

# Trinta anos de estudo sobre a qualidade do solo de sistemas florestais em condições mediterrâneas. Tendências e futuro

*Thirty years of research on soil quality in forest systems under Mediterranean conditions. Trends and future*

*Treinta años de estudios sobre la calidad del suelo de sistemas forestales en condiciones mediterráneas. Tendencias y futuro*

## AUTHOR

**Madeira M.**<sup>®</sup>  
mavmadeira@isa.  
ulisboa.pt

® Corresponding Author

Centro de Estudos  
Florestais, Instituto  
Superior de Agronomia,  
Universidade de Lisboa.  
Lisboa, Portugal.

Received: 28.11.2014 | Revised: 11.03.2015 | Accepted: 11.03.2015

## RESUMO

Apresenta-se uma síntese genérica dos estudos desenvolvidos em Portugal, desde o início da década de oitenta do século passado, quanto à avaliação da qualidade do solo no âmbito da actividade florestal de carácter intensivo. Esses estudos demonstraram que a degradação da qualidade do solo em tais sistemas está quase exclusivamente associada aos sistemas de gestão do solo e dos resíduos orgânicos (resíduos de abate e camadas orgânicas). Os resultados desses estudos, embora circunscritos apenas ao período de uma rotação, são de grande utilidade para identificar os sistemas de gestão do solo e de resíduos apropriados para assegurar a qualidade e os processos funcionais do solo e a produtividade dos sistemas florestais. No entanto, eles não abrangem a globalidade dos riscos e das ameaças de degradação do solo associados à actividade florestal à escala da unidade de terra. Por isso, é crucial desenvolver, por um lado, sistemas experimentais a longo prazo e de avaliação de riscos e, por outro, sistemas de monitorização e de controlo de processos gerais de degradação do solo (erosão, compactação, perda de nutrientes e de carbono orgânico) à escala da unidade de gestão e da exploração florestal.

## ABSTRACT

*This paper presents an overview of the studies carried out between the mid-1980s and 2014 in Portugal, regarding the evaluation of soil quality within intensively managed forest systems. These studies show that the degradation of soil quality in such systems is mostly associated with the land, soil and harvest residue management schemes. Also, it was concluded that experimental results showing the short-term (one rotation scale) effects are useful for identifying the most appropriate land and residue management systems for maintaining the soil quality and thus forestry productivity and sustainability. However, these studies do not take into account all the risks and threats regarding soil degradation within the forestry activity at the land unit scale. Therefore it is necessary, on one hand, to develop long term experimental and risk assessment systems and, on the other hand, to delineate and implement soil quality monitoring systems that control soil degradation (e.g. erosion, compaction, nutrient and carbon losses) at the forest unit management scale.*

DOI: 10.3232/SJSS.2015.V5.N2.01

## RESUMEN

*En este trabajo se presenta una síntesis genérica de los estudios de evaluación de la calidad del suelo en el ámbito de la actividad forestal de carácter intensivo, desarrollados en Portugal desde el inicio de la década de los ochenta del siglo pasado al año 2014. Estos estudios demostraron que la degradación de la calidad del suelo en tales sistemas está casi exclusivamente asociada a los sistemas de gestión del suelo y de los residuos orgánicos (residuos de corta y capas orgánicas). Los resultados de los estudios, aunque circunscritos apenas al período de una rotación, son de gran utilidad para identificar los sistemas más adecuados de gestión del suelo y de los residuos que aseguren la calidad y los procesos funcionales del suelo, productividad y sostenibilidad de los sistemas forestales. Sin embargo, no se han analizado todos los riesgos y amenazas de degradación del suelo asociados a la actividad forestal, a escala de la unidad de tierra. Por eso, es crucial desarrollar, por un lado, sistemas experimentales a largo plazo y de evaluación de riesgos y, por otro, sistemas de monitorización y de control de procesos generales de degradación del suelo (erosión, compactación, pérdida de nutrientes y de carbono orgánico) a escala de la unidad de gestión forestal.*

## 1. Introdução

Os estudos sobre a qualidade do solo de sistemas florestais em Portugal começaram a ter forte expressão em meados da década de oitenta do século passado –quando tomavam vulto as preocupações sobre os impactes negativos das plantações intensivas (eucalipto) nas características do solo (por exemplo, acidificação e perda de fertilidade)– e continuaram ininterruptamente até ao presente através da execução de inúmeros projectos em íntima associação com o sector de actividade florestal. Assim, inicialmente foram desenvolvidos reconhecimentos e estudos gerais para avaliação de indicadores físicos e químicos (e também biológicos) da qualidade do solo, bem como estudos de pedogénese experimental para comprovação da especificidade de resultados desses reconhecimentos. Com o mesmo objectivo foram realizados estudos detalhados respeitantes à caracterização do ciclo de nutrientes de plantações florestais e à dinâmica da decomposição de resíduos orgânicos da parte aérea e da componente subterrânea de espécies florestais representativas. A estes estudos de processos seguiram-se outros de maior abrangência e direccionados fundamentalmente para a identificação dos sistemas de gestão do solo e de resíduos orgânicos (resíduos de abate e camadas orgânicas) que fossem consentâneos com a compatibilização da qualidade dos solos dos sistemas florestais intensivos e extensivos e da respectiva produtividade e sustentabilidade. Estes estudos apresentam cada vez mais actualidade, sendo cruciais para a previsão dos efeitos de sistemas de silvicultura cada mais intensivos, com material genético de maior produtividade, com rotações cada vez mais curtas e com tendências para a remoção mais intensiva de biomassa (incluindo as touças) para efeitos de produção de bioenergia.

Os sistemas experimentais de gestão foram realizados à escala da parcela experimental em condições completamente controladas e na ausência de muitas das problemáticas que ocorrem à escala da unidade de gestão florestal. Nestas circunstâncias, afigura-se que a análise dos resultados e das conclusões obtidos à escala da unidade gestão e da exploração florestal é de suma importância para identificar e solucionar a multiplicidade de desafios de gestão associados aos processos de degradação do solo, à qualidade ambiental e à sustentabilidade da actividade florestal.

**PALAVRAS-CHAVE**  
Eucaliptos, carbono, nutrientes, produtividade, gestão de resíduos orgânicos, riscos de degradação do solo

**KEYWORDS**  
Eucalypts, carbon, nutrients, productivity, organic residue management, soil degradation risks

**PALABRAS CLAVE**  
Eucaliptos, carbono, nutrientes, productividad, gestión de residuos orgánicos, riesgos de degradación del suelo

## 2. A espécie florestal e a qualidade do solo

As primeiras avaliações das características do solo de plantações de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) instaladas a partir dos anos cinquenta, comparativamente a sistemas florestais pouco perturbados (floresta aberta de *Quercus suber* L. e plantações de *Pinus pinaster* Ait.), permitiram identificar uma forte tendência para a acidificação, associada ao decréscimo de catiões não ácidos e, naturalmente, ao acréscimo da concentração de alumínio de troca no solo (Madeira 1986, 1989). Nessas plantações também foram observadas modificações negativas respeitantes à massa volúmica, à estabilidade da agregação, à porosidade e à condutividade hidráulica do solo e à taxa de infiltração da água (Figura 1). Porém,

essas modificações nem sempre se mostraram claras e incontroversas; aliás, num estudo de campo, iniciado em meados da década de oitenta, também se observou que a preparação (tradicional) intensiva e profunda do solo para a instalação de plantações de eucalipto conduziu, no início da rotação, a acentuadas modificações de características do solo tais como: acréscimo da massa volúmica e da compactidade, decréscimo da condutividade hidráulica e forte depleção de catiões não ácidos (Madeira et al. 1989b); posteriormente verificou-se que essas modificações foram apenas parcialmente revertidas durante o período da rotação (Madeira et al. 2002).

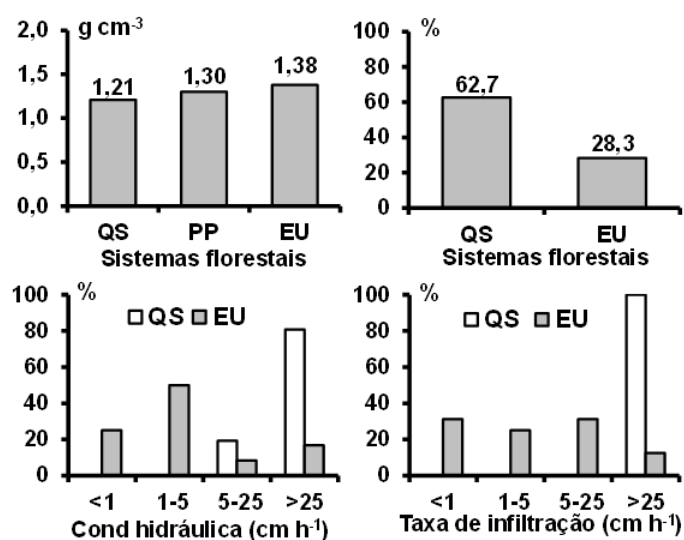


Figura 1. Indicadores físicos da qualidade do solo de plantações de eucalipto comparados com os observados em sistemas florestais de referência. QS: *Q. suber*; PP: *P. pinaster*; EU: *E. globulus* (2ª rotação).

Tornou-se evidente que as práticas de instalação (as responsáveis por acentuada perturbação do solo) e de gestão das plantações florestais poderiam ser grandemente responsáveis por fortes modificações nas características dos solos das mesmas. Assim, as modificações até então observadas nos solos das plantações de eucalipto não poderiam ser imputadas

exclusivamente à espécie, pois não havia informação sobre as características iniciais do solo e sobre as técnicas de instalação e de condução das plantações (Madeira and Fabião 2012). Acrescenta-se ainda o facto de não ser conhecido o historial do uso da terra anterior à instalação das plantações e a possível influência da especificidade dos sítios em que os estudos

### 3. O uso e a depleção de nutrientes nas plantações

decorreram. De facto, muitas plantações florestais ocuparam antigas áreas agrícolas afectas às culturas cerealíferas tradicionais (Costa et al. 2014).

Para esclarecer de forma inequívoca as causas de algumas das modificações referidas quanto a indicadores químicos (nomeadamente o pH e a concentração de cationes não ácidos) da qualidade do solo, foi desenvolvido durante um período de 10 anos um estudo de pedogénese experimental (Madeira 1986) para avaliar a influência de resíduos orgânicos (folhada) de diferentes espécies florestais (*Q. suber*, *P. pinaster* e *E. globulus*) nas características químicas de um substrato mineral (arenito do Cretácico). Este estudo levou à conclusão de que os resíduos de *E. globulus* podem ser responsáveis por valores de pH (reação neutra) e da concentração de cationes não ácidos no solo muito mais favoráveis do que os obtidos com os resíduos das outras espécies consideradas, nomeadamente o *Q. suber* (Madeira and Ribeiro 1995); estes resultados foram então atribuídos, por um lado, à elevada concentração de elementos não ácidos (mormente cálcio) nos resíduos de eucalipto e, por outro, à fraca taxa de nitrificação líquida nos resíduos de eucalipto (comparativamente à observada para os resíduos de *Q. suber*), como se comprovou posteriormente à escala das plantações (Gómez-Rey et al. 2010). Este padrão, em oposição ao observado nos solos das plantações em produção, mostrou inequivocamente que a avaliação da influência de uma espécie florestal na qualidade do solo tem de ser *obrigatoriamente considerada no âmbito do ecossistema*, ou seja no âmbito do sistema e das respectivas práticas de gestão e das especificidade das condições ecológicas dos respectivos sítios.

Para o devido entendimento de resultados obtidos em plantações de várias rotações também foram desenvolvidos estudos aprofundados sobre os ciclos (compartimentos e fluxos) de nutrientes em plantações intensivas de eucalipto –assim como noutros sistemas florestais (*P. pinaster* e *Q. suber*)– para suporte da avaliação dos potenciais efeitos da diferente intensidade da exploração florestal (remoção do tronco comercial ou da totalidade da biomassa) na qualidade do solo, bem como para suporte ao desenvolvimento de estratégias de gestão dos resíduos dessa exploração, nomeadamente para o uso na produção de bioenergia. Tais estudos foram desenvolvidos numa área tipicamente Mediterrânea do Sul de Portugal (Pegões) com uma precipitação média anual da ordem de 650 mm (clima subhúmido seco) e cujos solos (Regossolos dístricos), desenvolvidos sobre arenitos com baixa reserva em cationes não ácidos, se consideraram sensíveis à remoção de biomassa e de nutrientes. Ficou demonstrado, como era de esperar, que o funcionamento dos sistemas florestais intensivos se diferencia dos demais por apresentar balanços anuais de nutrientes negativos (com maior expressão no caso do cálcio), dado que o fluxo da transferência do solo para a biomassa é muito superior às devoluções (folhada, gotejo e translocação). Este padrão associa-se à rápida transferência de grandes quantidades de nutrientes do solo e que se acumulam na biomassa (Madeira and Fabião 2012), com modificações a curto prazo na concentração de cationes não ácidos de troca e na reação do solo (Madeira et al. 2012) e que estão dependentes da quantidade de nutrientes no compartimento solo. No entanto, ficou também demonstrado que a intensidade da expressão dessas modificações está intimamente associada à natureza do material originário do solo, ou seja, à sua reserva em cationes não ácidos; assim, consoante a variabilidade das características dos sítios que ocorre nas condições mediterrâneas, esse padrão tanto pode aproximar-se ou afastar-se do relatado para as plantações florestais intensivas das áreas de clima tropical húmido. Aliás, as conclusões referidas devem ser consideradas na apreciação de resultados contraditórios

## 4. Concentração e natureza da matéria orgânica

obtidos em várias regiões da Península Ibérica. Em suma, a intensidade da remoção de biomassa (e possibilidade de uso dos resíduos de abate) das plantações florestais deverá ser equacionada no contexto da especificidade do “compartimento solo” (e do respectivo material originário) associada à quantidade de nutrientes disponíveis no solo e à capacidade de reposição dos mesmos (resiliência do sítio).

A concentração de matéria orgânica no solo das plantações de eucalipto evidenciou tendências contraditórias (Madeira and Fabião 2012), pois tanto se mostrou menor como maior do que nas áreas dos sistemas florestais de referência (Figura 2). O teor de matéria orgânica no solo das plantações de eucalipto também se evidenciou dependente da intensidade das perturbações do solo associadas às práticas de instalação das plantações (Madeira et al. 1989b), as quais se traduziram por acentuados decréscimos daquele teor.

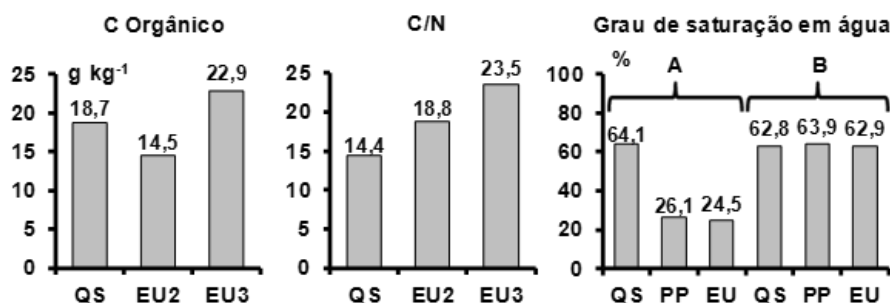


Figura 2. Teor de carbono orgânico e razão C/N, bem como proporção do preenchimento da porosidade do solo com água antes (A) ou após (B) tratamento com etanol, em solos de plantações de eucalipto comparativamente com outros sistemas florestais; QS: *Q. suber*; PP: *P. pinaster*; EU: *E. globulus* (2 e 3: 2ª e 3ª rotação, respectivamente)..

As características da matéria orgânica do solo das plantações de eucalipto (Quadro 1) mostraram uma clara diferenciação quanto à razão C/N e às características das fracções húmicas: menor teor de azoto e carácter alifático mais acentuado (Madeira 1986; Madeira et al. 1989a); estas diferenças mostraram-se muito mais acentuadas na fracção humina do que na dos ácidos húmicos. As características observadas para a matéria orgânica dos solos dessas plantações estão em linha com a acentuação do carácter hidrofóbico observada nos solos das mesmas. Com efeito, observou-se que a saturação com água (Figura 2) foi muito mais dificultada no solo das plantações de eucalipto do que no solo de áreas de referência com sobreiro.

O estudo de pedogénese experimental anteriormente mencionado (Madeira and Ribeiro 1995) também evidenciou que os resíduos das diferentes espécies florestais (em igual quantidade) não se diferenciaram quanto à acumulação de C orgânico no solo. Além disso, este estudo também revelou que a quantidade de C orgânico acumulado no solo foi muito reduzida relativamente à quantidade aplicada via resíduos (equivalente à folhada durante um período de 45 anos). Deste modo, o processo de acumulação de matéria orgânica no solo dos sistemas florestais devido aos resíduos da parte aérea é um processo bastante lento.

**Quadro 1.** Características gerais dos ácidos húmicos e da humina da matéria orgânica de solos sob *Quercus suber* (QS), *P. pinaster* (PP) e *Eucalipto* (EU). 2: 2ª rotação; 3: 3ª rotação

	Ácidos húmicos			Humina		
	N (%)	N/C	H/C	N (%)	N/C	H/C
<b>QS</b>	3,74	0,059	0,85	3,56	0,055	1,31
<b>PP</b>	3,27	0,052	0,95	2,71	0,039	1,36
<b>EU2</b>	3,28	0,051	0,94	2,22	0,033	1,43
<b>EU3</b>	3,18	0,049	0,79	2,03	0,031	1,45

Posteriormente, foi observado que a biomassa e a dinâmica das raízes (nomeadamente das muito fins e das finas) têm um rápido efeito na acumulação de carbono orgânico no solo (Katterer et al. 1995; Madeira et al. 2002) das plantações florestais, para a qual deverá contribuir a baixa taxa de decomposição das mesmas, a qual se mostrou muito mais baixa do que a determinada para os resíduos da parte aérea. Aliás, observou-se que a taxa de decomposição das raízes foi tanto mais baixa quanto menor o respectivo diâmetro; com efeito, após cerca de 3,5 anos, a taxa de decomposição

de raízes com diâmetro de 10 mm (0,25-0,30 yr<sup>-1</sup>) foi muito superior à observada para as de diâmetro inferior a 1 mm (0,11-0,13 yr<sup>-1</sup>) (Quadro 2; dados não publicados) –as que apresentavam teores iniciais de N e de lenhina mais elevados e menor razão C/N. Neste contexto, são indispensáveis estudos de longa duração sobre a produtividade e a decomposição da biomassa subterrânea (e sua protecção pela fracção mineral) para confirmar esta tendência e o seu papel no sequestro de carbono e na estabilidade e dinâmica da matéria orgânica no solo.

**Quadro 2.** Perda de peso de raízes muito finas (MF, Ø < 1mm), finas (FI, Ø: 1-2 mm), médias (ME, Ø: 2-5 mm) e grossas (GR, Ø: 5-10 mm) de *E. globulus* (EG) e de *P. pinaster* (PP), durante 1230 dias

Dias	EG				PP			
	MF	FI	ME	GR	MF	FI	ME	GR
<b>0</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<b>90</b>	98,70	96,99	98,39	92,80	97,65	94,59	90,34	85,93
<b>210</b>	95,74	91,50	93,81	88,82	97,37	92,46	81,34	75,10
<b>450</b>	86,52	80,66	80,21	70,93	91,13	84,40	78,72	65,92
<b>570</b>	84,25	79,21	76,41	53,68	88,01	82,74	72,12	58,59
<b>680</b>	80,43	75,41	71,35	52,61	80,03	76,32	68,85	53,93
<b>930</b>	70,15	67,39	63,47	50,34	77,24	70,53	63,69	42,63
<b>1050</b>	69,61	62,33	56,75	47,20	73,13	70,81	63,07	41,61
<b>1230</b>	63,30	61,02	58,63	45,54	73,86	72,03	60,02	39,62

Os resultados dos estudos mencionados sugerem que a proporção de carbono associada às raízes finas em decomposição e retida no solo poderá ser muito maior do que a associada à folhagem colocada na superfície ou incorporada no mesmo, como comprovam de modo inequívoco os resultados experimentais da dinâmica de resíduos (folhas e raízes) obtidos com solos de textura franco arenosa e arenosa (Figura 3; dados não publicados). Aliás, este

padrão indicia o papel determinante da biomassa radical na acumulação de carbono orgânico no solo de sistemas florestais (nomeadamente nos solos de textura mais fina) e está em linha com as diferenças mínimas do teor de carbono orgânico determinado no solo de plantações de eucalipto onde se tem comparado a remoção ou a manutenção da totalidade dos resíduos de abate (e das camadas orgânicas).

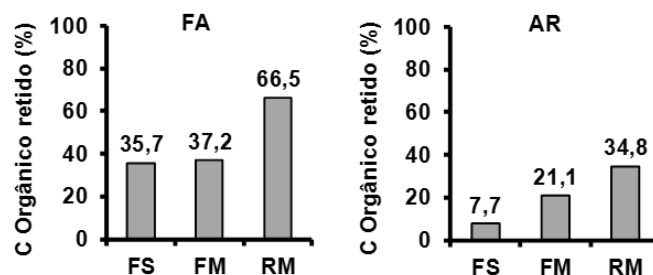


Figura 3. Proporção de C orgânico (de folhagem na superfície, FS, ou incorporada, FM) e de raízes finas ( $\varnothing < 2$  mm; RM) retido em substratos de textura franco arenosa (FA) e arenosa (A), após um período de cinco anos.

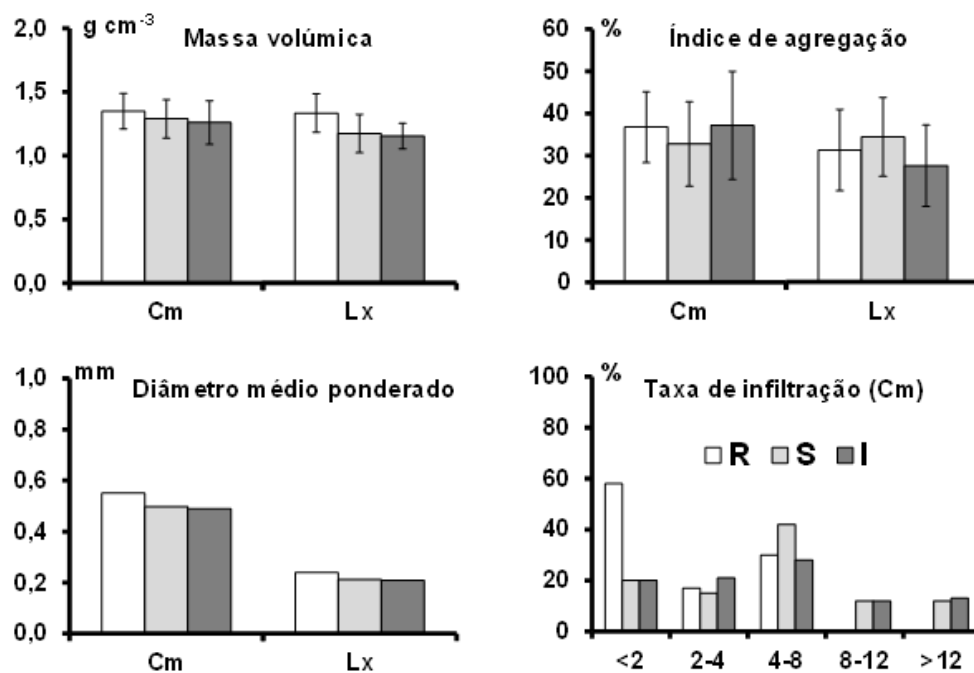
## 5. O sistema de gestão e qualidade do solo

O sistema intensivo tradicional de preparação do solo para instalação das plantações florestais pode conduzir, como se disse, a fortes modificações na qualidade do solo devido ao aumento da massa volúmica e à redução do “stock” de carbono orgânico e de cationes não ácidos (Madeira et al. 1989b); estas modificações, não recuperáveis no período de uma rotação, não se expressam necessariamente por redução da produtividade (Madeira et al. 2002). Daí emergiu a necessidade de identificar e avaliar de forma mais sistemática as consequências da preparação intensiva do solo na produtividade, na qualidade do solo e, em geral, na competitividade do sector florestal. A partir do início da década de noventa foi, então, dada forte ênfase às implicações da

gestão dos resíduos orgânicos (resíduos de abate e camadas orgânicas) na produtividade das plantações de eucalipto, bem como na quantidade e qualidade dos recursos disponíveis. Foram instalados vários sistemas experimentais na Península Ibérica (Jones et al. 1999) para avaliar, em condições ecológicas diferenciadas (quanto ao clima e ao solo), o efeito de opções extremas de gestão (remoção, manutenção na superfície e incorporação no solo) dos resíduos orgânicos em áreas objecto de replantação. Especificamente, os estudos decorreram em áreas de solos desenvolvidos sobre rochas sedimentares, uns pobres (Lixissolos) e outros considerados moderadamente providos em nutrientes (Cambissolos).

Observou-se que a produtividade e as condições de nutrição das plantações não foram significativamente afectadas pelos diferentes sistemas de gestão (Magalhães 2000), contrariando muitos dos resultados obtidos em várias regiões de clima quente e húmido, onde a remoção de resíduos de abate e das camadas orgânicas conduziu frequentemente ao decréscimo do crescimento e à afectação do estado de nutrição das árvores. Tal diferença atribui-se em grande parte à especificidade das condições ecológicas das áreas de clima tipo mediterrâneo, onde a produtividade das plantações florestais está mais fortemente dependente da disponibilidade hídrica do que da disponibilidade de nutrientes (Madeira et al. 2002).

A similitude foi também a regra quanto a várias características físicas do solo (Magalhães 2000), pois as diferentes opções de gestão dos resíduos de abate não conduziram a diferenças significativas no respeitante, por exemplo, à massa volúmica, ao índice de agregação e ao diâmetro médio ponderado dos agregados (Figura 4), até 10 cm de profundidade do horizonte superficial (textura franco arenosa) de Cambissolos e de Lixissolos. No entanto, as classes de menores valores da taxa de infiltração para a água foram muito mais frequentes nas áreas donde os resíduos orgânicos foram removidos, sugerindo que essa remoção afectou negativamente o sistema de porosidade das camadas superficiais do solo e as características da superfície do mesmo, criando condições para o aumento de escoamento superficial.

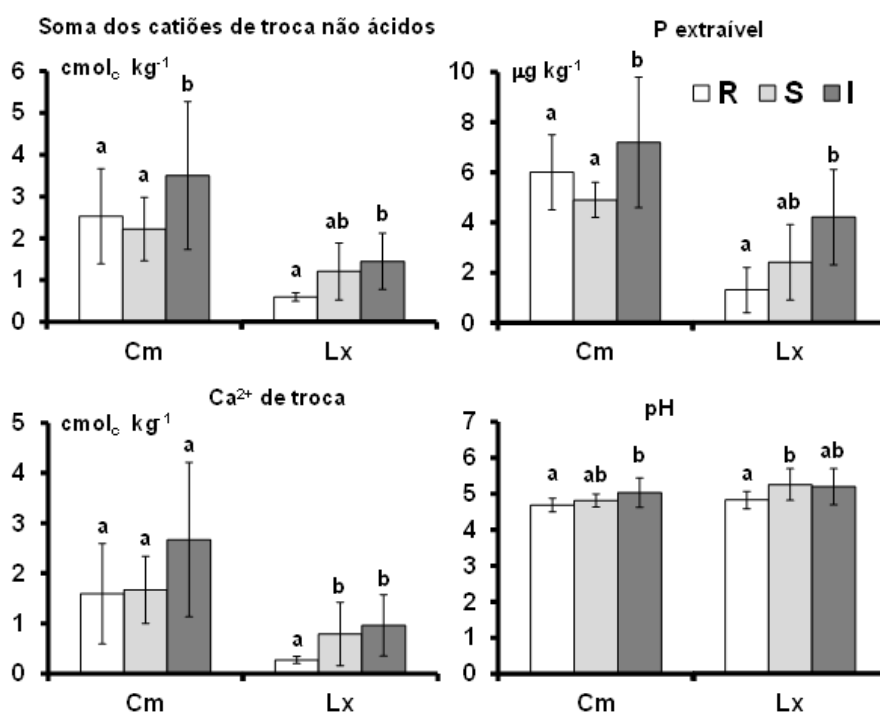


**Figura 4.** Indicadores físicos de solos (0-10 cm de profundidade) de plantações de eucalipto em que os resíduos orgânicos (resíduos de abate e camadas orgânicas) foram removidos (R); mantidos na superfície (S) ou incorporados (I) no solo; Cm: Cambissolo; Lx: Lixissolo. As barras indicam um desvio padrão.



Os diferentes cenários de gestão dos resíduos orgânicos afectaram diferentemente as características químicas do solo (Figura 5). De facto, os valores de pH foram afectados em qualquer dos solos considerados, atingindo os menores valores no sistema de remoção dos resíduos. A concentração de catiões não ácidos de troca (e de Al extraível) e de P extraível no Cambissolo foram mais favoráveis no caso da incorporação dos resíduos. Porém, a remoção dos resíduos orgânicos, não obstante o balanço de nutrientes negativo durante a rotação, não modificou significativamente estas características, pois os respectivos valores

foram semelhantes aos observados nos solos em que os resíduos foram mantidos na respectiva superfície. Mas, no caso do Lixissolo –o que apresentava menores concentrações de catiões não ácidos e de P extraível– verificou-se um acentuado decréscimo (significativo) destas concentrações no solo afectado pela remoção dos resíduos orgânicos. Este padrão sugere que o grau dos riscos de degradação associados á remoção dos resíduos orgânicos (nomeadamente a redução de disponibilidade e nutrientes) está associado às características intrínsecas do solo e, portanto, à especificidade dos sítios.



**Figura 5.** Indicadores químicos de solos de plantações de eucalipto, em que os resíduos orgânicos (resíduos de abate e camadas orgânicas) foram removidos (R); mantidos na superfície (S) ou incorporados (I) no solo; Cm: Cambissolo; Lx: Lixissolo. As barras representam um desvio padrão e letras diferentes para o mesmo solo indicam diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tuckey.

Os diferentes cenários de gestão dos resíduos orgânicos também não implicaram diferenças significativas na mineralização potencial de N; esta caracterizou-se por um forte predomínio de

$\text{NH}_4^+$  relativamente ao  $\text{NO}_3^-$  (Gómez-Rey et al. 2010; Madeira and Fabião 2012), o qual, ainda assim, se mostrou dependente das condições ecológicas do sítios. No entanto, foi observado

que a lixiviação de N pode ser fortemente reduzida pela incorporação dos resíduos de abate ou pela presença de vegetação herbácea (Gómez-Rey et al. 2007; Gómez-Rey et al. 2008) durante os primeiros anos após o abate das plantações de *E. globulus*. Tais resultados sugerem que os diferentes cenários de gestão dos resíduos orgânicos terão grande influência na retenção do azoto no solo, na fase inicial das replantações, quando a absorção pelas árvores é ainda limitada.

Os diferentes sistemas de gestão dos resíduos orgânicos (resíduos de abate e camadas orgânicas) também não influenciaram significativamente a quantidade de carbono orgânico no sistema. No final da primeira rotação, a quantidade de carbono nas camadas orgânicas e minerais do solo era da mesma ordem de grandeza nos diferentes tratamentos (Figura 6), sugerindo que o sistema apresentou resiliência suficiente para minimizar o efeito da remoção dos resíduos orgânicos pelo menos durante o período de uma rotação; por isso, é crucial necessário conhecer tal efeito para períodos muito mais longos. Este padrão sugere que o carbono existente nos resíduos orgânicos foi na sua maior parte devolvido para a atmosfera, estando em linha com os resultados obtidos experimentalmente num sistema lisimétrico (Gómez-Rey et al. 2007), em que a remoção ou adição de elevadas quantidades de resíduos orgânicos se mostraram insuficientes para

provocar variações de vulto na concentração de carbono orgânico no solo. Assim, os resíduos de abate poderão ser utilizados na produção de energia, desde que o sítio, como anteriormente se sublinhou, apresente a suficiente resiliência à remoção de nutrientes; porém, são necessários estudos de longa duração para suportar tal generalização.

Relatou-se que a densidade da população total de artrópodes (ou do número de indivíduos por unidade de massa) do solo foi de menor vulto nas plantações intensivas do que nas áreas florestais de referência e menos perturbadas (Serralheiro and Madeira 1990, 1994). Mas, foram pequenas as diferenças devidas aos diferentes sistemas de gestão dos resíduos orgânicos no respeitante à quantidade e à diversidade da mesofauna do solo (Seabra-Ferreira et al. 2001), sendo, porém, mais importantes as diferenças sazonais do que as associadas aos diferentes tratamentos considerados. Os resultados observados para a mesofauna estão em linha com a similitude da massa das camadas orgânicas (Madeira et al. 2012) e da vegetação sob coberto (Fabião et al. 2007) relatada para os diferentes sistemas de resíduos orgânicos. Tendência semelhante foi observada para a taxa de colonização micorrízica ou para os carpóforos micorrízicos nas plantações dos diferentes sistemas de gestão de resíduos (Marchante et al. 2001).

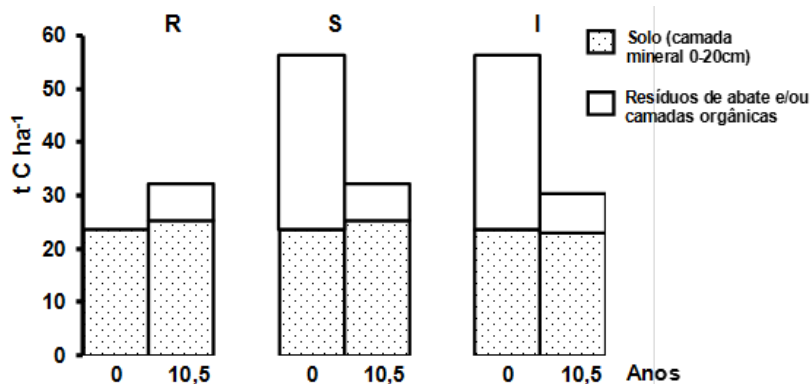


Figura 6. Quantidade de C orgânico nas camadas orgânicas e minerais do solo, no final da rotação, em áreas em que os resíduos de abate foram removidos (R), mantidos na superfície (S) ou incorporados no solo (I) (Madeira et al. 2007).

## 6. Os estudos e a escala da exploração florestal

Os resultados dos diferentes cenários de gestão dos resíduos de abate referidos sobre a qualidade do solo de sistemas florestais intensivos não podem ser considerados em definitivo, pois eles representam tendências observadas a curto prazo, dado apenas expressarem a resposta do sistema no final da primeira rotação após a replantação. De facto, não se pode afirmar com segurança se a resposta no final da segunda ou terceira rotação será da mesma índole. Assim é imprescindível o suporte de estudos de longo prazo para obter indicações mais seguras e consistentes quanto às consequências dos diferentes cenários de gestão de resíduos na qualidade do solo. Nesses estudos terão de ser também equacionadas as influências devidas à remoção (e às perturbação a ela associadas) dos cepos (touças), prática hoje em dia generalizada com vista ao incremento de produção de bioenergia.

Os diferentes sistemas de gestão dos resíduos de abate foram aplicados em parcelas (e em sítios) com o mesmo tipo de solo e em que a morfologia do terreno era o mais homogénea possível e em geral aplanada, de modo a reunir as condições para a melhor expressão possível do efeito específico daqueles sistemas. Os sistemas experimentais foram conduzidos na observância de todas as boas regras de gestão florestal; além disso, nas operações de exploração não foi utilizada qualquer maquinaria pesada. Deste modo, a representatividade dos resultados obtidos é assaz insuficiente para abarcar alguns dos problemas (por exemplo, as perturbações respeitantes à instalação das plantações e à exploração florestal) associados à gestão corrente das plantações florestais exploradas intensivamente.

De facto, as plantações florestais são muitas vezes instaladas em áreas com grande heterogeneidade quanto ao tipo de solo e em terrenos com relevo muitas vezes ondulado a muito ondulado, em condições de declive que constituem fortes riscos para a perda de solo por erosão e para a ocorrência de movimentos de massa. Em tais circunstâncias, as perturbações do solo devidas às práticas de exploração florestal, nomeadamente com recurso a maquinaria pesada, e as perturbações decorrentes das

práticas de replantação ou instalação constituem um factor acrescido para potenciar os efeitos negativos na perda de solo e de nutrientes e na compactação do mesmo (qualidade do solo). Além disso, a grande intensidade das perturbações do solo associadas à gestão dessas plantações pode conduzir a perdas substanciais de carbono orgânico. Finalmente, as infra-estruturas da exploração florestal (nomeadamente caminhos florestais) podem também constituir riscos adicionais para a degradação do solo à escala da unidade de gestão.

Os diferentes estudos realizados apontam para medidas gerais de gestão a observar para salvaguardar a qualidade do solo nos sistemas florestais intensivos. Porém, a realidade à escala da unidade de gestão da exploração florestal e do espaço florestal é muito mais complexa no contexto das ameaças de degradação do solo. Isto é, a protecção da qualidade do solo e de outros recursos tem de estar presente nas estratégias e medidas de gestão e ordenamento do espaço florestal nas suas diferentes escalas. Deste modo a intensidade dos sistemas de gestão com vista à sustentabilidade dos sistemas florestais intensivos deve ser compatível com a capacidade ecológica dos sítios, com a salvaguarda da qualidade do solo e da água (e outros valores ambientais) e, obviamente, com os benefícios económicos e sociais. Neste contexto, os planos de ordenamento e de gestão florestal devem contemplar a avaliação da natureza e intensidade dos riscos de degradação do solo de forma a identificar as apropriadas medidas e práticas de gestão, as quais devem ser objecto da devida avaliação. É imprescindível considerar com especial atenção as práticas de gestão do solo (mormente as inerentes à instalação das plantações) e as operações de exploração de modo a evitar que as mesmas conduzam à degradação das características físicas, químicas e biológicas do solo e a modificações dos processos funcionais do solo e, portanto, à afectação da sustentabilidade de sistemas florestais intensivos. Assim, os efeitos das diferentes práticas de instalação e de exploração das plantações na qualidade do solo deverão ser objecto de adequados sistemas de monitorização à escala da unidade de gestão florestal.

## 7. Considerações finais

Os efeitos do tipo e da intensidade de gestão dos sistemas florestais intensivos na qualidade do solo estão estreitamente associados às condições ecológicas dos sítios, sendo as características do solo e do respectivo material originário decisivas para essa análise. As plantações florestais reduzem a qualidade do solo? A resposta é simultaneamente sim e não; se por um lado a gestão intensiva pode criar condições negativas no solo, por outro pode manter e melhorar a qualidade do mesmo. Os sistemas de gestão e a intensidade de exploração de sistemas florestais intensivos deverão ser planificados em função da especificidade das características dos sítios: relevo (declive), tipo de solos e potencial produtivo. É crucial conhecer a biomassa subterrânea (incluindo o cepo e as raízes estruturais) das plantações florestais, bem como a avaliação da sua contribuição para o balanço do carbono e de nutrientes no solo, para fundamentar opções de gestão que incluam a remoção total ou parcial do cepo e das raízes estruturais. A avaliação dos sistemas de gestão florestal na qualidade do solo deve abranger longos períodos e incluir a monitorização de processos de degradação, mormente a perda de carbono e de solo (erosão), à escala da exploração florestal.

## BIBLIOGRAFÍA

- Costa A, Madeira M, Lima Santos J. 2014. Is cork oak (*Quercus suber* L.) woodland loss driven by eucalypts plantation? A case-study in southwestern Portugal. *iForest* 7:193-203.
- Fabião A, Carneiro M, Lousã M, Madeira M. 2007. Os impactes do eucaliptal na biodiversidade da vegetação sob coberto. In: Monteiro Alves A, Santos Pereira J, Silva JMN, editores. *O Eucaliptal em Portugal. Impactes Ambientais e Investigação Científica*. Lisboa: ISAPress. p. 177-206.
- Gómez-Rey MX, Madeira M, Gonzalez-Prieto SJ, Coutinho J. 2010. Soil C and N dynamics within a precipitation gradient in Mediterranean eucalypt plantations. *Plant and Soil* 336(1):157-171.
- Gómez-Rey MX, Madeira M, Vasconcelos E. 2008. Effects of organic residue management and legume cover on growth of pine seedlings, nutrient leaching and soil properties. *Annals of Forest Science* 65(8):807 (11 p).
- Gómez-Rey MX, Vasconcelos E, Madeira M. 2007. Lysimetric study of eucalypt residue management effects on N leaching and mineralization. *Annals of Forest Science* 64(7):699-706.
- Jones HE, Madeira M, Herraes L, Dighton J, Fabião A, Gonzalez-Rio F, Fernandez-Marcos M, Gómez C, Tomé M, Feith H, Magalhães MC, Howson G. 1999. The effect of organic-matter management on the productivity of *Eucalyptus globulus* stands in Spain and Portugal: tree growth and harvest residue decomposition in relation to site and treatment. *Forest Ecology and Management* 122(1-2):73-86.
- Kätterer T, Fabião A, Madeira M, Ribeiro C, Steen E. 1995. Fine-root dynamics, soil moisture and soil carbon content in a *Eucalyptus globulus* plantation under different irrigation and fertilization regimes. *Forest Ecology and Management* 74(1-3):1-12.
- Madeira M. 1986. Influência dos Povoamentos de Eucalipto (*E. globulus* Labill.) no Solo, Comparativamente aos Povoamentos de sobreiro (*Q. suber* L.) e de Pinheiro (*P. pinaster* Ait.). Tese de doutoramento. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.
- Madeira M. 1989. Changes in soil properties under *Eucalyptus* plantations in Portugal. In: Santos Pereira J, Landsberg JJ, editors. *Biomass Production by Fast-Growing Trees*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. p. 81-99. (ISBN: 0-7923-0208-7).
- Madeira M, Andreux F, Portal JM. 1989a. Changes in soil organic matter characteristics due to reforestation with *Eucalyptus globulus* Labill. *Science of the Total Environment* 81/82:481-488.

- Madeira M, Azevedo A, Soares P, Tomé M, Araújo MC. 2002. Efeitos da lavoura profunda e da gradagem nas características do solo e na produtividade de plantações de *Eucalyptus globulus*. Revista de Ciências Agrárias 25(1-2):158-169.
- Madeira M, Cortez N, Azevedo A, Magalhães MC, Ribeiro C, Fabião A. 2007. As plantações de eucalipto e o solo. In: Monteiro Alves A, Santos Pereira J, Silva JMN, editors. O Eucalipto em Portugal. Impactes Ambientais e Investigação Científica. Lisboa: ISAPress. p. 137-174.
- Madeira M, Fabião A. 2012. Implicações da remoção da biomassa florestal residual nas características do solo e na sustentabilidade da produção. Relatório efectuado no âmbito do protocolo entre a Altri Florestal, o ISA e a ADISA com vista à avaliação técnico-científica de impactes de sistemas de gestão e exploração florestal. Lisboa: ADISA, ISA/CEF.
- Madeira M, Fabião A, Carneiro M. 2012. Do harrowing and fertilisation at middle rotation improve tree growth and site quality in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations in Mediterranean conditions? European Journal of Forest Research 131(3):583-596.
- Madeira M, Fabião A, Pereira JS, Araújo MC, Ribeiro C. 2002. Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations induced by different water and nutrient availability. Forest Ecology and Management 171(1-2):75-85.
- Madeira M, Melo G, Alexandre C, Steen E. 1989b. Effects of deep ploughing and superficial disc harrowing on physical and chemical soil properties and biomass in a new plantation of *Eucalyptus globulus*. Soil Tillage Research 14(2):163-175.
- Madeira M, Ribeiro C. 1995. Influence of leaf litter type on the chemical evolution of a soil parent material (sandstone). Biogeochemistry 29(1):43-58.
- Magalhães MC. 2000. Efeito de técnicas de preparação do solo e gestão dos resíduos orgânicos em características físico-químicas do solo de plantações florestais. Dissertação de Doutoramento. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.
- Marchante E, Madeira M, Freitas H. 2001. Avaliação da colonização ectomicorrízica em plantações experimentais. Revista de Ciências Agrárias 24(3-4):205-212.
- Seabra-Ferreira C, Vasconcelos TM, Madeira M. 2001. Estudo das comunidades de artrópodes edáficos de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labill.). Revista de Ciências Agrárias 24(3-4):257-270.
- Serralheiro F, Madeira M. 1990. Changes in arthropod soil fauna due to afforestation with *Eucalyptus globulus* Labill. Agrochemistry and Soil Science 39(3-4):602-606.
- Serralheiro F, Madeira M. 1994. Soil mesofauna of *Eucalyptus globulus* plantation in Portugal in comparison to native vegetation stands. In: Santos Pereira J, Pereira H, editors. Eucalyptus for Biomass Production. The State-of-the-Art. Brussels: Commission of the European Communities. p. 262-279.