

Comissão 3.2 - Corretivos e fertilizantes

AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS COMO CORRETIVO DA ACIDEZ DO SOLO⁽¹⁾

Paulo Renato Orlandi Lasso⁽²⁾, Carlos Manoel Pedro Vaz⁽³⁾, Alberto Carlos de Campos Bernardi⁽⁴⁾, Cauê Ribeiro de Oliveira⁽³⁾ & Osny Oliveira Santos Bacchi⁽⁵⁾

RESUMO

A geração e o armazenamento de resíduos de construção civil e demolição (RCD) constituem-se em um problema ambiental, pois representam mais de 50 % do total de resíduos sólidos gerados nos médios e grandes centros urbanos. Porém, como o calcário é uma das principais matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento e da cal hidratada e, conseqüentemente, de concretos, argamassas e reboques, a reciclagem desses materiais pode fornecer, em princípio, um subproduto com potencial para correção da acidez dos solos. Este estudo teve o objetivo de avaliar a utilização de resíduos de construção e demolição reciclados como corretivos de acidez do solo. Utilizaram-se RCD-R provenientes de concretos, argamassas e reboques (material cinza), que foram caracterizados inicialmente por fluorescência e difratometria de raios-X. O desempenho dos RCD-R cinza como corretivo de acidez foi avaliado pela produção de matéria seca da alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula) e pela medida dos atributos químicos do solo. Os resultados sugerem que os RCD-R cinza (origem de concretos) apresentam características interessantes para utilização como corretivos da acidez de solos, porém em concentrações superiores a 24 t ha⁻¹, quando aplicados em área total.

Termos de indexação: reciclagem, calcário, cimento, cal, agricultura.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP. Recebido para publicação em 3 de dezembro de 2012 e aprovado em 31 de julho de 2013.

⁽²⁾ Analista, Embrapa Instrumentação - CNPDIA/Embrapa. Caixa Postal 741. CEP 13560-970 São Carlos (SP). E-mail: paulo.lasso@embrapa.br

⁽³⁾ Pesquisador, Embrapa Instrumentação - CNPDIA/Embrapa. E-mail: carlos.vaz@embrapa.br, caue.ribeiro@embrapa.br

⁽⁴⁾ Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste - CPPSE/Embrapa. Caixa Postal 339. CEP 13560-970 São Carlos (SP). E-mail: alberto.bernardi@embrapa.br

⁽⁵⁾ Professor Associado, Laboratório de Física de Solos, Centro de Energia Nuclear na Agricultura-CENA/USP. Caixa Postal 96. CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: osny@cena.usp.br

SUMMARY: EVALUATION OF CORRECTION OF SOIL ACIDITY WITH RECYCLED CONSTRUCTION AND DEMOLITION DEBRIS

The production and storage of construction and demolition residues (CDR) consist in an important environmental issue because they represent more than 50 % of total solid waste that has been produced in large and medium-sized urban centers. However, as limestone is one of the major raw materials used in cement and hydrated lime products in the preparation of concrete and mortar, recycling this material can, in principle, provide a subproduct with potential to be applied to correct soil acidity. This study aimed to evaluate the use of recycled construction and demolition residues (RCD-R) as soil acidity corrective. The material was collected at a commercial recycling plant and consisted mainly of concrete and mortar (gray material), which was initially characterized by X-ray fluorescence and X-ray diffraction. The performance of gray RCD-R for soil pH correction was evaluated by the chemical properties of a medium-textured soil treated with this residue and the dry matter production of alfalfa (Medicago sativa cv. Crioula). Results suggest that the RCD-R used has promising characteristics to be applied as correction material of the soil pH, but at doses higher than 24 t ha⁻¹.

Index terms: recycling, limestone, cement, lime, agriculture.

INTRODUÇÃO

Os resíduos gerados nas atividades de construção civil e demolição (RCD) constituem-se em um problema ambiental, pois representam mais de 50 % do resíduo sólido gerado nos médios e grandes centros urbanos. Por exemplo, nas cidades de São Paulo, Campinas e Ribeirão Preto, a geração de RCD foi, respectivamente, de 55, 64 e 70 % do total dos resíduos sólidos gerados no ano de 2005 (Gestão..., 2005). A maior parte desses resíduos tem disposição final inadequada, ocasionando sérios impactos ambientais como degradação das áreas de manancial e proteção permanente, proliferação de agentes transmissores de doenças, assoreamento de rios e córregos, obstrução dos sistemas de drenagem, ocupação de vias e logradouros públicos e degradação da paisagem urbana. Além disso, caso esse material seja disposto em aterros pode reduzir drasticamente a vida útil desses (Santos, 2007).

Entretanto, tais resíduos, se bem manejados, podem constituir-se em um produto com valor agregado com possibilidade de uso em diversas áreas. Assim, a reciclagem desses resíduos tem se tornado alternativa econômica e ambientalmente viável e dado origem a diversas usinas de reciclagem de RCD, instaladas em diversos municípios brasileiros. Essas usinas separam os resíduos enquadrados como classe A, pela Resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama), que exclui plástico, metal, vidro, madeira e gesso (Conama, 2002), moendo-os em diversas granulometrias. O material resultante é denominado RCD reciclados (RCD-R). Esse material tem encontrado aplicações na própria construção civil, na fabricação de pré-moldados (blocos, briquetes, meio-fio e outros), ou utilizado na pavimentação ou contenção de encostas. Como esse material é constituído basicamente de areia, cimento, cal e argila (cerâmica), entre outros, tem similaridade com o solo

e possui, em princípio, possibilidade de disposição e incorporação no solo sem danos ou alterações significativas na sua função (Lasso, 2011). Como exemplo de incorporação desse material ao solo, Santos (2007) estudou a utilização de RCD-R como material de preenchimento de estruturas de solo reforçado para fundações.

Segundo Mello Filho (2005), o calcário é uma das principais matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento *portland* e da cal hidratada - produtos largamente utilizados na preparação de concretos, argamassas e rebocos nas obras de construção civil no Brasil. Na produção do cimento *portland*, o calcário contribui na proporção de 85 a 95 %, ao qual é adicionada argila. A mistura calcário-argila é moída, homogeneizada e calcinada a uma temperatura de 1.450 °C em forno rotativo, obtendo-se o *clínquer*. O cimento *portland* é finalmente obtido a partir da moagem do *clínquer* com alguns aditivos, como gesso, calcário finamente moído, pozolana e escória siderúrgica, em diversas proporções para regular propriedades do cimento, como tempo de endurecimento, resistência e melhora da trabalhabilidade e acabamento dele. A composição química média do cimento *portland* brasileiro é a seguinte: CaO (58 a 66 %), SiO₂ (19 a 25 %), Al₂O₃ (3 a 9 %), Fe₂O₃ (1,5 a 4,5 %), MgO (0,3 a 6,1 %) e SO₃ (0,8 a 3 %) (Martins et al., 2008). Já a cal hidratada utilizada na construção civil é obtida a partir da calcinação e moagem da rocha calcária magnésiana ou dolomítica e posterior hidratação, secagem e pulverização. O produto final é composto basicamente de Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂ (Mello Filho, 2005).

Assim, espera-se que resíduos de construção e demolição formados basicamente por tijolos, reboco, concretos, argamassa e outros possuam elementos minerais como Ca, Mg e outros, com potencial de aplicação agrícola como condicionante de solos ou como uso em substrato de plantas e mudas. Em um trabalho preliminar realizado por Ramalho & Pires (2009), com

adição de RCD-R em solo, verificou-se aumento consistente do pH do solo. Jones et al. (2009), em um estudo sobre a utilização de resíduos minerais de pedreiras (basalto) associados a resíduos vegetais, citaram os RCD-R como possível exemplo de resíduo com potencial de aplicação na agricultura. Entretanto, não foram encontrados, na literatura, trabalhos completos específicos sobre a caracterização e aplicações agrícolas dos RCD-R.

Dessa forma, este estudo teve como objetivos caracterizar e avaliar a potencialidade da aplicação dos RCD-R classe A, provenientes de concretos, argamassas e reboques - denominados RCD-R cinza -, produzidos pela Usina de Reciclagem da Prohab do município de São Carlos, SP, como corretivo de acidez do solo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo utilizado foi fornecido pela Usina de Reciclagem da Prohab do município de São Carlos, SP, constituindo-se de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R), classe A, provenientes de concretos, argamassas e reboques (RCD-R cinza). Ramalho & Pires (2009) analisaram a ocorrência de elementos potencialmente perigosos, por ICP-AES, nesse tipo de RCD-R. Segundo esses autores, os resíduos apresentaram teores baixos de elementos potencialmente tóxicos, quando comparados com os limites de contaminantes para insumos indicados na IN SDA 27 do MAPA (Brasil, 2006).

Foram realizadas cinco coletas de amostras dos RCD-R cinza com intervalos de três meses aproximadamente entre uma e outra, fechando o ciclo de um ano de produção da Usina da Prohab de São Carlos. Essas cinco amostras coletadas ao longo de um ano foram denominadas cinza 1, cinza 2, cinza 3, cinza 4 e cinza 5, em ordem cronológica de coleta.

Em cada amostragem, foram coletados materiais de cinco pontos diferentes do monte de RCD-R recém-processados e misturados, obtendo uma amostra composta com aproximadamente 5 kg. O material coletado foi peneirado em malha de 2 mm e seco em estufa a 100 °C por 24 h e finalmente armazenado.

Caracterização e análise da variabilidade dos RCD-R cinza

As composições química e mineralógica das amostras foram determinadas, utilizando as técnicas de espectroscopia por Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difratomia de Raios-X (DRX).

Para análise de FRX, foram tomadas 10 g de cada amostra (cinza 1, 2, 3, 4 e 5) e separadas alíquotas de 0,5 g de cada, que foram fundidas com tetraborato de lítio em cadinhos de platina, formando pastilhas que foram encaminhadas para leitura no espectrômetro

de FRX. Essas análises foram realizadas nos laboratórios da SGS Geosol em Vespasiano, MG, utilizando o espectrômetro da Panalytical, série Axios, modelo PW 4400/40.

Para a análise de DRX, foram separadas alíquotas de, aproximadamente, 3 g de cada amostra (cinza 1, 2, 3, 4 e 5). Foi utilizado um porta-amostra de alumínio com uma cavidade circular, onde cada alíquota foi colocada e prensada, de modo a ficar com sua superfície plana e faceando o porta-amostra. As medidas foram realizadas em um difratômetro de raios-X, marca Shimadzu, modelo XRD-6000, tubo com alvo de Cu, tensão de operação 30 kV e corrente de operação 30 mA, instalado no Laboratório de Técnicas Nucleares da Embrapa Instrumentação em São Carlos, SP. Foi feita varredura angular contínua entre 15° e 75°, com velocidade de 2° min⁻¹.

Os teores de CaO e MgO, o poder de neutralização (PN) e o poder relativo de neutralização total (PRNT) das amostras cinza 1, cinza 2 e cinza 3 foram determinados de acordo com o método descrito na Instrução Normativa n.º 28 do MAPA (Brasil, 2007), no Laboratório de Fertilizantes e Resíduos do Instituto Agrônomo (IAC), Campinas, SP.

Incubação do solo com RCD-R

Os RCD-R cinza recém-processados foram coletados e peneirados em malha de 2 mm. Depois de secos em estufa a 100 °C por 24 h, parte desse material sofreu moagem adicional e novo peneiramento em malha de 0,5 mm. Dessa forma, o material foi separado em duas frações granulométricas, denominadas de fração cinza fino (CF), abaixo de 0,5 mm, e fração cinza grosso (CG), entre 2 e 0,5 mm. Essas frações foram misturadas com solo em diferentes proporções dos resíduos, mantidas em umidade controlada, e os atributos pH, CTC e V% foram avaliados em função do tempo de incubação.

O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média, cujas principais propriedades físico-químicas, na camada de 0-20 cm, são descritas a seguir: pH (CaCl₂) = 4,0; M.O. = 17 g dm⁻³; P_{resina} = 4 mg dm⁻³; K = 1,7 mmol_c dm⁻³; Ca = 11 mmol_c dm⁻³; Mg = 4 mmol_c dm⁻³; H+Al = 38 mmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 4 mmol_c dm⁻³; CTC = 55 mmol_c dm⁻³; V = 30 %; B = 0,18 mg dm⁻³; Cu = 0,8 mg dm⁻³; Fe = 40 mg dm⁻³; Mn = 4,2 mg dm⁻³; Zn = 0,4 mg dm⁻³; areia = 710 g kg⁻¹; argila = 242 g kg⁻¹; e silte = 48 g kg⁻¹.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 4 + 1, com três repetições. Os tratamentos consistiram de dois materiais (CF e CG), que foram misturados homogêaneamente a um solo de textura média em quatro doses (5, 10, 20 e 40 % em massa) e ao tratamento testemunha (dose 0 %). Para fins de comparação, foram preparadas misturas homogêneas de calcário (PRNT = 93 %) em doses equivalentes a 2, 4, 6 e 8 t ha⁻¹, ao mesmo solo, também com três repetições. Utilizaram-se 100 g de solo acondicionado

em recipientes plásticos para aplicação dos tratamentos; os materiais foram homogeneizados com o solo e a umidade foi mantida na capacidade de campo. Após incubação por períodos de 30 e 120 dias, foram realizadas determinações de pH, CTC e saturação por bases, segundo Raij et al. (2001).

Experimento com alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula)

As frações CF (< 0,5 mm) e CG (0,5-2 mm) foram misturadas homogeneamente em doses de 0, 10, 20 e 40 %, base de massa, do mesmo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, e acondicionadas em vasos de 10 L, para o cultivo da alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula) em casa de vegetação. No plantio, as sementes foram inoculadas com *Rhizobium meliloti*. Os vasos foram irrigados por lâmina d'água, mantendo a umidade do solo próximo da capacidade de campo.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em esquema fatorial $2 \times 3 + 1 + 2$, com três repetições, consistindo em 27 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram dos RCD-R classe A em duas granulometrias (CF e CG), com as doses 10, 20 e 40 %, mais o tratamento testemunha (dose 0 %) e dois tratamentos adicionais com calagem convencional com calcário em dois níveis de saturação por bases, $V = 60$ e $V = 80$ %.

Após um período de incubação de 35 dias, foi realizada a primeira amostragem (A) dos solos dos vasos na camada superficial para análise química de fertilidade, segundo métodos descritos por Raij et al. (2001). Foram cultivadas cinco plantas de alfafa por vaso. No plantio, realizaram-se adubações com P (superfosfato triplo, 48 % P_2O_5) e micronutrientes (FTE-BR12), nas doses de 128 e 21 mg kg^{-1} , respectivamente. A adubação potássica foi realizada 20 dias após a germinação e após cada corte na dose de 42 mg kg^{-1} de K, utilizando o KCl (60 % K_2O) como fonte.

O primeiro corte foi realizado 100 dias após a semeadura na altura de 5 cm do solo, quando as plantas apresentavam aproximadamente 10 % de florescimento. Para a avaliação da produção de matéria seca, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 h. Na data do primeiro corte, foi realizada a segunda amostragem (B) do solo dos vasos na camada superficial para análise química. Realizaram-se mais seis cortes da alfafa, espaçados por aproximadamente 30 dias, sempre quando as plantas apresentavam em torno de 10 % de florescimento. Logo após o sétimo e último corte, foi realizada a terceira amostragem (C) do solo dos vasos para análise química. Nessa mesma data, foi amostrado também o solo do fundo dos vasos dos tratamentos com dose de 40 %, para avaliar a ocorrência de percolação de nutrientes para o fundo do vaso. Dessa forma, as amostragens foram realizadas nos seguintes instantes: A: 35 dias; B: 245 dias; e C: 425 dias após o início do experimento.

A análise estatística de significância da produção da matéria seca foi realizada pelo teste F a 5 % (ANOVA) e, para os atributos químicos de fertilidade do solo, para os diversos tratamentos, realizou-se pelo teste de Tukey a 5 % (ANOVA). Fez-se também uma análise de custos, comparando o valor final pago pelo produtor rural por tonelada de calcário e de RCDs-Rs, entregues em propriedades que distem até 20 km do centro do município de São Carlos, SP. Para levantamento do preço do calcário, foram consultadas três empresas de São Carlos e para levantamento do preço dos RCD-R, consultaram-se a Usina de Reciclagem da Prohab e as empresas que realizam o frete desse material no município de São Carlos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização e análise da variabilidade dos RCD-R cinza

Os resultados das análises de FRX das cinco amostras dos RCD-R cinza coletadas ao longo de um ano de produção da usina de reciclagem são apresentados no quadro 1. O elemento que mais se destacou foi o Si, com concentração de SiO_2 de aproximadamente 80 %, com coeficiente de variação (CV) muito baixo, da ordem de 2 %. Isto é coerente com o histórico desses resíduos, que são oriundos de concretos que, na elaboração deles, levam, em média, proporções entre 60 e 80 % de areia. De fato, espera-se que a maior limitação de uso do material como corretivo de acidez esteja nesse excesso de material inerte (SiO_2).

Além do Si, outro elemento que se destaca é o Ca com teor médio de quase 8 % de Ca na forma de óxido. Essa expressiva quantidade de Ca é proveniente do $CaCO_3$ do calcário presente no cimento *portland* e na cal hidratada, utilizados na elaboração de concretos e argamassas, lembrando que o calcário é uma das principais matérias-primas desses materiais de construção. O baixo teor de Mg detectado deve ter sua origem no $MgCO_3$ presente também no calcário, que pode conter teores variados de $MgCO_3$ (calcítico, magnésiano ou dolomítico). A presença de Al e Fe em baixos teores nos RCD-R cinza deve ter origem na argila utilizada na fabricação do cimento *portland*, conforme descrito anteriormente.

O coeficiente de variação (CV) entre as amostras coletadas ao longo de um ano foi relativamente baixo (< 20 %), para os principais elementos avaliados. Isso indica que existe razoável grau de padronização na produção de concretos e argamassas utilizados na construção civil, bem como no processo de separação e moagem da usina de processamento.

As cinco amostras de RCD-R cinza coletadas ao longo de um ano de produção da usina de reciclagem apresentaram padrões similares de difração de raios-X (DRX), cujo difratograma típico é apresentado na figura 1. Observou-se que foram detectadas apenas

Quadro 1. Caracterização química das amostras de cinza 1, 2, 3, 4 e 5, por fluorescência de raios-X (FRX), coletadas em diferentes épocas do ano,

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	LOI
Cinza 1	82,3	2,88	2,57	6,91	0,64	0,43	0,062	0,17	0,46	0,05	4,73
Cinza 2	78,9	3,21	2,57	7,50	0,68	0,45	0,063	0,18	0,40	0,07	5,16
Cinza 3	78,2	3,61	2,92	7,46	0,68	0,55	0,060	0,14	0,41	0,06	6,43
Cinza 4	81,2	2,63	2,21	8,39	0,63	0,34	0,045	< 0,1	0,26	0,07	5,32
Cinza 5	79,7	2,77	2,47	8,67	0,62	0,36	0,047	0,10	0,26	0,07	5,35
Média	80,1	3,02	2,55	7,79	0,65	0,43	0,06	0,15	0,36	0,06	5,40
DP	1,68	0,39	0,26	0,73	0,03	0,08	0,01	0,04	0,09	0,01	0,63
CV	2,1	13,0	10,0	9,3	4,4	19,5	15,7	24,4	25,8	14,0	11,6
LD	0,1	0,10	0,01	0,01	0,10	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01	

LOI: perda por ignição (loss on ignition); DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; e LD: limite de detecção da técnica para cada componente mineral.

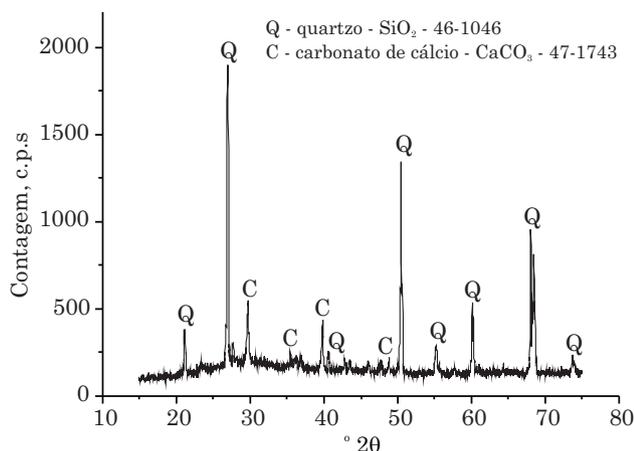


Figura 1. Difratograma de raios-X de uma amostra de RCD-R cinza.

as fases cristalinas de quartzo (SiO₂) e de carbonato de cálcio (CaCO₃), como esperado. Coerentemente com os resultados de FRX, os picos referentes ao quartzo foram os mais intensos. Não foram detectadas fases de silicatos de Al e Fe, o que é indicativo de que praticamente todo o Si presente está associado ao quartzo.

Esses resultados de FRX estão coerentes com os obtidos por Angulo (2005), o qual, em análise química por FRX de RCD-R cinza produzidos pela Usina de Reciclagem de Itaquera, SP, em faixa granulométrica semelhante a deste trabalho, obteve teores dos principais óxidos (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO e MgO), muito próximos aos aqui alcançados. A análise mineralógica por DRX, realizada por Angulo (2005) em RCD-R cinza, apresentou que a sílica é o mineral preponderante e detectou também linhas de calcita, albita e microclínio.

No quadro 2, apresentam-se os resultados dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT das amostras cinza

1, 2 e 3, coletadas em diferentes épocas do ano. Os valores mínimos desses índices exigidos pela legislação brasileira para registro e comercialização de corretivos de pH do solo são de 38, 67 e 45 %, respectivamente. Os valores obtidos nessa análise para as amostras dos RCD-R cinza, estão muito aquém dos requeridos pela legislação, deixando claro que são insuficientes para o registro e comercialização dos RCD-R cinza, como corretivo de pH do solo. Entretanto, deve-se fazer a seguinte ressalva: o valor requerido de PRNT pela legislação é calculado com base na reatividade do calcário, ou seja, é uma medida de quanto tempo cada tamanho de partícula de calcário leva para reagir no solo. Como não existem estudos que avaliam quanto tempo cada tamanho de partícula de RCD-R leva para reagir, o valor de PRNT obtido neste trabalho serve apenas como indicativo do poder de neutralização desse material.

Avaliação do pH, CTC e V% em experimento de incubação do solo com as frações CF e CG

Os resultados da evolução de pH, CTC e saturação por bases da mistura de solo (LVAd) com as frações CF e CG, após 30 e 120 dias de incubação, são apresentados na figura 2. Deve-se ressaltar que os valores das doses no eixo das abscissas referem-se aos tratamentos com as frações CF e CG (superior) e com o calcário (inferior); os tratamentos com RCD e calcário possuem escalas diferentes em função das doses específicas aplicadas.

Com base na figura 2a, observa-se que a dose de 5 % das frações CG e CF já pode ser considerada elevada, pois manteve o solo alcalino, mesmo após 120 dias de incubação. Essa dose representa 120 t ha⁻¹, considerando a densidade do solo de 1,2 g cm⁻³ e profundidade de 20 cm. Isso sugere que doses muito mais baixas que as utilizadas já seriam suficientes para corrigir o pH desse solo. Para doses mais elevadas, os valores de pH não aumentaram na mesma proporção, apresentando tendência de estabilização em

Quadro 2. Teores de CaO + MgO, poder de neutralização (PN) e poder relativo de neutralização total (PRNT) das amostras cinza 1, 2 e 3, coletadas em diferentes épocas do ano

Material	CaO + MgO	%	
		PN	PRNT
Cinza 1	7,9	19,6	13,1
Cinza 2	9,4	20,1	13,5
Cinza 3	8,6	20,4	13,7
Média	8,6	20,0	13,4
DP	0,8	0,4	0,3
CV	0,09	0,02	0,02

DP: desvio-padrão; e CV: coeficiente de variação.

torno de 7,7 para os tratamentos com as frações CF e CG e 6,5, para os com calcário. Observa-se também que o solo natural (dose 0 %) sofreu processo de acidificação nesses 90 dias que separam a primeira e a segunda amostragem (Figura 2), principalmente nas doses menores de calcário.

Pode-se verificar que, para os tratamentos com as frações CF e CG, a CTC apresentou comportamento crescente com a dose aplicada (Figura 2b), manifestando tendência de estabilização para doses superiores a 40 %. Os tratamentos com calcário proporcionaram incremento ínfimo na CTC em relação ao solo natural e, ainda assim, apenas para doses D3 e D4 de calcário (6 e 8 t ha⁻¹), o que reforça a ideia de que as doses D1 e D2 eram realmente muito baixas. Notou-se que, mesmo para a dose mais baixa de 5 % das frações CF e CG, os valores de CTC situam-se em faixa bastante satisfatória entre 150 e 200 mmol_c dm⁻³. Entretanto, deve-se notar que no caso dos RCD-R, a CTC que está sendo medida é a do material, já que foi misturado em altas proporções ao solo. Já no calcário, o efeito é mais químico.

Em todos os tratamentos com as frações CF e CG, a saturação por bases (V%) (Figura 2c) apresentou comportamento muito semelhante e fortemente crescente com a dose aplicada para uma faixa de doses bem baixas (abaixo de 5 %), estabilizando-se em torno do valor de 98 %, para doses superiores a 10 %. Entretanto, os tratamentos com calcário apresentaram também comportamento crescente com a dose aplicada, estabilizando em torno do valor de 79 % para doses superiores a 6 t ha⁻¹ (D3).

Notou-se que, mesmo para a dose mais baixa, de 5 %, das frações CF e CG, os valores da saturação por bases (V%) são bastante elevados, situando-se em torno de 95 %. A fim de detalhar melhor a região de doses abaixo de 5 % para os tratamentos com CF e CG, os valores médios de V% desses tratamentos foram ajustados por uma função exponencial do tipo $V\% = C + A(1 - \exp(-k))$, em que d é a dose aplicada (%) e A, C e k são constante que podem ser obtidas, por exemplo, pelo método não-linear de mínimos quadrados

(Wraith & Or, 1998), usando a ferramenta *solver* do *Excel (Microsoft®)* (valores ajustados: A = 81, C = 17 e k = 1,5). Assim, pode-se estimar, com essa função interpolada, que com uma dose de 1 % já se atinge um nível de saturação por bases de 80 %. Essa proporção de 1 % é equivalente a uma dose de 24 t ha⁻¹ de RCD-R.

Experimento com cultura de alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula)

No quadro 3, são apresentados os valores médios das três amostragens (A, B e C), do pH (CaCl₂), dos teores de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e H+Al, da capacidade de troca de cátions (CTC), da saturação por bases (V%) e P_{resina} na camada 3-5 cm dos solos dos vasos, referentes aos nove tratamentos utilizados. Por esses resultados, infere-se que todos os tratamentos com RCD-R apresentaram o mesmo valor pH de, aproximadamente, 7,6, diferenciando-se dos tratamentos com calcário e solo natural. O pH do tratamento com calcário a V = 60 % não se diferenciou, estatisticamente, do solo natural e o tratamento com calcário a V = 80 % apresentou um pH intermediário de 6,2. Dessa forma, os RCD-R cinza foram eficazes em neutralizar a acidez do solo natural que, originalmente, era bastante ácido (pH de 4,6), superando a ação da calagem convencional com calcário. Entretanto, observou-se que as doses de RCD-R aplicadas foram muito altas, a ponto de alcalinizar ligeiramente o solo.

Os RCD-R aplicados adicionaram Mg²⁺ e, principalmente, Ca²⁺ ao solo, proporcionando elevação significativa da CTC. Em geral, os efeitos observados de elevação do pH e da CTC do solo com a aplicação de RCD-R estão coerentes com o descrito por Ramalho et al. (2009), que também observaram esses mesmos efeitos em um estudo de caracterização química de RCD-R e de compostos obtidos, adicionando-o ao solo em diversas doses.

Os tratamentos com RCD-R apresentaram redução do teor de H+Al, o que, somado à elevação da CTC, proporcionou intensa elevação da V%, que ficou no patamar de 98 %. Observou-se que esse valor de V% foi, estatisticamente, igual para todos os tratamentos com RCD-R, o que indica saturação, reforçando a ideia de que as doses aplicadas foram realmente muito altas.

A adição dos RCD-R ao solo, estatisticamente, não teve influência sobre as concentrações dos nutrientes K e P_{resina}.

Na figura 3, é apresentado o gráfico da média da produção de matéria seca (MS) de alfafa, por vaso, referente ao total acumulado dos sete cortes, em função das doses das frações CF e CG dos RCD-R aplicados. Os valores de MS obtidos, tanto nos tratamentos com CF como com CG, em todas as doses aplicadas, foram superiores aos alcançados com o solo natural (testemunha) e também superiores aos obtidos nos

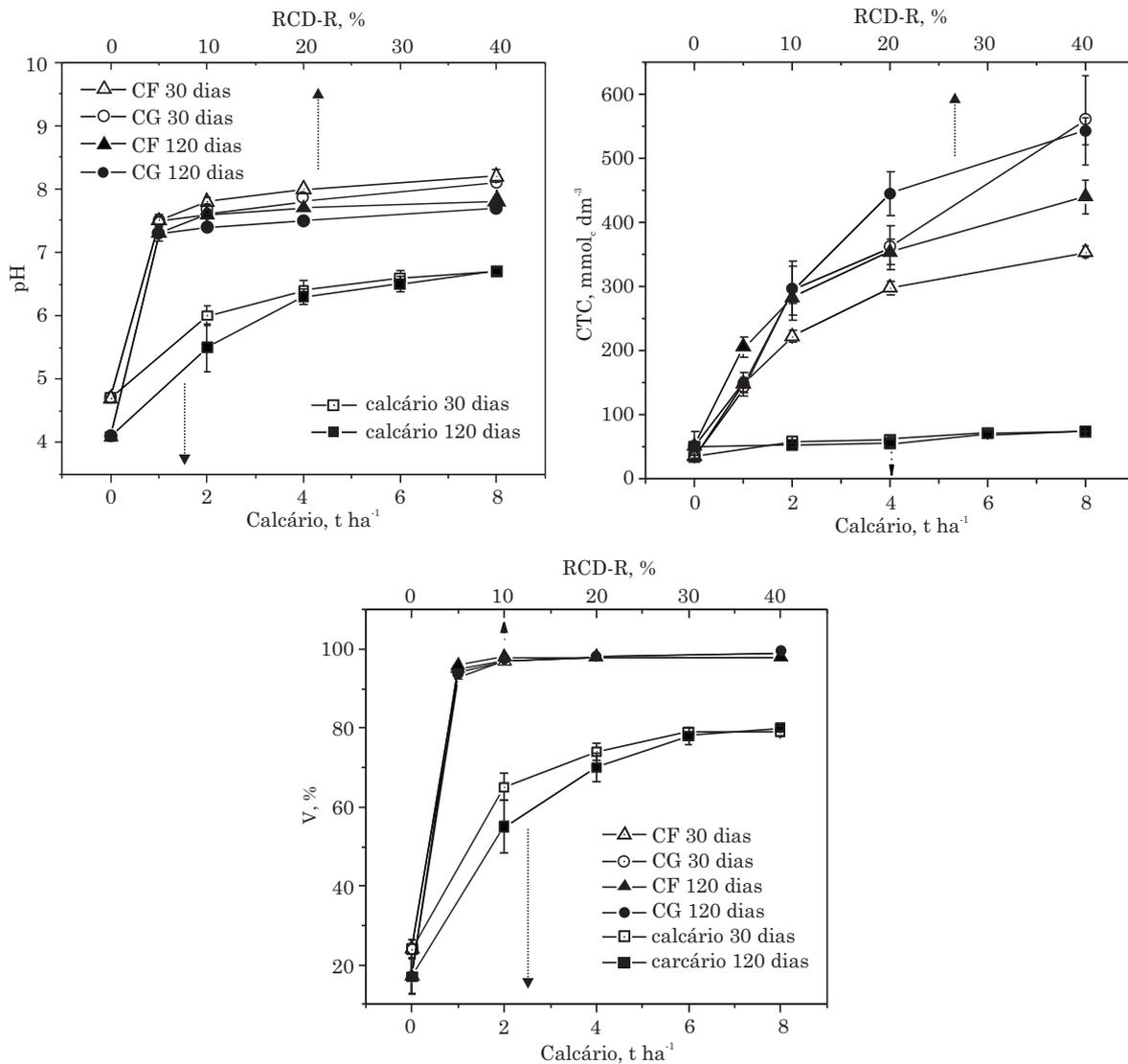


Figura 2. Valores de pH (a), de CTC (b) e de V (c) em função das doses de RCD-R, nos tratamentos CF 30 dias, CG 30 dias, CF 120 dias e CG 120 dias, e de calcário aos 30 e 120 dias.

Quadro 3. Valores médios das três amostragens (A, B e C), do pH, dos teores de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e H+Al, da capacidade de troca de cátions (CTC), da saturação por bases (V%) e P_{resina} na camada 3-5 cm dos solos dos vasos

Tratamento	pH	mmol _c dm ⁻³				CTC	V	P _{resina}
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	H+Al			
Solo	4,6 c	15 c	5 b	6 a	36 a	63 c	40 c	74 a
CF - 10 %	7,5 a	259 bc	7 b	1 a	9 b	277 b	97 a	36 a
CF - 20 %	7,7 a	332 ab	9 ab	3 a	8 b	352 ab	98 a	52 a
CF - 40 %	7,8 a	409 ab	16 ab	7 a	6 b	438 ab	98 a	106 a
CG - 10 %	7,6 a	268 bc	9 ab	2 a	8 b	287 b	97 a	71 a
CG - 20 %	7,6 a	388 ab	12 ab	2 a	7 b	409 ab	98 a	63 a
CG - 40 %	7,8 a	584 a	22 a	5 a	7 b	618 a	99 a	93 a
V = 60 %	5,4 bc	25 c	11 ab	6 a	30 a	72 c	59 b	40 a
V = 80 %	6,2 b	27 c	13 ab	3 a	25 a	68 c	63 b	50 a

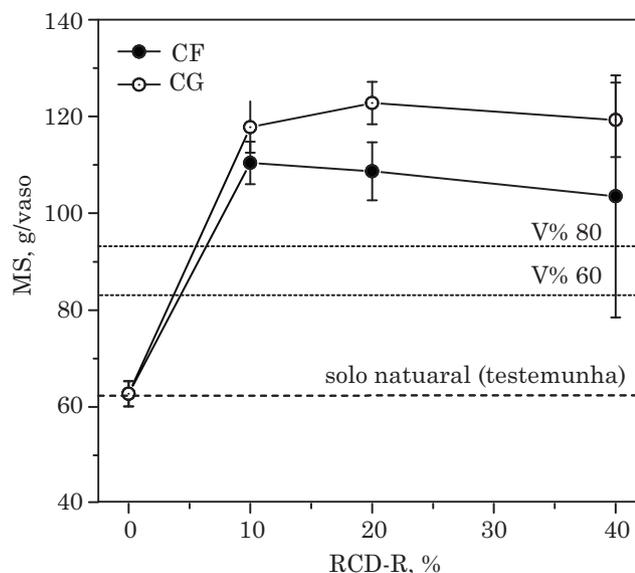


Figura 3. Produção média de matéria seca de alfafa (MS), por vaso, acumulada até o sétimo corte, em função das doses das frações CF e CG aplicadas, comparada aos tratamentos testemunha com dose 0% (solo apenas) e calagem convencional com calcário nos níveis V = 60 e V = 80%.

tratamentos com calagem convencional com calcário V% 60 e V% 80. O maior valor alcançado foi para a fração cinza grossa na dose de 20% (CG20), que apresentou MS 96% superior ao do tratamento testemunha e 32% superior ao do tratamento com calcário V% 80, que é o nível de saturação por bases normalmente recomendado para a alfafa (Moreira et al., 2007).

O desempenho da fração CG foi superior ao da CF, para todas as doses aplicadas. Esse fato está coerente com os resultados da análise química de fertilidade (Quadro 3), em que os tratamentos com a fração CG foram os que apresentaram os maiores valores de CTC. Isso se deu, provavelmente, pela maior lixiviação de nutrientes para o fundo do vaso para o caso da fração cinza fina (CF). Nas medidas de CTC de amostras de solo do fundo dos vasos, na amostragem C, para os tratamentos CF40 e CG40, obtiveram-se 502 e 488 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente. Entretanto, a CTC desses mesmos tratamentos do solo, amostrados na camada 3-5 cm, foi de 280 e 419 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente. Portanto, a CTC de fundo de vaso do tratamento CF40 foi 80% maior que a da camada 3-5 cm, enquanto a CTC de fundo de vaso do tratamento CG40 foi apenas 16% maior que a da camada 3-5 cm. Isso evidencia o fato de que o material CF migrou no perfil, concentrando-se no fundo do vaso.

O fato de o desempenho dos tratamentos com a fração CG ter sido superior ao da CF é interessante por dois motivos: primeiro porque a fração CG tem menor custo de obtenção que a CF, pois foi alcançada por peneiramento direto do material produzido pela

usina de reciclagem, enquanto a produção da fração CF requereu uma moagem adicional, consumindo mais tempo e energia. Em segundo lugar, como a fração CG possui granulometria mais grossa, terá menor reatividade, tendo, portanto, maior tempo de permanência no solo, ou seja, maior efeito residual.

Os resultados de MS, tanto para os tratamentos com a fração CF como para os com a fração CG, não são significativamente diferentes em relação às doses aplicadas, segundo o teste de ANOVA (teste F), a 5%; isto é, a produção de matéria seca de alfafa é, estatisticamente, a mesma para as doses 10, 20 e 40% das frações CF ou CG. Tanto é que, com a dose de 10%, a MS já atingia o patamar dos valores máximos obtidos, o que reforça a ideia de que as doses aplicadas foram muito altas; provavelmente doses menores já proporcionassem desempenhos bastante satisfatórios.

Considerando-se a dose de 1% em massa, obtida por ajuste de uma função exponencial nos dados de V%, para tratar a camada de 0-20 cm de profundidade com de aplicação extensiva no campo, seriam necessárias 24 t ha^{-1} das frações CF ou CG, considerando a densidade do solo igual a 1,2 g cm^{-3} . Nesse caso, o custo do frete poderia inviabilizar tal aplicação.

Em razão das altas doses necessárias para aplicação dos RCD-R cinza como corretivo do solo em culturas extensivas, aplicações urbanas como jardinagem, gramados de praças e campos de futebol, na composição de substratos para plantio em vasos ou na preparação de covas para culturas permanentes, podem ser algumas aplicações potenciais.

Em um levantamento realizado no município de São Carlos, SP, verificou-se que o preço final dos RCD-R, incluindo o frete até distâncias de, no máximo, 20 km da cidade, seria de R\$ 17,00 por tonelada. Entretanto, no caso do calcário, o preço da tonelada entregue nas mesmas condições seria, em média, de R\$ 60,00, isto é, 3,5 vezes o valor do primeiro. Esse dado pode tornar a aplicação dos RCD-R cinza financeiramente viável em alguns casos de propriedades próximas aos centros produtores de RCD-R.

Também há diferença dos RCD-R em relação ao calcário, pois a geração do primeiro ocorre de forma distribuída em todos os municípios, enquanto o segundo é produzido apenas nas áreas de mineração de calcário. No Brasil, a distribuição geográfica das reservas de calcário é muito irregular, com grandes extensões nas regiões central e litorânea e apenas pequenos afloramentos nas regiões do extremo norte e sul do país (Neri, 2007). Como o custo do frete é o que tem maior impacto no custo final, tanto dos RCD-R como do calcário, a geração mais distribuída do primeiro tende a baratear, em média, o seu frete.

Embora os resultados apresentados sejam favoráveis e não tenham sido detectados contaminantes potencialmente perigosos em concentrações acima dos valores de alerta nos RCD-R produzidos pela Usina de

Reciclagem da Prohab, no município de São Carlos, deve-se observar que não há regulamentação sobre a aplicação de RCD-R na agricultura. Também, aspectos importantes, e que devem ser mais bem estudados, são relativos à variabilidade da composição dos RCD-R gerados em diferentes regiões do país, do ponto de vista dos contaminantes e efeitos cumulativos de sucessivas aplicações no longo prazo.

Por fim, é importante notar que os resultados potencialmente se reproduziriam em resíduos de gesso (gipsita). Nos RCD estão também incluídos esses resíduos que até pouco tempo eram enquadrados como classe C pelo Conama, ou seja, resíduos sem tecnologias de reciclagem/recuperação economicamente viáveis. Com o desenvolvimento de técnicas de reciclagem apropriadas, os resíduos de gesso foram reenquadrados como classe B, ou resíduos recicláveis para outras destinações (Conama, 2011), o que abre possibilidades para a reciclagem desses resíduos, com aplicações do material reciclado em várias áreas como: produção de cimento, reutilização pelas fábricas de gesso cartonado ou ainda para serem transformados em gesso agrícola para correção do solo e fonte adicional de enxofre (NOVA..., 2011).

CONCLUSÕES

1. Os RCD-R cinza são compostos por cerca de 80 % de quartzo, material que não tem função corretiva de acidez do solo; a parte ativa (CaO e MgO) corresponde, aproximadamente, a 8,5 %. Sugeriu-se que, no futuro, sejam investigados e testados processos simples de separação e retirada do quartzo, visando à concentração da parte mais reativa do material, gerando maior agregação de valor ao material e consequente redução dos custos de transporte.

2. Os RCD-R cinza na forma atual não atingiram os níveis de PN, PRNT e dos teores de CaO e MgO necessários para registro como corretivo de acidez do solo, sendo necessárias doses elevadas para se obterem os efeitos de correção desejados.

3. A utilização dos RCD-R cinza em plantas de alfafa, em doses superiores a 24 t ha⁻¹, foi eficiente em corrigir o pH do solo, elevar a CTC e saturação por bases e proporcionar significativos ganhos de produtividade.

4. Os RCD-R sem remoagem (fração CG) apresentaram o melhor desempenho na produção de matéria seca de alfafa do que no material finamente moído em laboratório.

5. Os resultados evidenciaram bom potencial do uso dos RCD-R para uso agrícola como corretivo da acidez do solo, mas indicaram também a necessidade de pesquisas adicionais com materiais provenientes de outras regiões do país, o estudo dos efeitos em outros solos e culturas, as avaliações como material para mudas e covas, o desenvolvimento de processos de separação da

parte inerte do material (quartzo) e as avaliações adicionais mais detalhadas de impacto ambiental.

AGRADECIMENTOS

À Usina de Reciclagem da Prohab, São Carlos, pelo fornecimento do material RCD-R cinza classe A utilizado neste estudo; e à Embrapa (02.07.06.003.00), ao CNPq (484575/2007-4 e 301057/2009-5) e ao CENA/USP, pelos apoios financeiro e de pessoal.

LITERATURA CITADA

- ANGULO, S.C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005. 149p. (Tese de Doutorado)
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 27, de 05 de junho de 2006. Aprova os limites máximos de agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas admitidos nos fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes destinados à agricultura. DOU, n.110, 9. jun. 2006.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Instrução Normativa DAS nº 28 de 27 de julho de 2007, dispõe sobre manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos. DOU, jul. 2007.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 431 de 24 de maio de 2011. Altera o art. 3º. da Resolução nº 307 / 2002. DOU, 25 maio 2011.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção. DOU, 17 jul. 2002.
- GESTÃO ambiental de resíduos da construção civil: A experiência do SindusCon-SP. São Paulo, Obra limpa, I&T, SindusCon-SP, 2005. 48p.
- JONES, D.L.; CHESWORTH, S.; KHALID, M. & IQBAL,Z. Assessing the addition of mineral processing waste to green waste-derived compost: An agronomic, environmental and economic appraisal. J. Bioresour. Technol., 100: 770-777, 2009.
- LASSO, P.R.O. Avaliação da utilização de resíduos de construção civil e de demolição reciclados (RCD-R) como corretivos de acidez e condicionadores de solo. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 2011. 122p. (Tese de Doutorado)
- MARTINS, A.; MARCONDES, C.G.; MADI, F.; NEVES, I.F.; AOKI, J.; TOKUDOME, N. & MERCADÉ, S.R. Cimento: Treinamento de mão de obra para construção civil. Curitiba, Cia de Cimento Itambé, 2008. 22p. (Apostila)

- MELLO FILHO, C.H.R. Estudo de caracterização e aplicação dos resíduos sólidos gerados na fabricação de precipitado de carbonato de cálcio como corretivo da acidez do solo. Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, 2005. 118p. (Dissertação de Mestrado)
- MOREIRA, A.; BERNARDI, A.C.C.; RASSINI, J.B.; FERREIRA, R.P. & OLIVEIRA, P.P.A. Fertilidade do solo e estado nutricional da alfafa cultivada nos trópicos. São Carlos, Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 40p. (Documentos, 67)
- NERI, A.C. Avaliação da eficácia de medidas de recuperação ambiental em mineração de calcário para cimento. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2007. 239p. (Dissertação de Mestrado)
- NOVA resolução do Conama define que gesso é totalmente reciclável. [S. l.]: Portal Fator Brasil, 2011. Disponível em: <http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=160684>. Acesso em: 30 ago. 2012.
- RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285p.
- RAMALHO, A.M. & PIRES, A.M.M. Viabilidade do uso agrícola de resíduo da construção civil e da indústria cerâmica: atributos químicos. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA - CIIC, 3., Campinas, 2009. Anais... Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2009. CD-ROM
- SANTOS, E.C.G. Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado. São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007. 168p. (Dissertação de Mestrado)
- WRAITH, J.M. & OR, D. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. J. Nat. Resour. Life Sci. Educ., 27:13-19, 1998.