



Aproveitamento de lodo de esgoto urbano como substrato para produção de mudas de cedro australiano (*Toona ciliata*) e aroeira pimenteira (*Schinus terebinthifolius*)

Use of urban sewage sludge as a substrate for the production of Australian red cedar (*Toona ciliata*) and Brazilian pepper (*Schinus terebinthifolius*) seedlings

L. C. do C. S. Carvalho; C. A. da C. Martins; I. A. Amaral; A. A. de C. Peres; F. S. dos Santos*

Departamento de Engenharia de Agronegócios, Universidade Federal Fluminense, 27255-125, Volta Redonda-RJ, Brasil

*fabianasoaes@id.uff.br

(Recebido em 20 de dezembro de 2021; aceito em 26 de setembro de 2022)

O lodo de esgoto, de acordo com o processo de higienização o qual é submetido, tem potencial para uso na agricultura, para o fornecimento de matéria orgânica e nutrientes aos vegetais. O trabalho teve como objetivo avaliar o aproveitamento do lodo de esgoto como componente de substrato para produção de mudas de cedro australiano e aroeira pimenteira, após um tratamento de estabilização alcalina. O lodo de esgoto, associado com vermiculita ou substrato comercial, compôs os substratos em diferentes proporções (0, 25, 50, 75 e 100%). Após a colheita, foram analisados parâmetros de desenvolvimento e teores de nutrientes nas mudas. A adição de lodo de esgoto reduziu o desenvolvimento das mudas de cedro australiano, provavelmente devido ao seu elevado pH após estabilização alcalina, o que levou a redução nas concentrações de potássio e, principalmente, fósforo disponíveis no substrato. Na aroeira pimenteira, a adição de lodo de esgoto até a proporção de 50%, favoreceu o desenvolvimento das mudas, demonstrando assim uma menor exigência ao P trocável. A orçamentação parcial demonstrou que para o cultivo de mudas de cedro australiano não se recomenda a substituição do substrato comercial por qualquer combinação estudada contendo lodo de esgoto. Já no cultivo de mudas de aroeira pimenteira, recomenda-se a utilização de 25% ou 50% de lodo de esgoto, com o melhor resultado financeiro para o tratamento contendo 25% de lodo de esgoto e 75% de substrato comercial.

Palavras-chave: estabilização alcalina, nutrientes, orçamento parcial comparativo.

The sewage sludge, according to the hygiene process to which it is submitted, has potential for use in agriculture, given the supply of organic matter and nutrients to vegetables. The objective of this study was to evaluate the use of urban sewage sludge, as a substrate component for the production of Australian red cedar and Brazilian pepper seedlings, after an alkaline stabilization treatment. The sewage sludge - associated with vermiculite or commercial substrate - composed the substrates in different proportions (0, 25, 50, 75 e 100%). After harvest, seedling development parameters and nutrient contents were analyzed. The addition of sewage sludge reduced the development of the Australian red cedar seedlings, probably due to its high pH after alkaline stabilization, which reduced the concentrations of potassium and, mainly, phosphorus available in the substrate. For Brazilian pepper seedlings, it is observed that the addition of sewage sludge up to the proportion of 50%, favored the development of the seedlings, thus demonstrating a lower demand for Brazilian pepper to the presence of exchangeable P. Partial budgeting has shown that for the cultivation of Australian red cedar seedlings it is not recommended to replace the commercial substrate with any studied combination containing sewage sludge. In the cultivation of Brazilian pepper seedlings, the use of 25% or 50% of sewage sludge is recommended, with the best financial result for the treatment containing 25% sewage sludge and 75 % commercial substrate.

Keywords: alkaline stabilization, nutrients, comparative partial budget.

1. INTRODUÇÃO

O uso de lodo de esgoto na composição de substratos para produção de mudas de espécies florestais é considerado uma alternativa promissora em função de seu importante valor como condicionador de solo, sendo fonte de matéria orgânica e nutrientes essenciais à planta, além da redução dos custos de produção. Diversos trabalhos apontam alternativas seguras e sustentáveis

para destinação do lodo de esgoto, capazes de minimizar os impactos negativos e mesmo reduzir os custos da destinação, como a sua utilização nos segmentos da agricultura e silvicultura [1-4]. Siqueira et al. (2019) [5] estudando diferentes proporções de lodo de esgoto em substrato para produção de mudas de *Plathymenia reticulata*, observaram que a proporção de 20% de lodo de esgoto resultou em melhor crescimento das mudas, obtendo padrão de crescimento semelhante à produção em substrato comercial. Abreu et al. (2018) [6] avaliando a utilização de lodo de esgoto como substrato na produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* mostraram que o uso do lodo de esgoto como substrato favoreceu o crescimento das mudas quando comparado ao substrato comercial.

No entanto, o gerenciamento adequado do uso do lodo é essencial para potencializar seus efeitos benéficos e minorar seus efeitos adversos [7, 8]. Esse gerenciamento deve considerar aspectos que vão desde a avaliação da presença de contaminantes, da quantidade e a forma dos nutrientes contidos no lodo, o tipo de cultivo e a necessidade de adoção de tratamentos eficientes a fim de alcançar significativa remoção de agentes patogênicos e compostos tóxicos.

Diferentes tratamentos são recomendados para a desinfecção do lodo de esgoto, tais como secagem térmica, pasteurização, estabilização alcalina [9, 10]. Essas recomendações e outras exigências estão legisladas na Resolução Nº 498, de 19 de agosto de 2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), e trata-se do instrumento em vigor para o uso agrícola de lodo de esgoto [9].

O cedro australiano (*Toona ciliata*) é uma espécie exótica cujo cultivo tem se ampliado no Brasil, onde os plantios concentram-se, principalmente, na região sudeste, com destaque para os estados do Espírito Santo e Minas Gerais [11]. Alguns autores destacam a carência de dados e informações que contemplem acerca da absorção e exigências nutricionais de *T. ciliata*, condições químicas e físicas do meio de cultivo, assim como a recomendação para calagem e adubação adequada [12-14]. A aroeira-pimenteira (*Schinus terebinthifolius*), por sua vez, é amplamente recomendada para recomposição florestal, incluindo matas ciliares, em razão de sua característica pioneira e de facilidade de dispersão. Possui distribuição tropical e subtropical, sendo originária da América do Sul e largamente distribuída por todo território brasileiro, estendendo-se desde Pernambuco até Rio Grande do Sul. Não apresenta elevada exigência nutricional e hídrica, mas responde de forma significativa ao aporte de nutrientes por meio de adubações [15].

Além da eficiência agrônômica, o uso de lodo de esgoto na composição de substratos pode reduzir os custos de produção de mudas de espécies florestais. Quando se deseja fazer uma alteração em parte de um processo produtivo ou em alguma etapa de um sistema de produção de determinada atividade, resultando em novos valores monetários para a receita e para o custo operacional, recomenda-se a aplicação da técnica da orçamentação parcial [16]. Esta técnica permite gerar resultados econômicos relevantes que devem ser considerados na tomada de decisão. Trabalhos recentes realizados nos segmentos de Agronegócio e Meio Ambiente [17-19], demonstraram a aplicabilidade desta técnica, com resultados diretos a economicidade de sistemas produtivos.

O objetivo do presente estudo foi avaliar o potencial de uso do lodo de esgoto urbano como componente do substrato para desenvolvimento de mudas de cedro australiano (*Toona ciliata*) e aroeira pimenteira (*Schinus terebinthifolius*), bem como avaliar a eficiência orçamentária parcial das proporções das misturas de lodo de esgoto com vermiculita e substrato comercial no desenvolvimento das duas espécies florestais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Estabilização alcalina do lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado no experimento é proveniente de uma estação de tratamento de esgoto do município de Volta Redonda-RJ e foi coletado após um período de quatro meses disposto em leito de secagem pavimentado. Após a coleta, foram realizadas as avaliações microbiológicas iniciais, a fim de caracterizá-lo para agentes patogênicos (coliformes

termotolerantes, *Salmonella* e ovos viáveis de helmintos). A determinação de coliformes termotolerantes e *Salmonella*, foi realizada segundo metodologia proposta pela USEPA Part 503 [20] e para ovos de helmintos foi utilizada a Norma Técnica da CETESB L5.551 [21].

Como critério para redução de atratividade de vetores foi realizado o processo de estabilização química com cal hidratada. Na estabilização alcalina adicionou-se cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) nas porcentagens de 0, 5, 10, 20, 30, 40 e 50% na mistura com lodo de esgoto, sendo os percentuais de cal determinados a partir do peso seco do lodo. As amostras foram acondicionadas em copos de poliestireno de 300 mL, distribuídas em um delineamento estatístico inteiramente casualizado, com sete tratamentos e quatro repetições. Foi feita a análise de quais eram as concentrações suficientes para que o pH se elevasse até no mínimo 12, em pelo menos duas horas, havendo uma leitura a cada 30 minutos, permanecendo acima de 11,5 por mais 22 horas [9]. A determinação do pH foi realizada em CaCl_2 , conforme metodologia proposta por Quaggio e Raij (2001) [22].

No pós-tratamento, a amostra que demonstrou resultado efetivo (30% de cal hidratada na mistura com lodo de esgoto), com menor proporção de cal e manutenção do pH acima de 12 por no mínimo duas horas, permanecendo acima de 11,5 por mais 22 horas [9], foi avaliada para coliformes termotolerantes segundo método USEPA part 503 [20] e vírus entéricos sob as normas técnicas da CETESB L5.504 [23] e L5.506 [24]. De posse dos resultados satisfatórios, ou seja, que atendiam a legislação para uso agrícola, com redução eficiente de coliformes termotolerantes em virtude da higienização, foram iniciadas a estabilização com cal do lodo de esgoto total tomando o ensaio supracitado como referência. Seguindo-se um período de incubação aproximado de um mês e meio, e finalmente, o preparo dos substratos e ensaio de cultivo de *Toona ciliata* e *Schinus terebinthifolius*.

2.2 Cultivo das espécies vegetais

O lodo de esgoto foi misturado, em diferentes proporções, com vermiculita e substrato comercial (substrato padrão para cultivo de mudas de espécies florestais composto de casca de pinus, fibra de coco, turfa fibrosa, vermiculita, carvão e adubos NPK e micronutrientes), com a finalidade de avaliar o melhor desenvolvimento das mudas das espécies vegetais. Os tratamentos adotados foram: T1 – 75% vermiculita + 25% lodo de esgoto; T2 – 50% vermiculita + 50% lodo de esgoto; T3 – 25% vermiculita + 75% lodo de esgoto; T4 – 100% substrato comercial; T5 – 75% substrato comercial + 25% lodo de esgoto; T6 – 50% substrato comercial + 50% lodo de esgoto; T7 – 25% substrato comercial + 75% lodo de esgoto e T8 – 100% lodo de esgoto.

O experimento foi disposto adotando-se o delineamento estatístico inteiramente casualizado com oito tratamentos e três repetições, totalizando, 24 unidades experimentais.

Os diferentes tratamentos foram acondicionados em sacos plásticos para mudas (15 cm x 35 cm), umedecidos na capacidade de campo, determinada pelo método de saturação seguida por drenagem livre, e incubados por um período de 30 dias. Posteriormente, foram coletadas amostras para análise de fertilidade nos diferentes tratamentos, bem como, foi realizada a semeadura das espécies vegetais.

Amostras de substrato dos oito tratamentos foram coletadas, secas, homogeneizadas e passadas em peneira com malha de 2 mm. Foram analisados os valores de pH em CaCl_2 através da metodologia proposta por Quaggio e Raij (2001) [22]. As análises de alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K) trocáveis, fósforo assimilável (P), além do valor Hidrogênio + Alumínio trocável (H+Al) foram realizadas segundo metodologia de Donagema et al. (2011) [25]. Os teores totais de nitrogênio, carbono orgânico (Corg) e enxofre foram analisados pelo medidor Elementar CHNOS Vario Macro Cube. As análises para fósforo, potássio, cálcio e magnésio totais foram efetuadas conforme metodologia proposta por Tedesco et al. (1995) [26].

Sementes das espécies vegetais, cedro australiano (*Toona ciliata*) e aroeira pimenteira (*Schinus terebinthifolius*), foram plantadas nos diferentes tratamentos, sendo umedecidas diariamente e mantidas sob condições de casa de vegetação no campus Aterrado da

Universidade Federal Fluminense (Volta Redonda-RJ), até atingirem entre 40 e 50 cm de altura. O tempo de cultivo do cedro australiano totalizou 210 dias e para a aroeira pimenteira foram 170 dias.

Nas plantas foram avaliados os seguintes parâmetros de desenvolvimento das mudas: diâmetro do colo, altura da parte aérea (do nível do substrato até a gema apical através de régua graduada), além da biomassa seca radicular e da parte aérea.

Após a coleta, as plantas foram separadas em raízes e parte aérea, determinadas a massa fresca das amostras e levadas ao Laboratório de Solos e Água da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (UFF), onde foram lavadas, acondicionadas em sacos de papel, secas em estufa com circulação forçada de ar, mantidas em temperatura de 65 °C por 72 horas. Posteriormente foram registrados os valores para massa seca da raiz e parte aérea e então, trituradas para posterior análise química. As avaliações para nutrientes totais (N, S, P, K, Ca e Mg) foram realizadas nas plantas coletadas de acordo com Tedesco et al. (1995) [26].

Os resultados da composição química dos substratos e da raiz e parte aérea das plantas foram submetidos à análise de variância através do software estatístico SISVAR[®] e as diferenças entre as médias foram submetidas ao teste de Tukey a 5% de probabilidade.

2.3 Orçamentação parcial

Para a realização da análise, determinaram-se os componentes financeiros (receita e custo operacional) necessários para a comercialização e o cultivo das mudas de cedro australiano e aroeira pimenteira, em escala experimental. A receita foi definida como sendo aquela advinda com a produção das mudas, obtida a partir da medição da altura (cm), proveniente do seu crescimento e que foi mensurada na avaliação de campo. O valor da receita foi obtido em relação ao crescimento da muda, em cm, calculando o seu preço de venda com base no valor comercial da muda para ambas as espécies. Na composição do custo operacional foram considerados os valores monetários necessários para aquisição de sementes (g), compra de substrato comercial (kg), vermiculita (litros), lodo de esgoto (kg) e a embalagem para o cultivo (unidade). Todos os preços do produto e dos insumos foram cotados no mercado local, em lojas especializadas, considerando as características do produto e dos insumos e o referido preço ofertado ao consumidor, entre os meses de janeiro e fevereiro de 2019.

De posse dos valores monetários levantados adotou-se a metodologia da orçamentação parcial proposta por Hoffmann et al. (1992) [16] para avaliação dos tratamentos, classificando-os entre receita e custo operacional, determinando-se a relação custo-benefício. Esta metodologia é recomendada e foi utilizada por diversos autores [17, 27] em estudos que visam avaliar uma mudança em algum processo produtivo e não em um sistema de produção, com a substituição parcial ou total de um item no processo produtivo. Neste estudo, promoveu-se a substituição do substrato tradicionalmente empregado pelo uso de lodo de esgoto em proporções variadas, considerando os benefícios e os custos envolvidos, quando da substituição no cultivo de mudas.

A partir do resultado observado aceitou-se (positivo) ou rejeitou-se (negativo) a substituição do tratamento controle (100% de substrato comercial) pelo tratamento que adotou a mistura que utiliza o lodo de esgoto. O melhor tratamento recomendado para o cultivo das mudas de espécies florestais foi aquele que apresentou o maior resultado positivo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estabilização alcalina do lodo de esgoto

Na Figura 1, são apresentados os valores médios de pH durante as duas horas iniciais de incubação no ensaio de estabilização alcalina do lodo de esgoto.

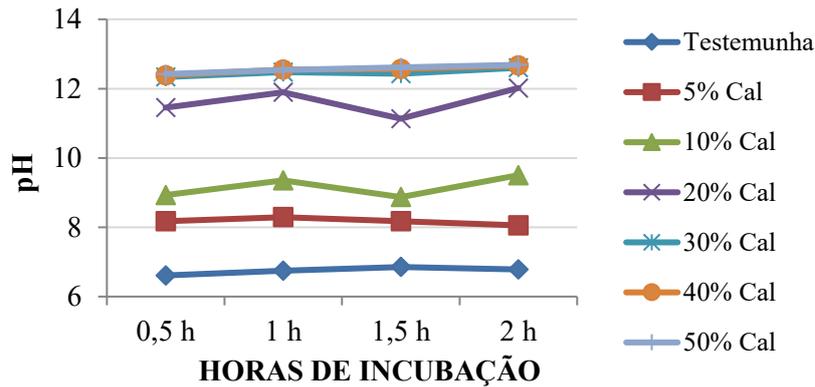


Figura 1: Valores médios de pH ao longo do tempo de incubação do lodo de esgoto após caleação com diferentes porcentagens de cal hidratada.

Observa-se que, no intervalo de duas horas, o comportamento do pH refletiu certa estabilidade, visto que não houve quedas ou elevações repentinas nos valores (Figura 1). Através desses resultados nota-se que os tratamentos contendo 30% ou mais em adição de cal alcançaram pH superior a 12, nas primeiras 2 horas. Além disso, o pH permaneceu acima de 11,5 por mais 22 horas. Esses três tratamentos de maior proporção de cal (30, 40 e 50%), inclusive, demonstraram-se similares no intervalo de tempo avaliado. Os resultados são corroborados na literatura, mostrando o efeito do tratamento alcalino usando cal na eficiência do processo [28, 29].

Com relação aos resultados microbiológicos (Tabela 1), antes da estabilização alcalina verificou-se ausência de *Salmonella* sp.; <1 ovos viáveis de helmintos/g de sólidos totais; e o equivalente à 2400 NMP/g em coliformes termotolerantes.

Tabela 1: Concentrações de agentes patogênicos presentes no lodo de esgoto pré e pós-estabilização alcalina com 30% de cal hidratada.

Estabilização alcalina		Resultado	Unidade
Pré	<i>Salmonella</i> sp.	ausência	--
	Ovos viáveis de helmintos	<1	Ovos / 4 g de ST
	Coliformes Termotolerantes	$2,4 \times 10^3$	NMP / g
Pós	Vírus entéricos	ausência	--
	Coliformes Termotolerantes	<3,0	NMP / g

NMP: Número mais provável; ST: sólidos totais.

Após a desinfecção com cal, a amostra do tratamento com adição de 30% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do peso seco do lodo, foi avaliada para coliformes termotolerantes e vírus entéricos, os quais apresentaram os resultados de <3,0 NMP/g e ausência, respectivamente. Desse modo, os resultados apresentaram-se compatíveis às especificações definidas na legislação [9] para o seu uso agrícola.

Costa et al. (2018) [29] concluíram que a caleação do lodo, na proporção de 50 % em função de seu peso úmido, diminuiu a concentração de coliformes termotolerantes para abaixo dos limites estabelecidos pela legislação.

3.2 Caracterização química dos substratos

As análises químicas dos teores totais e trocáveis de nutrientes, sódio e pH nos substratos dos tratamentos contendo diferentes proporções de lodo de esgoto, vermiculita e substrato comercial são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Teores totais e trocáveis dos atributos químicos em substratos contendo diferentes proporções entre lodo de esgoto (L), vermiculita (V) e substrato comercial (S) no pré-plantio.

Teores Totais								
Tratamentos	Corg	N	S	P	K	Ca	Mg	pH
%	-----			g kg ⁻¹	-----			CaCl ₂
75 V: 25 L	137,7 d	19,50 c	3,69 c	5,15 a	3,02 a	256,6bc	19,75 a	7,77 a
50 V: 50 L	156,2 c	20,53 b	5,77 b	5,03 a	2,52 a	290,9 b	20,35 a	7,81 a
25 V: 75 L	176,1 b	22,40 a	8,58 a	4,71 a	3,02 a	210,5 d	15,50 a	7,90 a
100 S	159,9 c	11,27 e	2,98 c	0,86 d	1,52 b	153,2 e	3,17 b	5,55 c
75 S: 25 L	164,1bc	15,90 d	6,23 b	2,59 c	1,52 b	250,4 c	4,64 b	7,33 b
50 S: 50 L	175,7 b	17,60 d	7,82 ab	4,19 b	3,02 a	258,8bc	6,42 b	7,80 a
25 S: 75 L	194,2 a	22,17ab	9,80 a	4,95 a	3,02 a	284,1 b	7,22 b	7,91 a
100 L	176,6 b	21,37ab	9,20 a	4,83 a	3,02 a	369,3 a	7,68 b	7,62 ab

Teores Trocáveis								
Tratamentos	Na	Ca	Mg	H+Al	Al	K	P	
	-----			cmol _c dm ⁻³	-----		mg L ⁻¹	-----
75 V: 25 L	0,47 c	16,37 c	8,33 a	0,00 b	0,00 a	1125 e	719 c	
50 V: 50 L	0,98 b	32,50 b	1,33 c	0,00 b	0,00 a	2010 d	210 e	
25 V: 75 L	1,34 a	38,17 a	0,67 c	0,00 b	0,00 a	2565 d	291 d	
100 S	0,12 d	8,53 d	2,75 bc	25,03 a	0,00 a	5800 a	2565 a	
75 S: 25 L	0,57 c	20,83bc	3,25 b	0,83 b	0,00 a	4437 b	1338 b	
50 S: 50 L	0,90 b	30,83 b	1,00 c	0,00 b	0,00 a	3397 c	589 c	
25 S: 75 L	1,34 a	33,17 b	0,38 c	0,00 b	0,00 a	3374 c	176 e	
100 L	1,40 a	39,50 a	2,33 bc	0,00 b	0,00 a	3143 c	188 e	

Todos os valores correspondem a uma média de três repetições.

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, considerando o valor nominal de 5% de significância.

Para os teores totais de nutrientes, observa-se contribuição do lodo de esgoto nas concentrações de N, S, P, K e Ca quando comparado ao substrato comercial (Tabela 2). Esses resultados mostram o potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas, como pode ser observado em diversos trabalhos [3, 30, 31].

Os maiores teores de Mg foram observados nos substratos contendo misturas com vermiculita, provavelmente devido à própria composição do material, um alumínio silicato hidratado de magnésio, ferro e alumínio. Os maiores valores de H + Al no tratamento contendo 100% de substrato comercial provavelmente ocorreu devido à grande quantidade de ácidos orgânicos presentes neste material. A estabilização alcalina do lodo de esgoto, como forma de redução de patógenos, levou ao aumento expressivo do pH em todos os tratamentos contendo lodo de esgoto e reduziu os teores de H+Al em todas as porcentagens utilizadas na mistura com o substrato (Tabela 2).

Quando se compara os teores trocáveis nos diferentes tratamentos (Tabela 2), observa-se redução significativa nas concentrações de K e, principalmente, P no lodo de esgoto, em comparação ao substrato comercial puro (100 S), o que refletiu na redução dos teores desses nutrientes nas diferentes misturas contendo lodo de esgoto. Essa redução nas concentrações trocáveis de K e P, apesar dos elevados teores totais desses elementos, provavelmente ocorreu devido ao elevado pH do lodo de esgoto. Em solos com pH elevado, o fósforo é insolubilizado como fosfato de cálcio [32] e, possivelmente esse efeito foi observado no presente trabalho.

3.3 Desenvolvimento dos vegetais

Em relação às variáveis de crescimento e biomassa das mudas de cedro australiano (Tabela 3), evidencia-se que o tratamento contendo 100% de substrato comercial alcançou resultados superiores aos demais, demonstrando que o desenvolvimento de mudas de cedro australiano foi favorecido pelo uso do substrato comercial puro. Sendo assim, a mistura de lodo de esgoto com substrato comercial ou com vermiculita, nas concentrações estudadas, não favoreceu o aumento no desenvolvimento das mudas de cedro australiano.

Tabela 3: Parâmetros de desenvolvimento das mudas de cedro australiano e aroeira pimenteira produzidas com diferentes proporções entre lodo de esgoto (L), vermiculita (V) e substrato comercial (S).

Tratamentos	Altura	Diâmetro	H/D	BSPA	BSR
%	cm	mm		g	
Cedro australiano					
75 V: 25 L	15,50 cd	2,50 c	6,2 b	0,96 c	0,24 b
50 V: 50 L	9,75 d	2,00 c	4,9 cd	0,24 d	0,11 c
25 V: 75 L	28,25 b	3,75 b	7,5 ab	2,23 b	0,30 b
100 S	51,50 a	5,75 a	9,0 a	5,50 a	0,83 a
75 S: 25 L	22,25 c	3,25 bc	6,9 ab	1,55 bc	0,35 b
50 S: 50 L	8,55 d	2,00 c	4,3 d	0,27 d	0,08 c
25 S: 75 L	11,40 d	2,00 c	5,6 c	0,34 d	0,10 c
100 L	12,60 d	2,00 c	6,3 b	0,40 d	0,07 c
Aroeira pimenteira					
75 V: 25 L	45,3 a	0,47 a	96,0 a	1,99 a	0,33 a
50 V: 50 L	38,00 ab	0,35 ab	107,9 a	1,40 ab	0,31 a
25 V: 75 L	23,00 c	0,27 b	88,3 a	0,65 c	0,15 b
100 S	31,67 b	0,33 ab	94,0 a	0,69 c	0,20 b
75 S: 25 L	41,7 ab	0,43 a	95,9 a	1,29 b	0,19 b
50 S: 50 L	39,00 ab	0,37 ab	108,0 a	1,27 b	0,25 b
25 S: 75 L	16,33 c	0,20 c	81,7 a	0,29 c	0,12 b
100 L	17,67 c	0,23 bc	75,6 a	0,37 c	0,16 b

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, considerando o valor nominal de 5% de significância.

H/D - relação entre altura e diâmetro; BSPA - biomassa seca de parte aérea; BSR - biomassa seca de raiz.

Uma das implicações para os resultados observados no desenvolvimento das mudas pode relacionar-se ao pH dos substratos (Tabela 2), que pode atuar em diversos aspectos da nutrição mineral da planta, pois condiciona a disponibilidade dos macro e micronutrientes no solo. Todos os substratos que continham lodo de esgoto em alguma proporção estudada apresentaram resultados para pH superiores a 7,3 e dessa maneira, de condição levemente alcalina. Nos estudos de Lima et al. (2015) [13] e Oliveira et al. (2015) [33] que abrangem o cultivo de *Toona ciliata*, verifica-se o uso de solos com valores de pH equivalentes a 5,9 e 5,2 respectivamente.

Além disso, o tratamento 100% substrato comercial apresentou as maiores concentrações de fósforo assimilável (Tabela 2), o que pode ter beneficiado no desenvolvimento das mudas. O cedro australiano é uma espécie de elevada exigência nutricional, sobretudo fósforo. Moretti et al. (2011) [12] avaliaram a demanda nutricional de mudas de *Toona ciliata* por meio da técnica do elemento faltante e puderam concluir que o fósforo é o elemento de maior exigência pela espécie, levando em consideração a produção de matéria seca da parte aérea. Oliveira et al. (2016) [14] avaliando o crescimento e desenvolvimento de cedro australiano em doses de nitrogênio, fósforo e potássio equivalentes a 50, 75, 100, 125 e 150% da recomendação para *Eucalyptus*, encontraram que o maior desenvolvimento do cedro foi atingido nas doses equivalentes a 150%, evidenciando a maior exigência nutricional dessa espécie.

Com relação a aroeira pimenteira, verifica-se que o maior desenvolvimento das mudas foi observado no tratamento contendo mistura de 75% de vermiculita e 25% de lodo de esgoto, seguido pelos tratamentos contendo proporções de até 50% de lodo de esgoto nas misturas com vermiculita e substrato comercial (Tabela 3). Esses resultados evidenciam que o lodo de esgoto contribuiu com o desenvolvimento das mudas até a proporção de 50%, provavelmente devido as maiores concentrações de N e Ca presentes no lodo. No entanto, a partir de 75% as mudas já reduzem o seu desenvolvimento, provavelmente devido ao aumento do pH nessas misturas e redução da concentração de nutrientes disponíveis (Tabela 2). Com esses resultados, verifica-se uma menor dependência da aroeira pimenteira à presença de P trocável em comparação com o cedro australiano, não respondendo em redução de desenvolvimento com a redução desse nutriente na forma trocável.

3.4 Teores de macronutrientes nos vegetais

Os resultados quantitativos das análises químicas dos macronutrientes observados nas plantas de cedro australiano desenvolvidas nos diferentes substratos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Teores totais de macronutrientes contidos em parte aérea e radicular de mudas de cedro australiano produzidas com diferentes proporções entre lodo de esgoto (L), vermiculita (V) e substrato comercial (S).

Tratamentos	N	S	P	K	Ca	Mg
%	g kg ⁻¹					
Parte aérea						
75 V: 25 L	34,8 a	2,67 c	18,2 ab	42,1 ab	3,31 b	5,17 a
50 V: 50 L	25,8 ab	2,50 c	12,7 c	43,6 ab	5,49 a	3,40 c
25 V: 75 L	28,4 ab	3,97 b	12,6 c	35,6 b	4,89 ab	3,78 c
100 S	24,7 ab	2,77 c	21,1 a	43,5 ab	3,64 ab	3,46 c
75 S: 25 L	30,0 ab	2,10 d	15,1 b	37,8 b	4,65 ab	4,86 b
50 S: 50 L	27,4 ab	3,15 b	12,2 c	46,5 a	5,43 a	3,23 c
25 S: 75 L	24,0 b	4,90 ab	11,9 c	36,7 b	5,27 a	3,58 c
100 L	29,1 ab	6,83 a	12,4 c	38,9 b	5,41 a	3,34 c
Raiz						
75 V: 25 L	16,2 a	7,60 ab	8,87 a	46,5 a	6,27 c	4,85 a
50 V: 50 L	15,4 ab	4,45 d	3,81 c	46,7 a	9,51 b	3,72 b
25 V: 75 L	16,0 ab	5,00 d	7,95 ab	41,5 ab	8,80 b	4,86 a
100 S	11,6 b	6,77 c	9,62 a	25,5 c	2,64 e	1,42 c
75 S: 25 L	13,7 b	7,27 ab	5,88 b	33,3 b	4,88 d	1,98 c
50 S: 50 L	13,3 b	7,50 ab	0,72 d	18,61 d	15,82 a	3,54 b
25 S: 75 L	14,6 b	7,03 b	2,35 c	40,8 ab	5,08 d	4,10 a
100 L	9,9 c	8,69 a	0,08 d	29,6 c	7,70 bc	2,29 c

Todos os valores correspondem a uma média de três repetições.

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, considerando o valor nominal de 5% de significância.

Pode-se destacar que as maiores concentrações de P, tanto na parte aérea quanto nas raízes, foram encontradas no tratamento 100% substrato comercial. Esses resultados podem ter relação direta com o maior desenvolvimento das mudas nesse tratamento (Tabela 3), enfatizando a importância da disponibilidade de P, para sua absorção e desenvolvimento de mudas de cedro australiano. Fontes et al. (2013) [34] avaliando a produção de biomassa e a eficiência nutricional de quatro espécies arbóreas, incluindo *T. ciliata*, em resposta à fertilização fosfatada, verificaram que 150 dias após o transplantio das mudas, o cedro australiano foi a espécie com

menor taxa de produção de massa seca total (0,4 g planta⁻¹) em solos com baixos teores de P (5 mg dm⁻³), representando a espécie de menor adaptação nessa condição em detrimento das demais espécies arbóreas estudadas.

Assim como observado para o cedro australiano, as concentrações de P na parte aérea e raiz de aroeira pimenteira também foram significativamente maiores no tratamento contendo somente substrato comercial (Tabela 5). Esses valores corroboram os maiores teores de P trocáveis presentes no substrato comercial, ficando mais biodisponíveis para a absorção pelas plantas. Apesar dos maiores teores de P presentes nas plantas contendo somente substrato comercial, isso não refletiu no maior desenvolvimento das plantas nesses tratamentos (Tabela 3), mostrando uma menor exigência a esses elementos pela aroeira pimenteira quando comparado ao cedro australiano.

Tabela 5: Teores totais de macronutrientes contidos em parte aérea e radicular de mudas de aroeira pimenteira produzidas com diferentes proporções entre lodo de esgoto (L), vermiculita (V) e substrato comercial (S).

Tratamentos	N	S	P	K	Ca	Mg
%	g kg ⁻¹					
Parte aérea						
75 V: 25 L	18,9 c	3,54 a	9,56 b	26,29 ab	7,10 a	2,81 a
50 V: 50 L	20,2 b	3,03 a	4,66 c	22,98 ab	7,96 a	2,38 ab
25 V: 75 L	21,5 b	3,17 a	2,06 d	19,09 b	7,50 a	2,09 ab
100 S	18,3 c	3,13 a	21,12 a	27,73 a	2,08 c	1,75 b
75 S: 25 L	19,9 c	3,00 a	4,51 c	21,00 ab	6,45 b	2,27 ab
50 S: 50 L	22,1 b	3,03 a	4,13 c	22,98 ab	8,49 a	2,34 ab
25 S: 75 L	22,9 ab	3,19 a	1,11 d	17,15 b	9,57 a	1,75 b
100 L	26,8 a	3,35 a	0 d	19,39 b	6,17 b	1,89 b
Raiz						
75 V: 25 L	8,3 e	1,20 c	9,67 b	13,24 b	0,60 c	3,45 a
50 V: 50 L	11,8 c	1,66 b	0,90 c	12,54 b	0,82 c	2,41 b
25 V: 75 L	13,6 b	2,12 a	0 d	14,13 ab	2,54 a	1,69 c
100 S	6,8 f	1,66 b	11,55 a	16,70 a	1,23 b	0,87 e
75 S: 25 L	9,6 d	1,58 b	1,01 c	14,17 ab	1,93 ab	1,08 e
50 S: 50 L	10,3 d	1,45 b	1,01 c	12,54 b	1,65 b	1,34 d
25 S: 75 L	12,4 c	1,18 c	0 d	8,14 c	0 c	1,02 e
100 L	16,2 a	2,26 a	0 d	9,60 c	2,53 a	1,66 c

Todos os valores correspondem a uma média de três repetições.

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, considerando o valor nominal de 5% de significância.

3.5 Avaliação da orçamentação parcial

Os valores monetários obtidos para o cultivo de mudas do cedro australiano na substituição parcial ou total do substrato comercial por lodo de esgoto associado ou não a vermiculita foram negativos (Tabela 6). Ao analisar os valores monetários obtidos para o cultivo de aroeira pimenteira, os resultados foram positivos quando substituiu-se em 25% e 50% o substrato comercial por lodo de esgoto associado ou não a vermiculita (Tabela 6).

Tabela 6: Valores monetários líquidos obtidos pelo método da orçamentação parcial, considerando a substituição de 100% substrato comercial para o emprego de diferentes substratos no cultivo de cedro australiano e aroeira pimenteira.

Tratamentos (%)	Total
Cedro australiano	
100 L	-R\$ 18,63
75 L : 25 V	-R\$ 13,85
75 L : 25 S	-R\$ 23,07
50 L : 50 V	-R\$ 26,57
50 L : 50 S	-R\$ 24,89
25 L : 75 V	-R\$ 24,75
25 L : 75 S	-R\$ 17,09
Aroeira pimenteira	
100 L	-R\$ 8,78
75 L : 25 V	-R\$ 6,40
75 L : 25 S	-R\$ 10,21
50 L : 50 V	R\$ 3,23
50 L : 50 S	R\$ 6,36
25 L : 75 V	R\$ 7,11
25 L : 75 S	R\$ 7,93

V: Vermiculita; S: Substrato comercial; L: Lodo de esgoto.

Por apresentarem valores monetários negativos não se recomenda o uso do lodo de esgoto, nas doses estudadas, na produção de mudas de cedro australiano, uma vez que os custos foram maiores que os benefícios obtidos com a substituição parcial ou total do substrato comercial pelo lodo de esgoto associado ou não a vermiculita, rejeitando-se assim todas as combinações de cultivo. Essa condição pode ser explicada pelo baixo crescimento das mudas de cedro australiano, onde a receita obtida não foi suficiente para cobrir os custos operacionais de produção. Esta condição corrobora os resultados obtidos para o desenvolvimento das mudas, onde foi observado que houve influência do pH, que apresentou-se alcalino e, conseqüentemente, das menores concentrações de P trocável (Tabela 2). Esta condição exerceu influência direta no crescimento das mudas, retardando seu desenvolvimento, o que afetou diretamente a receita obtida, que não foi suficiente para cobrir os custos operacionais de produção.

Para o cultivo de aroeira pimenteira, recomenda-se a produção de mudas utilizando a proporção de 25% ou 50% de lodo de esgoto associado ou não a vermiculita, em substituição parcial ou total do substrato comercial. A combinação que apresentou o melhor resultado financeiro para a produção de mudas de aroeira pimenteira foi aquela em que se utilizou 25% de lodo de esgoto associado a 75% de substrato comercial, demonstrando que os benefícios foram superiores aos custos, quando realizada a substituição parcial do substrato comercial pelo lodo de esgoto.

Dentre as quatro combinações (25% L: 75% S; 25% L: 75%V; 50% L: 50% S e 50%L:50%V), por ordem de importância (Tabela 6) que apresentaram resultados positivos pela análise da orçamentação parcial cabe considerar a discussão mercadológica, onde a mudança no processo produtivo de mudas da aroeira pimenteira será definida em função dos preços de mercados dos insumos necessários para a produção. Ressalta-se que na condição em que a estação de tratamento de esgoto tenha uma grande produção de lodo de esgoto, pode-se recomendar o uso da proporção que utiliza 50% de lodo na mistura, para que se promova o maior escoamento do lodo de esgoto. Outra condição é se o preço de mercado do substrato comercial estiver elevado, recomenda-se o aumento na proporção de uso de lodo de esgoto, reduzindo assim o custo com aquisição do substrato comercial. Por outro lado, em condições que o preço do substrato comercial estiver menor, ou ainda, que o volume de lodo de esgoto tratado for baixo, pode-se lançar mão das misturas que utilizam somente 25% de lodo de esgoto na combinação. Nas duas condições, é importante que o gestor da unidade faça a tomada de

decisão para a utilização de 25% ou 50% do lodo de esgoto na mistura, considerando o volume disponível do lodo de esgoto nas unidades de tratamento e o preço de compra dos insumos necessários para a produção de mudas, objetivando sempre a redução do custo operacional de produção e o fornecimento constante de produto (mudas) para ser comercializado.

4. CONCLUSÃO

A estabilização alcalina do lodo de esgoto utilizando 30% (peso seco) de cal hidratada foi eficiente para reduzir as concentrações de coliformes termotolerantes.

A adição do lodo de esgoto com cal hidratada em todas as doses com vermiculita e substrato comercial elevou o pH da mistura e reduziu o desenvolvimento das mudas de cedro australiano, devido a baixa disponibilidade de P.

As doses de lodo de esgoto com cal hidratada para a produção de mudas de aroeira pimenteira (*Schinus terebinthifolius*) em combinações com vermiculita e substrato comercial não devem ultrapassar de 50% na mistura.

A combinação entre 25% de lodo de esgoto associado a 75% de substrato comercial foi aquela que apresentou a maior relação custo-benefício para a produção de mudas de aroeira pimenteira.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo auxílio financeiro ao projeto, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de estudo e ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Volta Redonda (SAAE-VR) pela disponibilização do lodo de esgoto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kacprzak M, Neczaj E, Fijalkowski K, Grobelak A, Grosser A, Worwag M, et al. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environm Res.* 2017 Jul;156:39-46. doi: 10.1016/j.envres.2017.03.010
2. Lamastra L, Suciú NA, Trevisan M. Sewage sludge for sustainable agriculture: contaminants' contents and potential use as fertilizer. *Chem Biol Technol Agric.* 2018 May;5:10-15. doi: 10.1186/s40538-018-0122-3
3. Tsadilas CD, Hu Z, Bi Y, Nikoli T. Utilization of coal fly ash and municipal sewage sludge in agriculture and for reconstruction of soils in disturbed lands: results of case studies from Greece and China. *Int J Coal Sci Technol.* 2018 Apr;5(1):64-9. doi: 10.1007/s40789-018-0202-9
4. Mendonça AMC, Dias GS, Nascimento AVS, Campos JA, Santana MC, Silva Júnior CD, et al. Utilização do lodo de esgoto na produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae). *Sci Plena.* 2019;15(8):081201. doi: 10.14808/sci.plena.2019.081201
5. Siqueira DP, Barroso DG, Carvalho GCMW, Erthal RM, Rodrigues MCC, Marciano CR. Lodo de esgoto tratado na composição de substrato para produção de mudas de *Plathymenia reticulata* Benth. *Ciênc Florest.* 2019 Apr-Jun; 29(2):728-39. doi: 10.5902/1980509827297
6. Abreu AHM, Oliveira RR, Abel ELS, Lima Filho P, Leles PSS. Biossólido e substrato comercial na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia*. *Pesq Flor Bras.* 2018;38:1-10. doi: 10.4336/2018.pfb.38e201501066
7. Rastetter N, Gerhardt A. Toxic potential of different types of sewage sludge as fertiliser in agriculture: ecotoxicological effects on aquatic and soil indicator species. *J Soils Sediments.* 2015 Mar;15(3):565-77. doi: 10.1007/s11368-014-1031-0
8. Verlicchi P, Zambello E. Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: Occurrence and environmental risk in the case of application on soil — A critical review. *Sci Total Environ.* 2015 Dec;538:750-67. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.108
9. Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. *Diário Oficial da União.* 21 ago 2020;161(Seção 1):265-9. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>

10. Yoshida H, Nielsen MP, Scheutz C, Jensen LS, Christensen TH, Nielsen S, et al. Effects of sewage sludge stabilization on fertilizer value and greenhouse gas emissions after soil application. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*. 2015 Apr;65(6):506-6. doi: 10.1080/09064710.2015.1027730
11. Souza JCAV, Barroso DG, Carneiro JGA, Teixeira SL, Balbinot E. Propagação vegetativa de cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roemer) por miniestaquia. *Rev Árvore*. 2009;33(2):205-13. doi: 10.1590/S0100-67622009000200002
12. Moretti BS, Furtini Neto AE, Pinto SIC, Furtini IV, Magalhães CAS. Crescimento e nutrição mineral de mudas de cedro australiano (*Toona ciliata*) sob omissão de nutrientes. *Cerne*. 2011 Dez;17(4):453-63. doi: 10.1590/S0104-77602011000400003
13. Lima KB, Riter Netto AF, Martins MA, Freitas MSM. Crescimento, acúmulo de nutrientes e fenóis totais de mudas de cedro australiano (*Toona ciliata*) inoculadas com fungos micorrízicos. *Ciênc Florest*. 2015 Oct-Dec;25(4):853-62. doi: 10.5902/1980509820583
14. Oliveira JR, Souza FVP, Silva UTG, Oliveira JR, Duarte NF, Pinto SIC. Crescimento e desenvolvimento do cedro australiano em diferentes doses de nitrogênio, fósforo e potássio. *Sci Electron Arch*. 2016 Dez;9(3):11-6.
15. Neves EJM, Santos AM, Gomes JBV, Ruas FG, Ventura JA. Cultivo da aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi) para produção de pimenta-rosa. Colombo (PR): Embrapa Florestas; 2016.
16. Hoffmann R, Engler JJC, Serrano O, Thame ACM, Neves EM. Administração da Empresa Agrícola. 5. ed. São Paulo (SP): Pioneira; 1992.
17. Sabundjian MT, Arf O, Tarsitano MAA, Kaneko FH, Corsini DCDC. Análise econômica da adubação nitrogenada em feijoeiro de inverno sob plantio direto. *Pesq Agropec Trop*. 2014 Dez;44(4):349-56. doi: 10.1590/S1983-40632014000400005
18. Mota EP, Mendes FL, Shirota R. Viabilidade de implantação de ureias revestidas no cultivo de milho para o estado de São Paulo. *Rev iPecege*. 2015 Jan-Mar;1(1):22-38. doi: 10.22167/r.ipecege.2015.1.22
19. Vargas ALV, Lepsch LH, Peres AAC, Branco RF. Análise do custo operacional da produção de ácido láctico e de *Lactobacillus plantarum* CCT 0580, utilizando melão de cana-de-açúcar. *Rev Bras Ciênc Amb*. 2017 Dec;46(12):102-16. doi: 10.5327/Z2176-947820170168
20. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Technical support document for Part 503 pathogen and vector attraction reduction requirements in sewage sludge. Washington (USA): USEPA; 1992.
21. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. CETESB L5.551 – Ovos viáveis de *Ascaris* spp. - Determinação pela técnica de centrífugo-flutuação em amostras de lodo de esgoto. São Paulo (SP): CETESB; 2013.
22. Quaggio JA, Rajj BV. Determinação do pH em cloreto de cálcio e da acidez total. In: Rajj BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA, editores. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas (SP): Instituto Agronômico; 2001. p. 181-8.
23. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. CETESB L5.504 – Identificação de Enterovírus - Método de Ensaio. São Paulo (SP): CETESB; 1991.
24. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. CETESB L5.506 – Método de concentração de lodo de esgoto para isolamento de enterovírus. São Paulo (SP): CETESB; 1988.
25. Donagema GK, Campos DVB, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JHM. Manual de métodos de análise de solos. 2. ed. Rio de Janeiro (RJ): Embrapa Solos; 2011.
26. Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre(RS): Departamento de Solos, UFRGS; 1995.
27. Teixeira Filho MCM, Tarsitano MAA, Buzetti S, Bertolin DC, Colombo AS, Nascimento V. Análise econômica da adubação nitrogenada em trigo irrigado sob plantio direto no cerrado. *Rev Ceres*. 2010 Ago;57(4):446-53. doi: 10.1590/S0034-737X2010000400002
28. Matos MP, Matos AT. Dose de cal hidratada e características químicas de um lodo de esgoto doméstico submetido à caleação. *Engenharia na Agricultura*. 2012 Jul-Ago;20(4):357-63.
29. Costa TGA, Cunha LM, Iwata BF, Coelho JV, Santos JGP, Clementino GES. Tratamento alcalino de lodo de esgoto no preparo do biossólido como alternativa de adubo orgânico. *Multi-Science J*. 2018;1(13):374-7.
30. Bittencourt S, Serrat BM, Aisse MM, Gomes D. Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba Metropolitan Region, Paraná, Brazil. *Wat Air and Soil Poll*. 2014 Sep;225(9):2074-81. doi: 10.1007/s11270-014-2074-y
31. Abreu AHM, Marzola LB, Melo LA, Leles PSS, Abel ELS, Alonso JM. Urban solid waste in the production of Lafoensia pacari seedlings. *Rev Bras Eng Agríc Ambient*. 2017 Feb;21(2):83-7. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p83-87

32. Pantano G, Grosseli GM, Mozeto AA, Fadini PS. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. *Quim Nova*. 2016 Mai;39(6):732-40. doi: 10.5935/0100-4042.20160086
33. Oliveira JR, Souza, FVP, Silva UTG, Duarte NF, Pinto SIC. Saturação por bases para o cultivo do cedro australiano. *Global Sci Technol*. 2015 Mai-Ago;8(2):96-102. doi: 10.14688/1984-3801/gst.v8n2p96-102
34. Fontes AG, Gama-Rodrigues AC, Gama-Rodrigues EF. Eficiência nutricional de espécies arbóreas em função da fertilização fosfatada. *Pesq Flor Bras*. 2013 Jan-Mar;33(73):09-17. doi: 10.4336/2013.pfb.33.73.392