requer uma análise do custo de oportunidade para avaliar se a remuneração obtida em ganhos adicionais de carbono pelo projecto é superior ao rendimento obtido com a exploração lenhosa. Para obter capacidade predictiva é necessário utilizar modelos, devendo estes ser devidamente validados para a espécie e condição ecológica em questão. Para tal é necessário medir continuamente o povoamento, parametrizar os modelos disponíveis com os dados actuais, comparar as estimativas obtidas e finalmente estudar os vários cenários de alteração possíveis.

Este estudo teve como principal objectivo investigar a possibilidade de utilizar o modelo CO2FIX V3 na quantificação dos *stocks* e fluxos de carbono numa plantação de *Eucalyptus globulus* através da comparação das estimativas da PLE obtidas pela parametrização do modelo e pelas medições de fluxo turbulento de CO<sub>2</sub> obtido pelo método das flutuações instantâneas, da respiração do solo e dados de inventário.

## Metodologia

Os dados recolhidos no campo integram parte de um estudo denominado “Balanço de carbono em florestas de eucalipto em Portugal – o problema das florestas de Quioto” (POCTI/CTA/35626/99). As medições decorreram num povoamento de eucalipto de segunda rotação de 300 ha com 9 anos, instalado na Herdade da Espirra em Pegões (Lat. 38° 38′ N, Long. 8° 36′ W) com uma densidade de 1100 árv./ha. A precipitação anual média é de 709 mm e a temperatura média de 15.9 °C. Os fluxos de CO<sub>2</sub> foram medidos com um anemómetro sónico 3D em conjunto com um analisador de sistema aberto CS7500 Li-acor instalados numa torre de 40 m. A respiração do solo, temperatura e humidade foram medidos a cada 3 semanas com uma câmara de solo PP-Systems em 80 amostras. Todas as árvores de uma parcela seleccionada para o estudo, foram caracterizadas dendrometricamente (altura total e diâmetro) e durante 2 anos consecutivos (2002 e 2003). Um conjunto de equações alométricas previamente calibradas para a espécie e condição ecológica (Fabião 1986), foram utilizadas para determinação do incremento de biomassa total. Para a quantificação da biomassa de raízes considerou-se uma razão *root/shoot* de 3.01 constante (Fabião 1986). O carbono do solo, quer nos horizontes minerais e orgânicos, foi medido em um dos anos de estudo. Foi ainda instalado um sistema de recolha de folhada de periodicidade quinzenal. Ao conjunto da informação recolhida no campo denominar-se-á *doravante* método do inventário.

O modelo CO2FIX V3 pode ser descarregado gratuitamente da internet ([www.efi.fi/projects/casfor](http://www.efi.fi/projects/casfor)) (Masera et al. 2003, Schelhas et al. 2004). Fundamenta-se no ciclo de carbono e integra o crescimento anual das espécies florestais, das componentes da biomassa, incluindo também a dinâmica da decomposição da matéria orgânica e a componente dos produtos florestais. É constituído por 2 módulos fundamentais: a) O *Módulo da Biomassa*, que permite quantificar o armazenamento de carbono nas diversas componentes da árvores (tronco, ramos, folhas e raízes) tendo em conta a mortalidade e competição, estimado a partir do incremento em volume do tronco (derivado de tabelas de produção convencionais para a espécie) e de factores de expansão da biomassa nas diferentes idades; b) O *Módulo do Solo*, que permite quantificar o carbono que entra e sai anualmente no sistema através das taxas de decomposição da matéria orgânica do solo. O modelo apresenta ainda um módulo de

*Produtos Florestais* e ainda, na sua actual versão, um módulo de *Bioenergia*, um *Financeiro* e ainda outro de *Quantificação de créditos de carbono*. Estes módulos não foram considerados neste estudo.

Os principais parâmetros utilizados no modelo apresentam-se na tabela 1.

**Tabela 1** – Principais parâmetros utilizados no modelo.

Parâmetro	Valor	Ref.
Factor de conversão de biomassa em carbono (tC/t m.s.)	0.5	(Watson et al. 2000)
Acréscimos Médios Anuais do tronco e crescimentos relativos	Modelo Globulus 2.1 e (Cairns et al. 1997) para o crescimento das raízes	(Tomé et al. 2001)
Densidade Básica da madeira (t m.s./m <sup>3</sup> )	0.53	(Pereira et al. 1994)
Taxas de <i>Turnover</i>	Folhas	(Pereira et al. 1994)
	Ramos	(Masera et al. 2003)
	Raízes	(Bond-Lamberty et al. 2004)
Carbono inicial (t/ha) (Biomassa +Solo)	66.9	

O modelo calcula, numa base anual, os *stocks* e os fluxos de carbono de, e para a atmosfera, por categoria de reservatório e compartimento da biomassa. Para comparar as estimativas obtidas pelo modelo com os dados reais medidos no campo, calcularam-se os fluxos PPL, Rh e PLE obtidos pelo modelo aos 9 anos tendo-se admitido que:

- 1) A PPL corresponde ao somatório do incremento de carbono anual devido ao crescimento de todas as componentes da biomassa (tronco, ramos, folhas e raízes) e da fracção de folhas, ramos e raízes que morreu nesse ano (*turnover*).
- 2) A Rh corresponde às perdas de carbono do solo devido à decomposição nos diferentes compartimentos de matéria orgânica do solo.
- 3) A PLE é igual à diferença entre a PPL e a Rh.

Note-se que nesta estimativa da PLE, a fracção correspondente à vegetação do subcoberto é considerada negligenciável devido à praticamente inexistente representação herbácea e arbustiva no subcoberto do povoamento.

## Resultados

Comparando os resultados da produtividade obtidos com o modelo com outros estudos independentes, verificou-se que a estimativa da produtividade do eucaliptal expressa em Acréscimos Médios Anuais (AMA) até aos 9 anos foi de 13.9 m<sup>3</sup>/ha/ano comparando-se com os valores de produtividade médios obtidos pelo modelo Globulus 2.1 (Tomé et al. 2001) para a região Sul Litoral (revolução de 12 anos com uma densidade de 1250 árv./ha) na classe média e alta (valores entre 12.0 e 20.2 m<sup>3</sup>/ha/ano). A estimativa do incremento de biomassa total médio até aos 9 anos (9,6 tC/ha/ano) encontra-se dentro da gama de valores obtida por Madeira et al. 2002 num ensaio de fertilização-irrigação realizado na região de Óbidos para a mesma espécie (valores entre 9 e 16,2 tC/ha/ano).

O modelo permite quantificar os fluxos de carbono no solo pelas taxas de decomposição do material orgânico nos diversos compartimentos do solo, através da parametrização da quantidade de biomassa que cai anualmente no solo, das propriedades físicas/químicas desse material e das condições ambientais (nomeadamente temperatura e humidade). A estimativa do incremento de carbono no solo dada pelo modelo ao final dos 9 anos foi de 0.3 tC/ha/ano. Não existe informação disponível medida no terreno para este caso de estudo, que permita validar o valor obtido. Porém, Madeira et al. 2002 num estudo realizado na região de Óbidos para a mesma espécie refere um incremento de carbono no solo entre 0.3 e 1 tC/ha/ano.

### *Produtividade Primária Líquida*

Os resultados obtidos aos 9 anos pelos dois métodos indicam que a simulação da PPL obtida pelo modelo (12 tC/ha/ano), é muito semelhante à obtida pelo método do inventário (13.6 tC/ha/ano). Esta diferença de 1.6 tC/ha/ano pode ser explicada por 2 factores: a) O maior incremento de biomassa de raízes pelo método do inventário em comparação com o modelo. No método do inventário assumiu-se uma proporção raiz/parte aérea constante para todas as idades, enquanto que no modelo utilizou-se uma equação de estimação da biomassa de raízes calibrado para florestas temperadas e variável com a biomassa acima do solo e idade (Cairns *et al.*, 1997). Não é possível porém, com a disponibilidade de dados existente, verificar qual dos métodos é o mais correcto. b) A fracção correspondente a folhada (*turnover* de folhas e ramos) quantificada no terreno foi duas vezes superior à estimada pelo modelo ao 9º ano (1.7 tC/ha ano pelo método do inventário contra 0.6 tC/ha/ano estimada pelo modelo). A elevada incerteza associada à taxa de *turnover* de ramos poderá explicar parte desta diferença.

Note-se que o modelo permite efectuar uma estimativa da PPL mais correcta, uma vez que entra também em consideração com a fracção de *turnover* associada às raízes, o que não acontece pelo método do inventário. Sem esta fracção, a PPL seria de 10.1 tC/ha/ano.

### *Respiração do solo*

Não foi possível comparar directamente o valor de Respiração total (Rt) medido no solo com as estimativas do modelo, uma vez que o modelo não quantifica esta variável. Foi possível porém, efectuar uma comparação da Rh obtida pelo modelo CO2FIX V3 (5.6 tC/ha/ano) com uma estimativa da Rh calculada a partir da Rt medida no terreno utilizando um modelo global (Bond-Lamberty et al. 2004)<sup>2</sup>. Os valores utilizados para calcular a Rh por este método foram recolhidos de Pereira et al. 2003 e de Fabião 1986 tendo-se obtido o valor de 4.7 tC/ha/ano. As estimativas obtidas pelos 2 modelos foram da mesma ordem de grandeza e com uma diferença de apenas 0.9 tC/ha/ano. Os 2 métodos estimam uma razão Rh/Rt média de 0.65, mas mais uma vez não existem dados reais medidos no terreno que permitam confirmar este valor. Bond-Lamberty et al. 2004, num artigo resumo de estudos que relacionam a Ra e Rh a nível global, refere razões Rh/Rt que variam entre 10 a 90%. Porém, vários estudos realizados em florestas temperadas (Andrews *et al.*, 1999, Edwards e Harris 1977, Epron *et al.*, 1999) referem razões Rh/Rt da mesma ordem de grandeza da obtida neste trabalho.

---

<sup>2</sup>  $Rh (gC/m^2/ano) = 253.49 + 0.61 * Detritus$  (sendo que *Detritus* = Folhada + NPP raízes finas)

## *Produtividade Líquida do Ecossistema*

A estimativa da PLE obtida pelo modelo CO2FIX V3 (6.5 tC/ha/ano) expressa pela diferença entre a PPL (12 tC/ha/ano) e a Rh (5.6 tC/ha/ano) foi bastante aproximada à obtida pelo método das flutuações instantâneas de 6.2 tC/ha/ano.

### **Conclusão**

O *Eucalyptus globulus* é uma espécie de crescimento rápido e a sua elevada produtividade confere-lhe a capacidade de sequestrar rapidamente carbono da atmosfera e armazená-lo nas suas estruturas vegetais. A PLE na Herdade da Espirra aproximou-se dos valores mais elevados reportados pela rede Carboeurope ([www.carboeurope.com](http://www.carboeurope.com)) para outras florestas da Europa. Valores elevados de PLE nas latitudes mais baixas parecem estar relacionados com uma combinação de factores (melhor balanço da radiação, aumento da estação de crescimento) que promovem uma maior produtividade vegetal. Todavia, no caso do eucalipto, o reduzido intervalo entre cortes (rotação), que implica alguma perda de carbono, associado ao curto tempo de vida do papel, reduzem o balanço de carbono no longo termo. Uma silvicultura apropriada, por exemplo, alterando a idade de corte, aplicando uma gestão apropriada dos resíduos de abate no final das rotações e no corte final, utilizando plantas melhoradas, poderão alterar esta tendência aumentando o tempo de residência do carbono nos reservatórios árvore e solo. Este estudo demonstra a grande intensidade de assimilação de carbono pelo eucalipto e sugere que é possível, através de um modelo simples e relativamente pouco exigente em dados, obter estimativas bastante aproximadas do balanço total no ecossistema. Salienta-se porém a necessidade de mais investigação sobre: 1) taxas de *turnover* para as diversas componentes da árvore, 2) incremento de carbono no solo e os efeitos da gestão nesta variável, 3) quantificação rigorosa dos sistemas radiculares e ainda, 4) estudos que permitam conhecer a fracção de Ra e Rh em relação à Rt.

### **Referências bibliográficas**

- Andrews, J.A., K.G. Harrison, R. Matamala, and W.H. Schlesinger. 1999. Separation of root respiration from total soil respiration using carbon-13 labeling during Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE). *Soil Science Society of America Journal* **63**: 1429-1435.
- Bond-Lamberty, B., C.K. Wang, and S.T. Gower. 2004. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biology* **10**: 1756-1766.
- C.C.E., C. d. C.E. 2003. Relatório da Comissão nos termos da Decisão 93/389/CEE do Conselho, com a redação que lhe foi dada pela Decisão 99/296/CE, relativa a um mecanismo de vigilância das emissões comunitárias de gases responsáveis pelo efeito de estufa. Pages 15. Comissão das Comunidades Europeias, Bruxelas.
- Cairns, M.A., S. Brown, E.H. Helmer, and G.A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* **111**: 1-11.
- Edwards, N.T., and W.F. Harris. 1977. Carbon Cycling in a Mixed Deciduous Forest Floor. *Ecology* **58**: 431-437.

- Epron, D., L. Farque, E. Lucot, and P.M. Badot. 1999. Soil CO<sub>2</sub> efflux in a beech forest: the contribution of root respiration. *Annals of Forest Science* **56**: 289-295.
- Fabião, A. 1986. Contribuição para o estudo da dinâmica da biomassa e da produtividade primária líquida em eucaliptais. Região Litoral do Centro de Portugal. Pages 206. Departamento de Engenharia Florestal - Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Madeira, M.V., A. Fabiao, J.S. Pereira, M.C. Araujo, and C. Ribeiro. 2002. Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations induced by different water and nutrient availability. *Forest Ecology and Management* **171**: 75-85.
- Masera, O.R., J.F. Garza-Caligaris, M. Kanninen, T. Karjalainen, J. Liski, G.J. Nabuurs, A. Pussinen, B.H.J. de Jong, and G.M.J. Mohren. 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO<sub>2</sub>FIX V.2 approach. *Ecological Modelling* **164**: 177-199.
- Pereira, J.S., M.V. Madeira, S. Linder, T. Ericsson, M. Tome, and M.C. Araujo. 1994. Biomass production with optimised nutrition in *Eucalyptus globulus* plantations. Pages 13-30 in J.S. Pereira and H. Pereira, eds. *Eucalyptus for biomass production. The state of the art.*, Lisboa.
- Pereira, J.S., G. Pita, M. Carneiro, C. Nogueira, J. Silva, A. Rodrigues, A. Fabião, M. Madeira, J. Banza, and E. Ribeiro. 2003. Full carbon balance in an eucalypt plantation in Portugal. in S. f. E. B. M. Meeting, ed, Southampton, UK.
- Schelhas, M.J., P.W. van Esch, T.A. Groen, B.H.J. Jong, M. Kanninen, J. Liski, M.O., G.M.J. Mohren, G.J. Nabuurs, T. Palosuo, L. Pedroni, A. Vallejo, and T. Vilén. 2004. CO<sub>2</sub>FIX V3.1 - description of a model for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems and wood products. ALTEIRA Report 1068, Wageningen, The Netherlands.
- Tomé, M., F. Ribeiro, and P. Soares. 2001. O modelo GLOBULUS 2.1. Pages 69. Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior de Agronomia, Departamento de Engenharia Florestal, Lisboa.
- Watson, R.T., N.R., B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo, and D.J. Dokken. 2000. Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.

[www.carboeurope.com](http://www.carboeurope.com).