

EFEITO DA CINZA DE BIOMASSA NA DINÂMICA DO C E N DO SOLO DE UMA PLANTAÇÃO DE *PINUS PINASTER*

WOOD ASH EFFECTS ON C AND N DYNAMICS OF A SOIL FROM A *PINUS PINASTER* PLANTATION

Maria Xesús Gómez-Rey¹, Manuel Madeira¹, João Coutinho², Ernesto Vasconcelos³

RESUMO

Estudou-se, através de incubação aeróbia, o efeito da aplicação de cinza de biomassa florestal nas características químicas e na actividade microbiana de um *Arenossolo* de um povoamento de *Pinus pinaster* Ait. As doses de cinza aplicadas foram de 0, 4, e 8 g kg⁻¹ solo, sob forma pulverulenta ou peletizada, e na presença ou ausência de fertilizante azotado. A aplicação de cinza sob forma pulverulenta aumentou rápida e significativamente os valores de pH e os teores de bases de troca e de P extraível do solo. A nitrificação líquida foi igualmente estimulada. A quantidade de C microbiano nos solos com cinza pulverulenta foi inferior ao controlo, não sendo observados efeitos significativos para a respiração basal do solo. O quociente metabólico foi superior na fase inicial da incubação. Os efeitos observados foram, em geral, tanto mais intensos quanto maior a dose de cinza aplicada e mais acentuados na presença de N. A cinza apli-

cada sob forma peletizada não produziu um efeito tão acentuado nas características do solo nem na elevação da alcalinidade, determinando uma fraca influência na dinâmica de C e na produção de nitrato. Em sistemas como o estudado a aplicação de cinza sob forma peletizada é preferível, ao originar um efeito mais prolongado da sua acção, devendo ser acompanhada de fertilizantes azotados para aumentar a disponibilidade de N no solo.

Palavras-chave: Cinza pulverulenta, cinza peletizada, biomassa microbiana, mineralização de N, respiração basal.

ABSTRACT

Effects of wood ash (loose and pelleted) on chemical properties and microbial activity in an Arenosol from a *Pinus pinaster* plantation were assessed through laboratory incubation. Wood ash was applied at a rate of 0, 4 and 8 g kg⁻¹ soil both alone or together with N. Loose ash significantly increased pH values and extractable nutrients from the soil. Net nitrification was stimulated by its application. Amounts of microbial biomass C were lower in soils with loose ash than in the control. Basal respiration was not affected by treatments. Effects increased with the increment of applied ash and when applied together with N. Application of pelleted ash produced smaller changes in soil chemical characteristics, net nitrification and C dynamic. Results suggest that, in N limited soils, wood ash should be applied in the pelleted form because chan-

¹ Instituto Superior de Agronomia, Dpto. de Ciências do Ambiente, Tapada de Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal, Tel: +351213653264, Fax: +351213635031, e-mail: mxgomez@isa.utl.pt

² Centro de Química, Dpto. Biologia e Ambiente, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5001-911 Vila Real, Portugal.

³ Instituto Superior de Agronomia, Dpto. de Química Agrícola e Ambiental, Tapada de Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal.

ges in chemical soil properties are slower and the potential loss of N is much less as compared to the loose ash. Pelleted ash should be applied together with N fertilizer to improve soil N availability.

Key-words: basal respiration, microbial biomass, N mineralization, loose ash, pelleted ash.

INTRODUÇÃO

Em Portugal, a indústria de pasta para papel origina grandes quantidades de cinza de biomassa florestal através da combustão de resíduos de abate o que, aliado ao elevado custo que acarreta o seu armazenamento, tem levado a um crescente interesse na procura de alternativas para a sua utilização como fertilizante (Cortez *et al.*, 2001; Araújo *et al.*, 2004; Cabral *et al.*, 2008). Nos últimos anos, a utilização de biomassa para a obtenção de energia tem sido fortemente estimulada (MEI, 2005), prevendo-se um aumento da produção de cinza como resultado da construção de 15 novas centrais de biomassa florestal.

A composição elementar da cinza de biomassa florestal varia consoante as componentes vegetais combustadas, o uso de aditivos, a aplicação de pré-tratamentos, a tecnologia e a temperatura de combustão, bem como com o tempo e as condições de armazenamento (Etiegni & Campbell, 1991). Em geral, a cinza de biomassa caracteriza-se por possuir elevados teores de Ca, K e Mg e, em menor medida, de P (Demeyer *et al.*, 2001). A sua aplicação em solos ácidos, nomeadamente nos sistemas florestais, apresenta um grande interesse pelo seu carácter corrector da acidez e porque permite devolver ao sistema parte dos nutrientes extraídos pela remoção de biomassa, favorecendo assim a fertilidade de solo e a sustentabilidade dos ecossistemas florestais (Vance, 1996). Porém, a cinza de biomassa apresenta um forte carácter alcalino, podendo dar lugar a rápidas variações do pH do solo (Clapham &

Zibilske, 1992) e que podem ser prejudiciais para algumas plantas e microorganismos. Os efeitos decorrentes da aplicação de cinza dependem da forma como a mesma se apresenta (sob forma pulverulenta ou estabilizada) e que afecta a sua solubilidade (Vance, 1996). Assim, a estabilização da cinza antes da sua aplicação tem sido fortemente incentivada (Augusto *et al.*, 2008), dado esta ser menos reactiva e mais fácil de aplicar do que a cinza não estabilizada.

Apesar da cinza de biomassa florestal ser geralmente muito pobre em N (Demeyer *et al.*, 2001), as alterações que ocorrem no solo após a sua aplicação podem estimular a actividade biológica dos microorganismos do solo, influenciando desta forma a dinâmica do N e do C. Em solos florestais ricos em matéria orgânica do centro e norte de Europa tem sido observado que a sua aplicação conduz a um acréscimo da taxa de mineralização de N, com o risco da sua perda sob a forma de NO_3^- , N_2O ou N_2 através de processos de nitrificação e desnitrificação (Weber *et al.*, 1985). Por outro lado, a intensificação da actividade biológica, pode estimular a decomposição da matéria orgânica e com isso o fluxo de CO_2 para a atmosfera por respiração microbiana, afectando assim a dinâmica do C no solo (Fritze *et al.*, 1994; Zimmermann & Frey, 2002). No entanto, as alterações que a aplicação de cinza pode provocar na actividade microbiana do solo não foram avaliadas até o momento em condições mediterrânicas, como as prevalentes no centro e sul de Portugal, onde os solos se caracterizam por apresentarem baixo teor de matéria orgânica e de N disponível.

Assim, a anteceder a instalação de um sistema experimental de campo, desenvolveu-se um estudo, por intermédio de incubação em laboratório de um solo ácido representativo de plantações de *P. pinaster* em Portugal, com vista a avaliar o efeito da aplicação de cinza de biomassa florestal nas suas características químicas e na dinâmica do C e do N, comparando-se o efeito da cinza pulverulenta com o da cinza peletizada, na presença ou ausência de N.

MATERIAL E MÉTODOS

Materiais experimentais

O solo utilizado neste estudo corresponde ao horizonte Ah (0-20 cm) de um povoamento com 67 anos de idade de *Pinus pinaster* Ait. da Mata Nacional de Leiria (39° 45' N; 8° 56' W; 75 m), na região Centro-Litoral de Portugal. O solo era um Arenossolo distrito (WRB, 2006) desenvolvido sobre dunas costeiras, e apresentava uma textura arenosa e baixo pH (4,7 em H₂O e 3,5 em KCl). O solo foi crivado (< 2 mm) e guardado à temperatura de 5 °C, durante três dias, até ao início do processo de incubação. Foram tomadas cinco sub-amostras para a sua caracterização química. A soma de bases de troca era de 3,0 cmol_c kg⁻¹ e o teor em P e K extraíveis de 2,9 e 24,9 mg kg⁻¹, respectivamente. A concentração de C orgânico era de 22,1 g kg⁻¹ e a razão C/N era bastante elevada (39).

A cinza de biomassa florestal utilizada, tanto em forma pulverizada como peletizada, proveio da fábrica da Leirosa, Celulose Beira Industrial, S.A. (Figueira da Foz), que utiliza a casca de *Eucalyptus globulus* e licor negro (subproduto do cozimento de madeira), para produzir energia num sistema de co-geração. A cinza pulverulenta foi obtida como cinza seca (diâmetro < 0,5 mm). A sua peletização (diâmetro = 0,5 mm, comprimento: 5 mm) foi realizada pela AB Nordströms Konstruktionsbyrå (Suécia). As principais características indicam-se no Quadro 1.

Delineamento experimental

A 1 kg de solo (< 2 mm, peso fresco) foram aplicados 4 e 8 g (correspondentes a 6 e 12 t ha⁻¹ para uma espessura de 10 cm) de cinza

pulverulenta ou peletizada, na presença ou ausência de adubo azotado - 50 mg N kg⁻¹ na forma de (NH₄)₂SO₄. A dose de 4 g kg⁻¹ correspondia à necessidade de calcário do solo para atingir um pH de 6,5 (Gutián & Carballas, 1976) e o valor neutralizante médio das cinzas. Com a finalidade de evitar desequilíbrios na razão N/P foi aplicado 12 mg P kg⁻¹ (na forma Na₃PO₄ 12H₂O) de solo. Considerou-se ainda um tratamento controle em que não se aplicou cinza e fertilizante. Deste modo, foram considerados nove tratamentos, sendo cada um objecto de cinco repetições.

As amostras foram colocadas em sacos de polietileno e incubadas em laboratório em condições aeróbias, à temperatura de 25°C e a um teor de humidade equivalente a 60% da capacidade de campo, durante 180 dias. Uma vez por semana, os sacos foram abertos e arejados durante 15 minutos, e a perda de água foi corrigida pela adição de água destilada.

Metodologia laboratorial

O pH da cinza foi determinado numa suspensão cinza:água (razão 1:2,5). O C orgânico foi determinado por via húmida e o N total segundo o método de Kjeldahl. O Ca, Mg, K, Mn e P foram extraídos por digestão nitro-perclórica. O P foi quantificado por colorimetria, tendo os demais elementos sido determinados por espectrofotometria de absorção atómica (EAA). O valor neutralizante foi determinado por ebulição de 1 g de cinza com 50 mL de 0,5 M HCl, sendo o excesso de acidez analisado por titulação com NaOH 0,25 M.

As características químicas do solo foram avaliadas após 4, 15, 60 e 180 dias de incubação, seguindo as metodologias descritas em Póvoas & Barral (1992). O pH em água foi

Quadro 1 – Características das cinzas utilizadas no presente estudo (mg g⁻¹).

Cinza	pH	C	N	Ca	Mg	K	Mn	P	VN
Pulverulenta	12,9	16,5	0,08	103,4	23,94	32,15	7,58	4,74	80%
Peletizada	12,6	14,2	0,20	117,3	26,07	35,41	7,03	2,27	83%

VN: Valor neutralizante.

determinado numa suspensão de solo:H₂O (razão 1:2,5). O C orgânico foi determinado por vida húmida (De Leenheer & Van Hove, 1958) e o N total num sistema de destilação Kjeltex Auto 1030 Analyzer. As bases de troca (Ca, Mg, Na e K) foram extraídas de uma amostra de 5 g de solo, à qual se adicionaram 50 mL de uma solução de acetato de amónio 1M, ajustada a pH 7. Após agitação durante 1 hora em agitador rotativo, procedeu-se à centrifugação da suspensão e à filtração do sobrenadante. As bases de troca foram então quantificadas por EAA. O P extraível foi obtido pelo método de Egnér-Riehm e determinado por colorimetria.

A mineralização líquida de N foi avaliada no início e após 4, 7, 15, 30, 60, 90, 120 e 180 dias. O N-NH₄⁺ e o N-NO₃⁻ foram quantificados após extração com KCl 2M (razão solo:solução 1:5) durante 1 hora. Os extractos foram filtrados e a determinação de N-NH₄⁺ e do N-NO₃⁻ foi realizada por intermédio de um autoanalisador de fluxo segmentado (Skalar), sendo a concentração de N-NH₄⁺ determinada pela reação de Berthelot (Searle, 1984) e a de N-NO₃⁻ pelo reagente de Griess-Hosvay, após redução em coluna de cádmio (Kempers & Luft, 1988). A mineralização líquida de N foi calculada pela diferença entre a quantidade acumulada produzida durante a incubação e a quantidade inicial. O teor de humidade foi determinado pelo método gravimétrico, através da secagem das amostras de solo em estufa a 105 °C, tal como descrito por Póvoas & Barral (1992). Esse teor foi expresso em relação ao peso seco a 105 °C.

A determinação de C e N da biomassa microbiana (C_{mic} e N_{mic}) foi realizada pelo método de fumigação-extração (Vance *et al.*, 1987). Cada amostra (10 g) foi fumigada com clorofórmio livre de etanol durante 24 horas. O C e o N das amostras fumigadas e não fumigadas foram extraídas por agitação com 50 mL de K₂SO₄ 0,5 M durante uma hora. Nos extractos foram determinados o C orgânico e o N total com um analisador elementar (Skalar Formal), usando um detector de espectroscopia de infravermelho próximo

e de quimiluminescência, respectivamente. O C e o N microbiano foram obtidos pelas diferenças entre os valores das amostras fumigadas e não fumigadas, usando um factor de correção de 2,64 e 1,85, respectivamente (Brookes *et al.*, 1985; Vance *et al.*, 1987).

A respiração basal do solo foi avaliada através da incubação de 50 g (peso fresco) de solo com um teor de humidade equivalente a 60% da capacidade de campo, em frascos herméticos de 1,5 L de capacidade. Dentro de cada frasco foi também colocado um copo com 30 mL de NaOH 0,5 M, para fixar o CO₂ produzido durante a incubação, e outro com água destilada, para manter as condições de humidade. As amostras foram incubadas a 25 °C durante 180 dias. A solução de NaOH foi substituída após 4, 7, 15, 22, 29, 46, 60, 90, 120, 151 e 180 dias e o CO₂ fixado foi determinado por titulação com HCl 0.5 M na presença de BaCl₂ 1,5 M, tendo como indicador a fenolftaleína. O quociente metabólico (*q*CO₂), foi calculado através da razão da quantidade de CO₂ libertado do solo por unidade de carbono microbiano do solo sendo os valores expressos em mg C-CO₂ (g C_{mic})⁻¹ h⁻¹.

Métodos estatísticos

A análise estatística dos resultados foi efectuada através do programa Statgraphics plus 5.1 (Manugistics Inc.). A metodologia adoptada foi a One way ANOVA para um factor, seguida do teste de Tukey de modo a verificar a existência de diferenças significativas entre os valores médios dos tratamentos, para um nível de significância de <0,05.

RESULTADOS

Características químicas do solo

A aplicação de cinza pulverulenta conduziu, após 4 dias, à rápida elevação do pH do solo (Figura 1), sendo o respectivo acréscimo (entre 1,5 e 2,5 unidades de pH) tanto mais

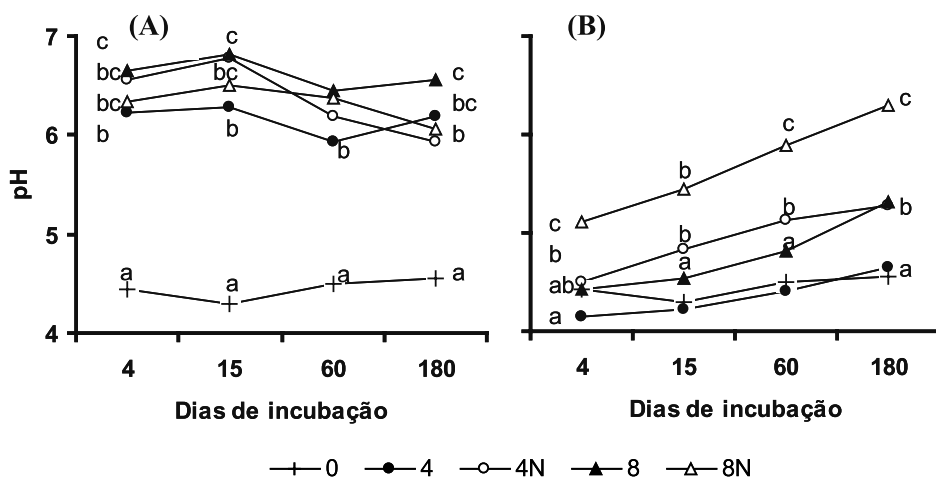


Figura 1 – Valores médios ($n=5$) do pH ao fim de 4, 15, 60 e 180 dias de incubação aeróbia do solo com cinza pulverulenta (A) ou peletizada (B), com ou sem aplicação de N. Os valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente ($p<0,05$) pelo teste de Tukey.

elevado quanto maior a dose de cinza aplicada. Os valores do pH mantiveram-se com pequenas flutuações até ao termo da incubação. A presença de N originou uma ligeira redução do pH no final da incubação que foi significativa para a maior dose (8 g kg^{-1}) de cinza. O efeito alcalinizante da cinza peletizada foi muito mais retardado. Assim, no final do período de incubação, a dose mais baixa de cinza (4 g kg^{-1}) apresentava valores de pH semelhantes ao controlo, sendo observados valores significativamente superiores para a maior dose de cinza (8 g kg^{-1}), tanto em presença como ou ausência de N.

Os teores de C orgânico no solo e de N total não foram modificados pela aplicação das doses de cinza utilizadas no presente estudo (dados não apresentados).

A aplicação de cinza pulverulenta traduziu-se numa forte elevação dos teores de bases (Ca, Mg e K) de troca no solo durante todo o período de incubação (Figura 2). Os maiores acréscimos foram observados para o K (7,5 e 14,9 vezes superior ao controlo para as doses de 4 e 8 g kg^{-1} , respectivamente), seguido do Ca (4,4 e 7,5, respectivamente) e do Mg (2,1 e 3,1, respectivamente), sendo o acréscimo tanto mais elevado quanto maior a dose de cinza

aplicada. Os teores de P extraível também foram mais elevados para a maior dose de cinza (sobretudo em presença de N), e para a dose de 4 g de cinza quando aplicada com N.

A aplicação de cinza sob forma peletizada conduziu a um ligeiro acréscimo dos teores de Ca e Mg em relação ao controlo, o qual foi, em geral, significativo para a maior dose (8 g kg^{-1}) de cinza. Durante todo o período de incubação, os teores de K extraível foram significativamente superiores aos do controlo, sobretudo para a maior dose de cinza. A aplicação isolada de cinza peletizada não modificou os teores de P extraível, atingindo na presença de N valores significativamente superiores (16 vezes) aos do controlo.

Biomassa microbiana

A aplicação de cinza pulverulenta conduziu a uma redução da quantidade de C microbiano ao longo do período de incubação (Figura 3), mas as diferenças não foram sempre significativas.

No termo da incubação, os valores foram 1,4-2,6 vezes inferiores aos do controlo. Na maioria das amostragens realizadas, os teo-

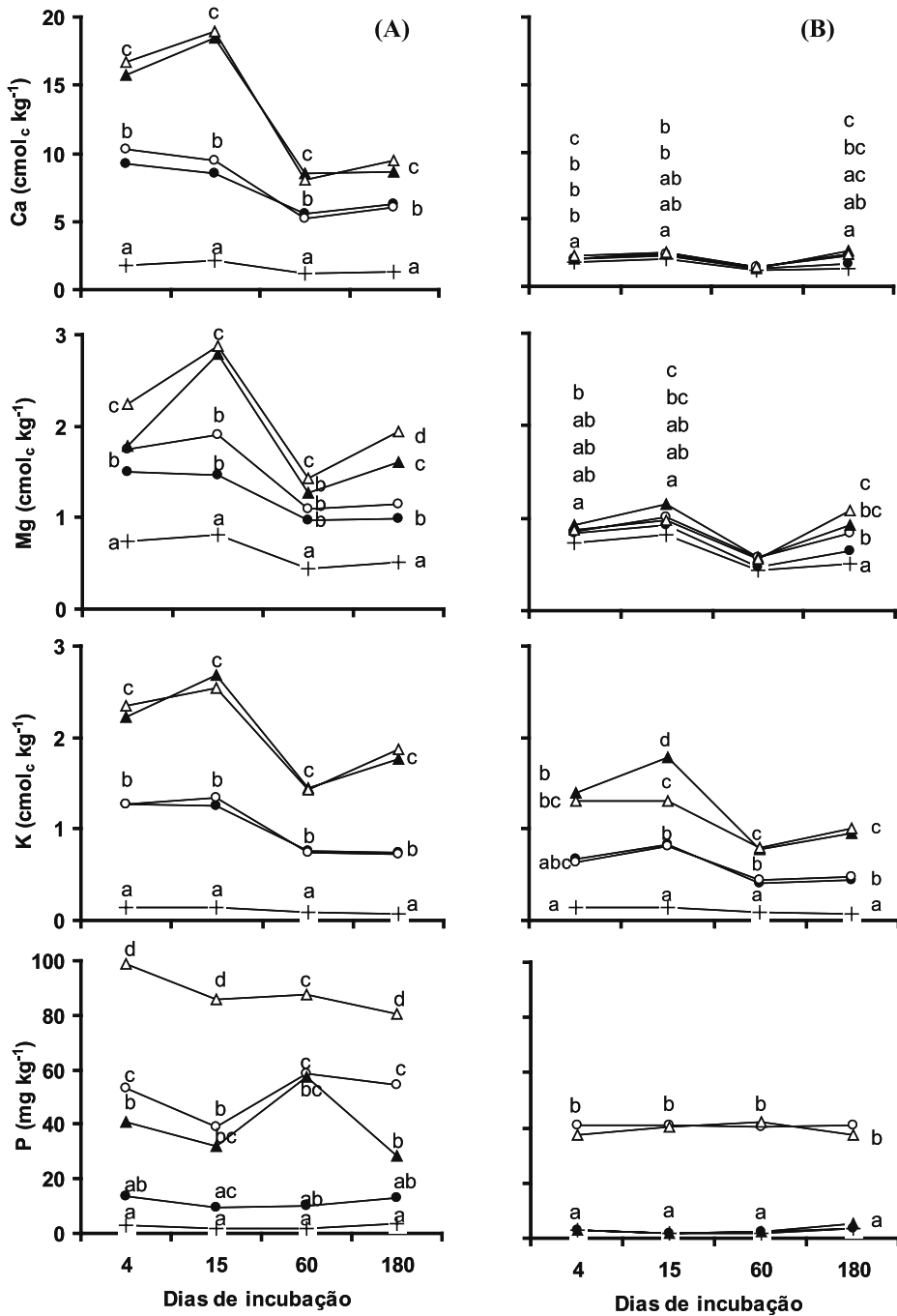


Figura 2 – Valores médios (n=5) das bases de troca extraíveis (Ca, Mg, K) e de P extraível ao fim de 4, 15, 60 e 180 dias de incubação aeróbia do solo com cinza pulverulenta (A) ou peletizada (B), com ou sem aplicação de N. Os valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

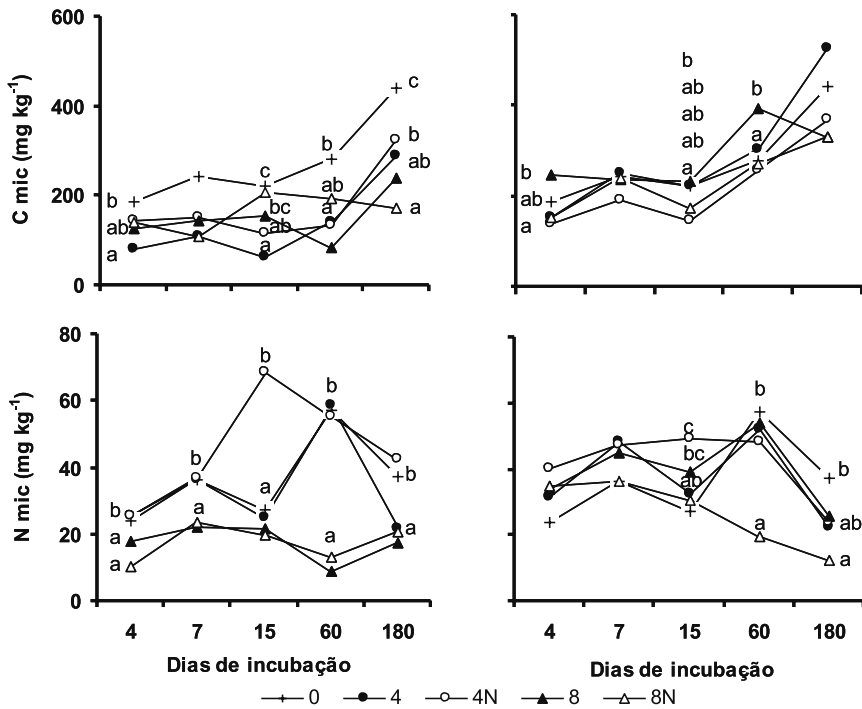


Figura 3 – Valores médios de C e N microbiano (mg kg^{-1}) ao fim de 4, 7, 15, 60 e 180 dias de incubação aeróbia do solo com cinza pulverulenta (A) ou peletizada (B).

res de C microbiano foram similares entre os tratamentos com cinza peletizada e o controle, e apenas a aplicação da maior dose de cinza (8 g, sem N) originou um acréscimo significativo ao fim de 60 dias.

A aplicação da maior dose de cinza pulverulenta, na ausência ou presença de N, levou à diminuição da quantidade de N microbiano, em relação ao controle, na maioria das amostragens realizadas. A aplicação de cinza sob forma peletizada não originou uma tendência clara, observando-se incrementos significativos, em relação ao controle, para as doses de 4 (com N) e de 8 g (sem N) ao fim de 15 dias, e uma significativa redução para a maior dose (8 N) ao fim de 60 e 180 dias.

Mineralização de N

O tratamento controle apresentou amonificação sistemática ao longo da incubação

(Figura 4). A cinza pulverulenta aplicada isoladamente diminuiu a amonificação líquida na segunda metade da incubação, atingindo ao fim de 180 dias valores significativamente inferiores ($-2,6$ e $-2,3 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$, para 4 e 8 g de cinza kg^{-1} de solo, respectivamente) aos do controle ($19,4 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$, Figura 4). A aplicação de N promoveu uma amonificação líquida inicial, atingindo ao fim de 30 dias valores significativamente superiores aos do controle. Tais valores foram diminuindo, a partir daí, ao longo do restante período de incubação, atingindo na presença de N valores mais negativos ($-31,6$ e $-30,5 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$) do que os observados para a cinza pulverulenta. A sua aplicação sob forma peletizada (na ausência de N) não teve um efeito significativo na amonificação líquida. Em presença de N, a cinza peletizada apresentou um padrão semelhante àquele observado para a forma pulverulenta, com amonificação no período inicial, a qual foi

seguida de uma acentuada redução da amonificação até atingir valores ($-6,5$ e $28,5$ mg N-NH_4^+ kg^{-1} solo) significativamente inferiores aos do controlo ao termo da incubação.

A aplicação de cinza pulverulenta aumentou a nitrificação líquida ($33,3$ e $36,0$ N-NO_3^- kg^{-1} , para 4 e 8 g de cinza kg^{-1} de solo, respectivamente), sendo este acréscimo mais acentuado na presença de N ($53,7$ e $78,0$ N-NO_3^- kg^{-1}) e quanto maior a dose de cinza aplicada (Figura 4). Na ausência de N, a cinza peletizada não modificou o padrão de nitrificação. A sua aplicação conjunta com N elevou significativamente os valores de nitrificação no termo da incubação, sendo este acréscimo tanto mais elevado quanto maior a dose de cinza (Figura 4).

Respiração basal do solo

No final da incubação, os valores acumulados da respiração basal do solo não foram significativamente diferentes entre os tratamentos com cinza pulverulenta (com ou sem N) e o controlo (Figura 5). Por seu turno, a aplicação da maior dose (8 g kg^{-1}) de cinza peletizada diminuiu significativamente os valores de respiração basal, em relação ao controlo ou à menor dose de cinza.

A aplicação de cinza pulverulenta conduziu a um acréscimo inicial do quociente metabólico, atingindo o seu valor máximo após 7 dias de incubação para a maior dose de cinza (Figura 6). A cinza sob forma peletizada não modificou substancialmente os valores de quociente metabólico.

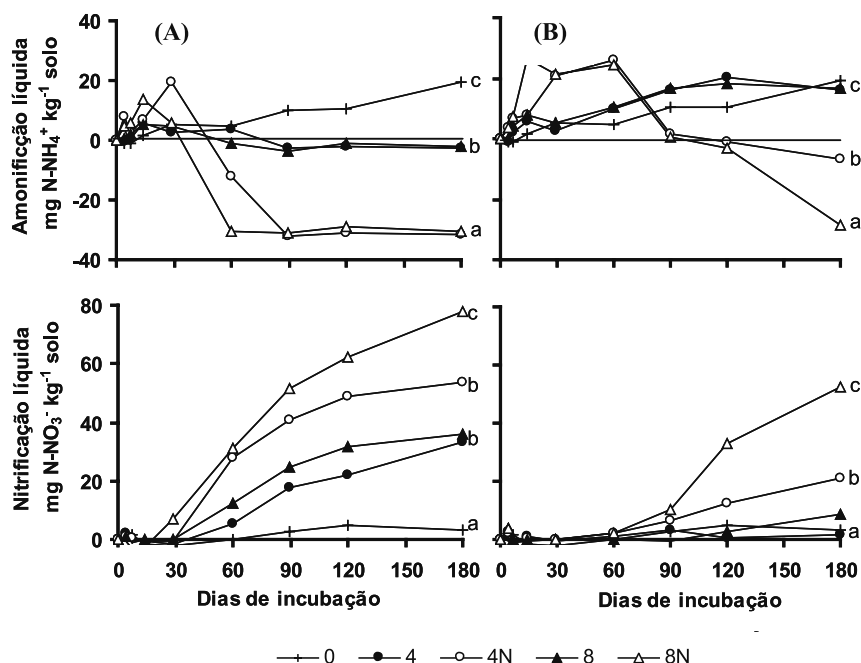


Figura 4 – Valores médios ($n=5$) de amonificação (mg N-NH_4^+ kg^{-1} solo) e nitrificação líquida (mg N-NO_3^- kg^{-1} solo) ao longo de 180 dias de incubação aeróbia do solo com cinza pulverulenta (A) ou peletizada (B), com ou sem aplicação de N. Os valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente ($p<0,05$) pelo teste de Tukey.

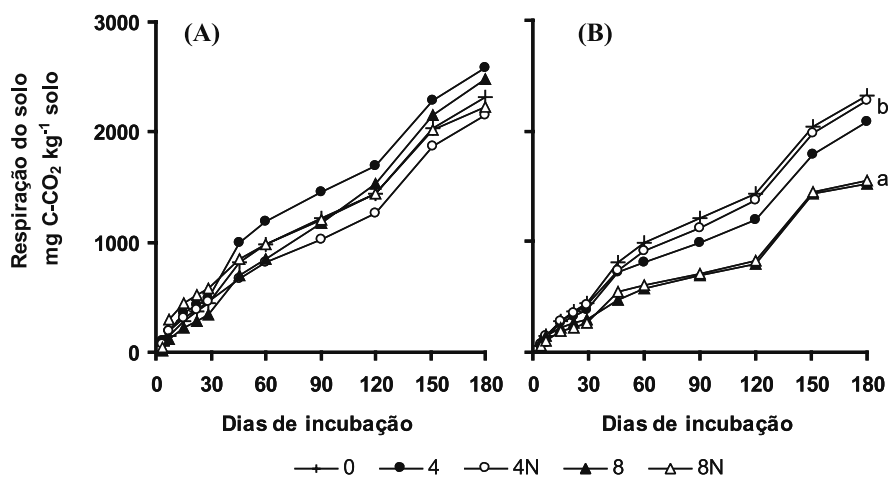


Figura 5 – Valores médios ($n=5$) acumulados da respiração basal ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo}$) do solo ao longo de 180 dias de incubação aeróbia do solo com cinza pulverulenta (A) ou peletizada (B), com ou sem aplicação de N. Os valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente ($p<0,05$) pelo teste de Tukey.

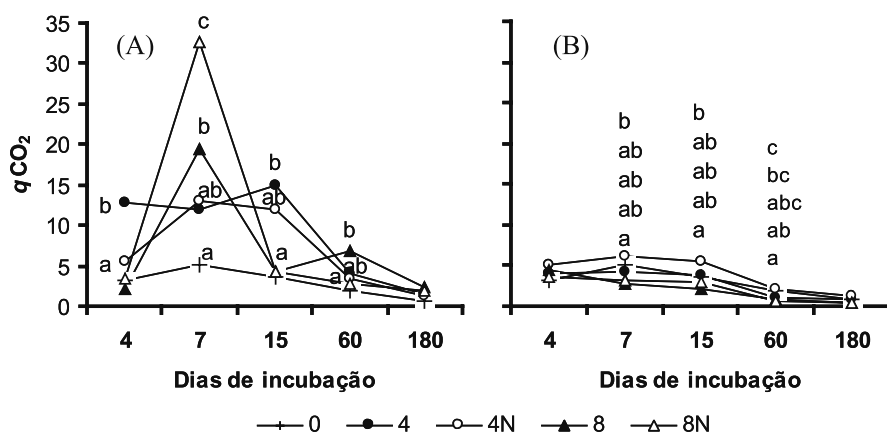


Figura 6 – Valores médios ($n=5$) do quociente metabólico ($q\text{CO}_2$, $\text{mg C-CO}_2 (\text{g Cmic})^{-1} \text{ h}^{-1}$) do solo ao fim de 4, 7, 15, 60 e 180 dias de incubação aeróbia do solo com cinza pulverulenta (A) ou peletizada (B), com ou sem aplicação de N. Os valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente ($p<0,05$) pelo teste de Tukey.

DISCUSSÃO

Os efeitos decorrentes da aplicação de cinza dependeram da forma como a mesma se apresentava e da dose aplicada. A aplicação de cinza pulverulenta determinou um rápido acréscimo do pH do solo e do teor de bases de troca e de P extraível, confirmando a ef-

ciência da cinza não estabilizada na correção da acidez dos solos e na melhoria da sua fertilidade, como foi observado em vários estudos (Ludwig *et al.*, 2002; Zimmerman & Frey, 2002; Solla-Gullón *et al.*, 2006; Cabral *et al.*, 2008). O carácter alcalinizante da cinza é atribuído à abundância de óxidos, hidróxidos e carbonatos, principalmente de Ca,

Mg e K (Etiegni & Cambell, 1991). A disponibilidade de nutrientes no solo tem sido atribuída à sua solubilidade na cinza, sendo o K o mais solúvel, seguido do Ca e Mg (Khanna *et al.*, 1994; Perkiömäki & Fritze, 2002). Os nossos resultados vão de encontro a esta tendência, dado o solo apresentar acréscimos mais acentuados de K do que de Ca ou Mg. A forte elevação de K observada no solo também deverá ser explicada pelo facto de elementos bivalentes (Ca e Mg) serem mais fortemente retidos que o K nas posições de troca catiónica.

Apesar do baixo teor de P na cinza, a disponibilidade deste elemento no solo aumentou rapidamente após a aplicação da dose mais elevada de cinza pulverulenta. O P presente na cinza é, em geral, lentamente libertado, sendo a sua solubilidade reduzida devido ao elevado pH da mesma (Erich & Ohno, 1992). No presente estudo, o facto da cinza ter sido misturada com o solo poderá ter levado a um aumento da sua solubilidade, tal como foi reportado por Solla-Gullón *et al.* (2008) para uma plantação de *Pinus radiata* do norte da Península Ibérica, onde a cinza pulverulenta foi incorporada no solo. Os elevados acréscimos observados para os tratamentos onde foi aplicada cinza conjuntamente com N poderão ser explicados pelo facto do P também ser inicialmente aplicado como fertilizante.

A cinza sob forma peletizada teve um efeito mais moderado no pH do solo e na melhoria da sua fertilidade. A estabilização da cinza através de processos de endurecimento, granulação ou peletização, converte os óxidos e hidróxidos presentes na cinza em carbonatos e outros compostos menos solúveis, evitando uma dissolução rápida e, por isso, alterações bruscas de pH (Perkiomaki & Fritze, 2002). A reação mais importante durante este processo é a transformação de Ca(OH)_2 em CaCO_3 , a qual reduz a solubilidade do Ca (Steenari *et al.*, 1999). Com efeito, os acréscimos de Ca no solo resultaram menos pronunciados para a cinza peletizada do que aqueles observados para a forma pulverulenta. A menor solubilidade de catiões básicos devido à estabilização da cinza tem

sido observada noutros estudos em laboratório (Steenari *et al.*, 1999) e campo (Perkiomaki & Fritze, 2002).

A aplicação de doses crescentes de cinza pulverulenta determinou um estímulo do processo de nitrificação tal como foi referido por Khanna *et al.* (1994) para incubações realizadas com solos florestais da Austrália. Este acréscimo sugere que altas doses desta cinza (sobretudo em presença de N) poderão levar à eventual perda de N do solo através da lixiviação de N-NO_3^- . Esta tendência vai de encontro aos resultados de Solla-Gullón *et al.* (2001) que observaram um forte aumento na lixiviação de nitrato em solos do norte da Península Ibérica (Galiza) em que foi aplicada cinza e fertilização azotada. No mesmo sentido, Ludwig *et al.* (2002), em solos ricos em N do norte de Europa, onde foi aplicada cinza, também constataram um aumento da concentração de nitratos nos lixiviados amostrados até 100 cm de profundidade. A melhoria das condições para as populações microbianas nitrificantes que se observam após a aplicação de cinza, através da diminuição da acidez do solo e do acréscimo dos seus teores em nutrientes, terá conduzido, de acordo com Baath *et al.* (1995), a um estímulo da actividade biológica e a uma nitrificação mais rápida. Os nossos resultados também sugerem que no caso dos solos com baixo teor de azoto disponível, o efeito da aplicação de cinza peletizada deverá ser reduzido se não for aplicado um fertilizante azotado.

A aplicação de cinza pulverulenta não teve um efeito significativo na respiração basal do solo. Assim, os resultados do presente estudo não corroboram os reportados para solos florestais do Norte da Europa (Fritze *et al.*, 1994; Perkiömäki & Fritze, 2002; Zimmermann & Frey 2002) ou do norte da Península Ibérica (Solla-Gullón *et al.*, 2006), onde se verificou um aumento da actividade respiratória do solo nos primeiros anos após a aplicação de cinza pulverulenta. O limitado efeito observado no presente estudo deve estar associado com o baixo teor de matéria orgânica do solo. De facto, Khanna *et al.* (2004)

constatarem, sob condições de matéria orgânica bastante diferenciadas, que o efeito da aplicação de cinza na respiração do solo é menor em solos com baixo teor de matéria orgânica. No mesmo sentido, Persson *et al.* (1990/1991) verificaram, através de incubações em laboratório, que o efeito de adição de calcário na respiração do solo varia conforme a razão C/N do solo, observando-se um efeito positivo e de longa duração apenas em solos com razão C/N inferior 24-27. Assim, a ausência de resposta da respiração do solo à aplicação de cinza observada no presente estudo, poderá também estar associada à elevada razão C/N (39) da matéria orgânica do solo.

A aplicação de cinza pulverulenta determinou uma redução da quantidade de C na biomassa microbiana. Perucci *et al.* (2006) também referem menores teores de C microbiano em solos agrícolas em que se aplicaram doses elevadas de cinza pulverulenta (20 t ha⁻¹), concluindo que a forte elevação da condutividade eléctrica daí resultante poderá acentuar os fenómenos osmóticos nos microorganismos, com acréscimos na respiração e uma diminuição na biomassa microbiana. Assim, a diminuição de biomassa microbiana observada após a aplicação de cinza pulverulenta não foi associada a um decréscimo da actividade microbiana, levando, deste modo, a um aumento no quociente metabólico durante os primeiros dias de incubação. O quociente metabólico é uma medida de respiração microbiana por unidade de biomassa e um acréscimo do seu valor indica uma reduzida eficiência microbiana (Wardle & Ghani, 1995), a qual pode ser devida a uma perturbação do ecossistema ou a um aumento do stress dos microorganismos (Zimmermann & Frey, 2002). Os nossos resultados estão em linha com os obtidos em regiões de clima frio, onde se constatou, igualmente, um aumento do quociente metabólico após a aplicação de 5 t ha⁻¹ de cinza pulverulenta em solos florestais com elevada razão C/N (34-45) de pinheiro silvestre na Finlândia (Fritze *et al.*, 1994) e na Suécia (Baath & Arnebrant, 1994). No entanto, a aplicação de doses su-

periores (8-20 t ha⁻¹) de cinza pulverulenta não modificou o quociente metabólico em solos com baixa razão C/N (15-16) de climas temperados, como da Suíça (Zimmermann & Frey, 2002) ou do norte da Península Ibérica (Solla-Gullón *et al.*, 2006). Este padrão sugere que a razão C/N do solo poderá determinar diferentes respostas das populações microbianas à cinza de biomassa, sendo o quociente metabólico mais elevado em solos com elevada razão C/N. O acréscimo do quociente metabólico no solo tratado com cinza indica uma maior respiração por unidade de biomassa microbiana e, portanto, uma menor eficiência no uso do carbono pela comunidade microbiana (Insam & Haselwandter, 1989).

A aplicação de cinza sob forma peletizada teve uma fraca influência na dinâmica de C, verificando-se, em geral, valores semelhantes entre tratamentos para a respiração basal do solo, os teores de C microbiano e o quociente metabólico. A ausência de efeitos significativos deverá estar associada com a baixa solubilidade da cinza sob forma peletizada.

CONCLUSÕES

O acréscimo do pH e do teor de nutrientes extraíveis do solo que se observou após a aplicação de cinza sob forma pulverulenta conduziu a um estímulo da actividade biológica durante os primeiros dias de incubação. Esse estímulo traduziu-se no aumento da taxa de nitrificação quando a cinza foi aplicada na dose mais elevada, sobretudo na presença de N. A aplicação de cinza sob forma peletizada parece ser preferível porque origina acréscimos de pH menos acentuados, menores perdas de N e porventura um efeito mais prolongado da sua ação. A sua aplicação deve realizar-se de forma conjunta com adubo azotado a fim de aumentar a disponibilidade do mesmo no solo. Os resultados também sugerem que a aplicação de cinza peletizada pode ser em doses mais elevadas, com claros benefícios no destino de grandes quantidades de cinza.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor realizou o presente trabalho no âmbito de uma bolsa de pós-doutoramento concedida pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (SFRH/BPD/27067/2006). Os autores agradecem à empresa CELBI, S.A. a disponibilização de cinza de biomassa para a execução do estudo. Ao pessoal do Laboratório de Solos do Instituto Superior de Agronomia agradecemos o apoio nos processamentos analíticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, M.C.; Madeira, M.; Hilário, L. & Marques, P.P. (2004) – Efeito da cinza de biomassa florestal no crescimento de plantas de *Eucalyptus globulus* e nas características do solo. *Revista de Ciências Agrárias*, 27, 1: 99-112.
- Augusto, L.; Bakker, M.R. & Meredieu, C. (2008) – Wood ash applications to temperate forest ecosystems potential benefits and drawbacks. *Plant and Soil* 306:181-198.
- Baath, E. & Arnebrant, K. (1994) – Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash treated forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 26, 8: 995-1001.
- Baath, E.; Frostegard, A.; Pennanen, T. & Fritze, H. (1995) – Microbial community structure and pH response in relation to soil organic matter quality in wood-ash fertilized, clear-cut or burned coniferous forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 21, 2: 229-240.
- Brookes, P.C.; Landman, A.; Pruden, G. & Jenkinson, D.S. (1985) – Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 17: 837-842.
- Cabral, F.; Ribeiro, H.M.; Hilário, L.; Machado, L. & Vasconcelos, E. (2008) – Use of pulp mill inorganic wastes as alternative liming materials. *Bioresource and Technology* 99: 8294-9298.
- Clapham, W.M. & Zibilske, L.M. (1992) – Wood-ash as a liming amendment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23, 1209-1227.
- Cortez, N.; Madeira, M.; Marques, P.J.P. & Araújo, M.C. (2001) – Influência da aplicação de cinza de biomassa florestal na produção de plantas forrageiras e nas características do solo. *Revista de Ciências Agrárias* 24, 3/4: 144-157.
- Demeyer, A.; Voundi Nkana, J.C. & Verloo, M.G. (2001) – Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology* 77: 287-295.
- De Leenheer, L. & Van Hove, J. (1958) – Determination de la teneur en carbone organique des sols. Études critique des méthodes titrimétriques. *Pédologie* 8: 39-77.
- Etiegni, L. & Campbell, A. G. (1991) – Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource Technology* 37:173-178.
- Erich, M.S. & Ohno, T. (1992) – Phosphorus availability to corn from wood ash amended soils. *Water, Air, and Soil Pollution* 64: 475-485.
- Fritze, H.; Smolander, A.; Levula, T.; Kitunen, V. & Mälkönen, E. (1994) – Wood ash fertilization and fire treatments in a Scots pine forest stand: Effects on the organic layer, microbial biomass, and microbial activity. *Biology and Fertility of Soils* 17: 57-63.
- Gutián, F. & Carballas, T. (1976) – *Técnicas de análisis de suelos*. Ed. Pico Sacro. Santiago de Compostela. España.
- Insam, H. & Haselwandter, K. (1989) – Metabolic quotient of the soil microflora in relation to plant succession. *Oecologia* 79: 174-178.
- Khanna, P.K.; Raison, R.J. & Falkiner, R.A. (1994) – Chemical properties of ash derived from *Eucalyptus* litter and its effects on forest soils. *Forest Ecology and Management* 66: 107-125.
- Kempers, A.J. & Luft, A.G. (1988) – Re-examination of the determination of environmental nitrate as nitrite by reduction with hydrazine. *Analyst* 113: 1117-1120.

- Ludwig, B.; Rumpf, S.; Mindrup, M.; Meiwes, K.J. & Khanna, P.K. (2002) – Effects of lime and wood ash on soil-solution chemistry, soil chemistry and nutritional status of a pine stand in Northern Germany. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 225-237.
- MEI (2005) – *Estratégia Nacional para a Energia*. Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento, Lisboa.
- Perkiömäki, J. & Fritze, H. (2002) – Short and long-term effects of wood ash on the boreal forest humus microbial community. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 1343-1353.
- Perucci, P.; Monaci, E.; Casucci, C. & Vischetti, C. (2006) – Effect of recycling wood ash on microbiological and biochemical properties of soils. *Agronomy for Sustainable Development* 26:157-165.
- Persson, Z.; Wiren, A. & Anderson, S. (1990/1991) – Effects of liming on carbon and nitrogen mineralization in coniferous forests. *Water, Air and Soil Pollution* 54: 351-364.
- Póvoas, I. & Barral, M.F. (1992) – *Métodos de análises de solos*. Comunicação do Instituto de Investigação Científica Tropical, série de Ciências Agrárias, 10. Lisboa.
- Searle, P.L. (1984) – The Berthlot or indophenol reaction and its use in the analytical chemistry of nitrogen. *Analyst* 109: 549-568.
- Solla-Gullón, F.; Rodríguez- Soalleiro, R. & Merino, A. (2001) – Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un ensayo en laboratorio. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales* 16, 3: 379-393.
- Solla-Gullón, F.; Santalla, M.; Rodríguez-Soalleiro, R.J. & Merino, A. (2006) – Nutritional status and growth of a young *Pseudotsuga menziesii* plantation in a temperate region after application of wood-bark ash. *Forest Ecology and Management* 237: 312-321.
- Solla-Gullón, F.; Santalla, M.; Pérez-Cruza-do, C.; Merino, A. & Rodríguez-Soalleiro R. (2008) – Response of *Pinus radiata* seedlings to application of mixed wood-bark ash at planting in a temperate region: Nutrition and growth. *Forest Ecology and Management* 255: 3873-3884.
- Steenari, B.M.; Karlsson, L.G. & Lindqvist, O. (1999) – Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. *Biomass and Bioenergy* 16:119-136.
- Vance, E.D. (1996) – Land application of wood-fired and combination boiler ashes: an overview. *Journal of Environmental Quality* 25: 937-944.
- Vance, P.C.; Brookes, P.C. & Jenkinson, D.S. (1987) – An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 19:703-707.
- Wardle, D.A. & Ghani, A. (1995) – A critique of the microbial metabolic quotient (qCO_2) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biology and Biochemistry* 27: 1601-1610.
- Weber, A.; Karsisto, M.; Leppänen, R.; Sundman, V. & Skujins, J. (1985) – Microbial activities in a Histosol: effects of wood ash and NPK fertilizers. *Soil Biology and Biochemistry* 17: 291-293.
- WRB (2006) – *World reference base for soil resources*. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Zimmermann, S. & Frey, B. (2002) – Soil respiration and microbial properties in an acid forest soil: effects of wood ash. *Soil Biology and Biochemistry* 34:1727-1737.