

## CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE ERVA-MATE INFLUENCIADOS PELA ADUBAÇÃO NITROGENADA, FOSFATADA E POTÁSSICA

### GROWTH AND NUTRITIONAL COMPOSITION OF *ERVA-MATE* AS AFFECTED BY NITROGEN, PHOSPHATE AND POTASSIUM FERTILIZATION

Delmar Santin<sup>1</sup> Eliziane Luiza Benedetti<sup>2</sup> Marília Camotti Bastos<sup>3</sup> Jéssica Fernandes Kaseker<sup>4</sup>  
Carlos Bruno Reissmann<sup>5</sup> Gilvano Ebling Brondani<sup>6</sup> Nairam Félix de Barros<sup>7</sup>

#### RESUMO

A ocorrência natural da erva-mate em solos ácidos e com baixa fertilidade natural, levou essa espécie a ser considerada de baixa exigência nutricional, principalmente em relação ao fósforo, embora pouco se conheça também sobre a exigência de N e K. Diante disto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento, teor de nutrientes no solo e em plantas jovens de erva-mate submetidas a doses de P combinadas com NK. Aplicou-se 0, 100, 200, 400 e 600 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> combinados com 0, 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O a um Latossolo Vermelho distrófico. Três mudas de erva-mate foram transplantadas para vasos com 2,9 dm<sup>3</sup> de solo. Aos 120 dias determinaram-se a altura, diâmetro do caule, comprimento e volume radicular e produção de matéria seca da parte aérea e radicular das mudas. Determinaram-se os teores de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn e Al das folhas e raízes, além do conteúdo de N, P, K, Ca e Mg. Amostras de solo foram submetidas à análise química. O crescimento da erva-mate foi afetado pela interação entre P e NK, demonstrando melhor crescimento quando o teor de P no solo estava entre 18,5 a 28,6 mg dm<sup>-3</sup> combinado com 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O. Em doses superiores a 400 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, as folhas passaram a apresentar clorose internerval, sintoma típico de deficiência de Fe. A ordem dos macronutrientes mais exigidos e que mais contribuíram para o crescimento da erva-mate foi P, N, K, Mg e Ca. A erva-mate cresce bem em solos com altos teores de P, mas depende da boa disponibilidade de N, K e Ca.

**Palavras-chave:** *Ilex paraguariensis*; interação nutricional; teor de nutrientes; raízes.

#### ABSTRACT

*Ilex paraguariensis* is considered a low P-requiring species because it grows naturally in soils with low P content, although no much information is also available for N and K requirements. This trial aimed to evaluate the effect of increasing P rates, combined with N and K rates on *Ilex paraguariensis* growth and its mineral composition. Phosphorus rates of 0, 100, 200, 400 e 600 mg dm<sup>-3</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were combined with 0, 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> of N e K<sub>2</sub>O. The fertilizers were mixed with the soil and placed in plastic pots of 2.9 dm<sup>3</sup>.

1. Engenheiro Florestal, Pós-doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina. Av. Luiz de Camões, CEP 88520-000, Lages (SC). Bolsista CNPq. [desantinflorestal@yahoo.com.br](mailto:desantinflorestal@yahoo.com.br)
2. Engenheira Agrônoma, Dra. Professora do Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, Campus Canoinhas, Av. Expedicionários, Bairro Campo da Água Verde, CEP 89460-000, Canoinhas (SC). [elibettiagro@yahoo.com.br](mailto:elibettiagro@yahoo.com.br)
3. Engenheira Agrônoma, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria, Campus - Bairro Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria (RS). [mcamotti@hotmail.com](mailto:mcamotti@hotmail.com)
4. Engenheira Agrônoma, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina. Av. Luiz de Camões, CEP 88520-000, Lages (SC). [jessikaseker@hotmail.com](mailto:jessikaseker@hotmail.com)
5. Engenheiro Florestal, Dr. Professor Sênior do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná, Rua dos Funcionários, 1540, CEP 80035-050, Curitiba (PR). [reissman@ufpr.br](mailto:reissman@ufpr.br)
6. Engenheiro Florestal, Dr. Professor do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, Bairro Boa Esperança, CEP 78060-900, Cuiabá (MT). [gebrondani@yahoo.com.br](mailto:gebrondani@yahoo.com.br)
7. Engenheiro Florestal, Dr. Professor do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, s/n, Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa (MG). Bolsista do CNPq. [nfbarros@ufv.br](mailto:nfbarros@ufv.br)

Recebido para publicação em 25/11/2010 e aceito em 28/11/2011

Seedlings of *Ilex* were transplanted to the pots and grown for 120 days. *Ilex* seedling growth was affected by the interaction of P and NK rates. The best P rate was between 18.5 and 28.6 mg dm<sup>-3</sup> and the highest growth was obtained when P was combined with 100 mg dm<sup>-3</sup> of N and K<sub>2</sub>O. Iron deficiency symptoms appeared at the P rates of 400 and 600 mg dm<sup>-3</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. It can be concluded that *Ilex* responds to increasing P rates, as long as plant N, K and Ca requirement is met.

**Keywords:** *Ilex paraguariensis*; nutritional interaction; nutrient content; roots.

## INTRODUÇÃO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) é nativa da região Sul do Brasil e, além de ser usada no tradicional chimarrão e tereré, bebidas típicas de algumas regiões do país, também é matéria-prima para produção de medicamentos, cosméticos, produtos de higiene dentre outros (MACCARI e MAZUCHOWSKI, 2000). A ocorrência da erva-mate em solos com baixos teores disponíveis de P, aliada ao baixo teor foliar deste nutriente, levou Reissmann et al. (1983) e Radomski et al. (1992) a considerá-la pouco exigente em P. No entanto, a resposta positiva a doses de P e nulas e/ou negativas a doses de N e K (SANTIN et al., 2008) sugerem a possibilidade de resposta à N, P e K, quando testados conjuntamente em função das interações entre nutrientes. A interação é uma ação mútua ou recíproca de um elemento sobre o outro em relação ao crescimento das plantas, podendo ser de ordem sinérgica ou antagônica no solo (OLSEN, 1983) e competitiva e não competitiva na planta (MARSCHNER, 1995), o que pode ocasionar diferentes respostas.

No solo, principalmente nos mais argilosos e intemperizados, ricos em oxi-hidróxidos de Fe e Al com pH ácido, a adsorção de P é alta (ROLIM NETO et al., 2004), e até 90 % do P aplicado pode assumir formas de reduzida labilidade (GONÇALVES et al., 1985; NOVAIS e SMYTH, 1999). Por outro lado, altos teores de P podem reduzir a disponibilidade de outros nutrientes, como é o caso do Fe e Zn (ABREU et al., 2007). No que se refere ao K, altos teores no solo podem inibir a absorção do Ca (ALVES et al., 1988) e Mg (FONSECA e MEURER, 1997). As interações do P com Zn, Fe e Cu (OLSEN, 1983) são normalmente antagônicas quando estes micronutrientes se encontram em baixos teores no solo (REDDY et al., 1978).

A capacidade de absorção e a eficiência de utilização de P pelas plantas são influenciadas por diferenças genotípicas dos vegetais (LUCA et al., 2002) e dependem da natureza, da concentração e interação de nutrientes na rizosfera (FAGERIA et al., 2009). Em solos deficientes em P, a assimilação de

N pelas plantas é limitada (RUFTY JR et al., 1990; ALVES et al., 1996) prejudicando seu metabolismo (MARSCHNER, 1995), no que tange, principalmente, à redução da absorção e translocação de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> das raízes para a parte aérea e acúmulo deste na raiz (JESCHKE et al., 1997). O P e o N interagem de forma sinérgica e, em doses adequadas, promovem aumentos na produção vegetal (SHUMAN, 1994). Em espécies arbóreas como a grábia (*Apuleia leiocarpa*), o aumento do teor foliar de N pode ser favorecido pela interação de NP, PK e pela interação tripla de NPK (NICOLOSO et al., 2007).

Em espécies florestais, normalmente os nutrientes mais limitantes ao crescimento são o N e o P (VENTURIN et al., 1996), bem como os mais exigidos (VENTURIN et al., 1999). Espécies com crescimento lento, adaptadas a solos de baixa fertilidade, têm baixa eficiência de utilização e são menos responsivas ao fornecimento de nutrientes (LAMBERS e POORTER, 1992). Mudanças de erva-mate responderam positivamente a P (SANTIN et al., 2008) e, em solo pobre no nutriente, o crescimento foi beneficiado até a dose de 447,5 mg kg<sup>-1</sup> de P. Por outro lado, doses isoladas de N e K superiores a 100 mg kg<sup>-1</sup> mostraram ação depressiva sobre as mudas. O desbalanço de nutrientes no solo é um dos principais fatores limitantes ao crescimento vegetal (MORTVEDT e KHASAWNEH, 1986), por afetar o metabolismo das plantas (DECHEN e NACHTIGALL, 2007).

O conhecimento sobre a nutrição e respostas da erva-mate à adubação ainda é restrito. Por isso, o objetivo desse trabalho foi avaliar a influência da adubação fosfatada, combinada com a nitrogenada e potássica, no crescimento, teor de nutrientes no solo e em plantas jovens de erva-mate.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento, instalado em julho de 2007, foi conduzido em casa de vegetação da UFPR em Curitiba - PR. Na casa de vegetação havia controle de temperatura (máxima de 32 °C), mas não de umidade. No estudo utilizaram-se mudas de erva-mate (*Ilex*

*paraguariensis* St. Hil.) propagadas por sementes de matrizes nativas do município de São Mateus do Sul - PR. A produção das mudas foi realizada no viveiro da Empresa Baldo S/A do mesmo município.

Os tratamentos foram compostos por combinações de doses de P (0, 100, 200, 400 e 600 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) com N e K (0, 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O). Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial (5x3), com cinco doses de P três de NK, dispostos no delineamento blocos casualizados com quatro repetições. Cada unidade experimental foi composta por um vaso com 2,9 dm<sup>3</sup> de solo contendo três mudas de erva-mate.

As fontes de P, N e K foram, respectivamente, superfosfato triplo, ureia e cloreto de potássio, as quais foram incorporadas e homogeneizadas ao solo na instalação do experimento. Quando as mudas apresentaram altura média de aproximadamente 5 cm, três foram transferidas para vaso de polietileno de 15,5 cm de altura com capacidade de 3 dm<sup>3</sup>, contendo 2,9 dm<sup>3</sup> de Latossolo Vermelho distrófico, com densidade de 1 kg dm<sup>-3</sup>, coletado em plantio de erva-mate na profundidade de 0 a 20 cm (Tabela 1).

As mudas foram irrigadas com água desionizada, conforme a necessidade. Após 120 dias da instalação do experimento, determinaram-se a altura total (HT); diâmetro do colo (DC); comprimento (CR) e volume radicular (VR); massa seca aérea (MAS (folha+caule)), radicular (MSR) e total (MST (folha+caule+raiz)); teor e conteúdo de elementos na folha e raiz da planta.

A HT foi medida com régua (cm) do nível do solo ao ápice das plantas e, o DC, medido com paquímetro (mm) a 0,5 cm do solo. O VR e CR das raízes foram obtidos através de *scanner* acoplado ao *software* Whin Rhizo, marca LA 1600 e versão 98. Para determinação da massa seca, o material vegetal foi separado em parte aérea (folha e caule) e radicular, lavado e seco em estufa a 65 °C, até peso constante. Após pesados cada compartimento, as folhas e raízes foram moídas e submetidas à determinação de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Al (MARTINS e REISSMANN, 2007) e N-total (BREMNER, 1996), permitindo obter o teor foliar e radicular desses elementos. De posse

desses dados, determinou-se o conteúdo de N, P, K, Ca e Mg na massa seca de folha e raiz.

No solo, após o cultivo, determinaram-se os teores de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn e Al, conforme metodologia descrita por Embrapa (1997). Para avaliar o efeito das doses no teor de elementos no solo e na planta, crescimento e conteúdo de N, P, K, Ca e Mg na folha, raiz e folha+raiz os dados foram submetidos à análise de variância ( $p < 0,05$ ) e de regressão ( $p < 0,05$ ) usando-se o *software* SISVAR (FERREIRA, 2008). Para entender melhor a atuação do N, P, K, Ca e Mg no crescimento das plantas, correlacionaram-se as variáveis de crescimento com o conteúdo destes elementos na massa de folha, raiz e na folha+raiz.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Características químicas do solo

Os teores no solo de P, Ca, Fe (Figuras 1A e C), Cu (Tabela 2) e a recuperação de P foram alterados apenas pelas doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Já os teores no solo de K, Zn (Figura 1B e D), Mg e Mn (Tabela 2) foram afetados pela interação das doses de P com as de NK. Somente o teor de Al no solo não foi significativamente afetado pelos tratamentos.

O teor de P no solo aumentou com as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicadas, passando de 1,9 para 43,0 mg dm<sup>-3</sup>. A recuperação de P pelo extrator Mehlich-1 foi de 7,4 % na dose de 100 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, passando para 15,1 % na dose de 600 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 1A). Houve estreita relação entre as doses de P e o teor do nutriente recuperado. Normalmente, em solos argilosos e oxidicos a capacidade de adsorção de P proveniente de fontes solúveis é alta (GONÇALVES et al., 1985; GONÇALVES et al., 1989; NOVAIS e SMYTH, 1999), como verificado neste trabalho. O teor de P disponível no solo atingiu valores considerados muito altos, já a partir da dose de 216,7 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (SBCS, 2004).

O teor de K no solo aumentou com as doses de N e K (Figura 1B), passando de nível médio para alto (SBCS, 2004) na dose de 0 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Porém, quando doses de P foram combinadas com as de 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O

TABELA 1: Caracterização química e teor de argila do Latossolo Vermelho distrófico utilizado como substrato

TABLE 1: Soil chemical and physical characteristics.

| pH                | Ca                                 | Mg  | Al  | H+Al | T    | V | m  | C                  | P                   | K    | Argila |
|-------------------|------------------------------------|-----|-----|------|------|---|----|--------------------|---------------------|------|--------|
| CaCl <sub>2</sub> | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> |     |     |      |      | % |    | g dm <sup>-3</sup> | mg dm <sup>-3</sup> |      | %      |
| 3,9               | 0,3                                | 0,2 | 4,5 | 14,1 | 14,7 | 4 | 88 | 34,1               | 2,1                 | 50,8 | 75     |

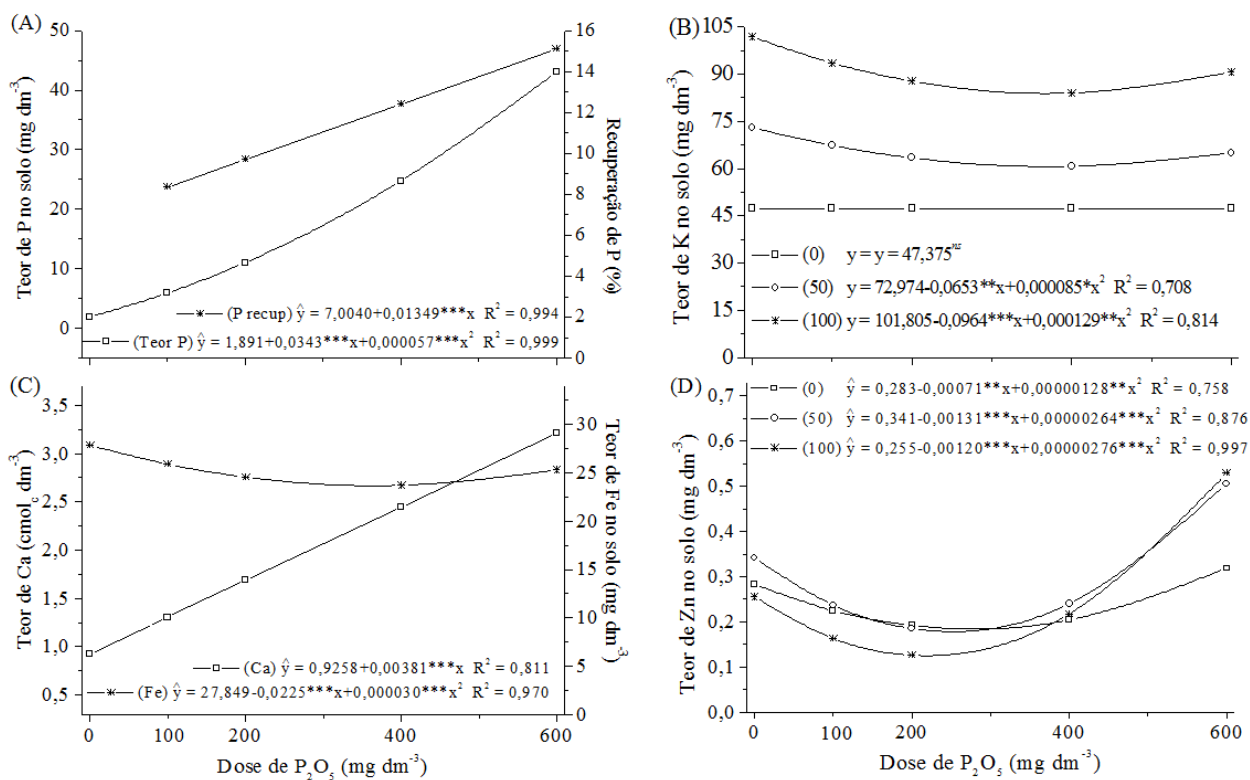


FIGURA 1: Teor e recuperação de P (A) e teor de Ca e Fe (C) em função das doses de P; teor de K (B) e Zn (D) nas doses de 0, 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O em função das doses de P em solo cultivado com plantas jovens de *Ilex paraguariensis*.\*, \*\*, \*\*\* significativo respectivamente a 5; 1; 0,1 % e <sup>ns</sup> não significativo.

FIGURE 1: Soil P content and extract ant P (A) rate and soil content of Ca and Fe (C) as affected by P; K content (B) and Zn (D) as affected by P and NK rates applied to the soil cultivated with *Ilex paraguariensis*. \*, \*\*, \*\*\* Significant respectively to the 5; 1; 0,1 % levels and <sup>ns</sup> no-significant.

TABELA 2: Equação de regressão para o teor de Mg, Cu e Mn no solo em função das doses de P combinadas com NK em solo cultivado com plantas jovens de *Ilex paraguariensis*

TABLE 2: Regression equations relating soil Mg, Cu, and Mn content with P and NK rates applied to the soil cultivated with *Ilex paraguariensis*.

| Variável | Dose de NK (mg dm <sup>3</sup> ) | Equação de regressão <sup>1/</sup>                                | R <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------|
| Mg       | 0                                | $\hat{y} = 0,0999 + 0,000054***x$                                 | 0,678          |
|          | 50                               | $\hat{y} = 0,1037 + 0,000040**x$                                  | 0,603          |
|          | 100                              | $\hat{y} = 0,1092 + 0,000023*x$                                   | 0,803          |
| Mn       | 0                                | $\hat{y} = 26,148 - 0,0878**x + 0,000354**x^2 - 0,000000347**x^3$ | 0,999          |
|          | 50                               | $\hat{y} = \bar{y} = 23,602^{ns}$                                 | -----          |
|          | 100                              | $\hat{y} = 26,089 - 0,0520*x + 0,000212*x^2 - 0,000000202*x^3$    | 0,437          |
| Cu       | Doses de P <sup>2/</sup>         | $\hat{y} = 1,241 - 0,00021***x$                                   | 0,923          |

Em que: <sup>1/</sup>\*, \*\*, \*\*\* significativo respectivamente a 5; 1; 0,1 % e <sup>ns</sup> não significativo e <sup>2/</sup> sem interação entre doses de P e NK.

Wherein: <sup>1/</sup>\*, \*\*, \*\*\* Significant respectively to the 5; 1; 0,1 % levels and <sup>ns</sup> no-significant and <sup>2/</sup> no interaction between levels P and NK.

o teor de K no solo reduziu. Os teores mínimos foram de 60,4 e 83,8 mg dm<sup>-3</sup> de K, respectivamente, nas doses de 384 e 374 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, caracterizando interação antagonista de P e K.

Os teores de Ca (Figura 1C) e Mg (Tabela 2) aumentaram linearmente com a adição de P. No entanto, a combinação do P com o NK reduziu de forma branda o teor de Mg no solo com o aumento das doses de P. Para o Ca ocorreu mudança na classe de fertilidade do solo de baixa para média (SBCS, 2004) pela aplicação do superfosfato triplo.

As doses de P afetaram negativamente os teores de Fe e Cu no solo. O teor de Cu foi reduzido linearmente (Tabela 2) e o mínimo de Fe chegou a 23,6 mg dm<sup>-3</sup> na dose de 375 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 1C). A disponibilidade de Zn (Figura 1D) e Mn (Tabela 2) foi afetada pela interação de NK com o P.

A ação depressiva do P na disponibilidade de Fe no solo se deve principalmente pelo desequilíbrio de teores com o aumento das doses de P (REDDY et al., 1978), sendo, principalmente, em solos ácidos a precipitação de Fe na forma de FePO<sub>4</sub> uma das causas de sua baixa disponibilidade (DECHEN e NACHTIGALL, 2007). Para o Zn, quando os teores de P se situavam na faixa entre 12,0 e 15,8 mg dm<sup>-3</sup> a interação do P e NK com o Zn foi antagonista e, com o aumento do teor de P no solo, a mesma foi sinérgica, aumentando o teor de Zn. Quando o teor de P e Zn se situam em faixas normais, não se esperam fortes interações destes nutrientes (LORENAGAN, 1993), sendo que, em alguns casos, a aplicação de P pode aumentar a disponibilidade de Zn (SHUMAN, 1988). Mesmo para solos com teores adequados de micronutrientes, deve-se ter cautela nas doses de fósforo, pois a interação do P, especialmente com o Fe e Cu, poderá afetar a disponibilidade destes às plantas.

### Crescimento das plantas

Das características de crescimento, apenas o DC e a MSR não foram afetadas pela interação do P com o NK (Figura 2A). O comportamento foi quadrático positivo para todas as características de crescimento analisadas, em função das doses de P testadas.

O máximo crescimento do DC ocorreu na dose de 384 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 2A). Para a altura, houve efeito aditivo das doses de NK em relação à resposta às doses de P. A altura máxima de 27,9, 30,3 e 32,1 cm foi obtida, respectivamente, com as doses de 384, 387 e 395 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 0, 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O (Figura 2 B), evidenciando a resposta da erva-mate, não apenas ao P, mas também ao NK.

O comprimento máximo de 8,43 m de raiz ocorreu na dose de 318 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, quando aplicado conjuntamente com 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O (Figura 2 C). Para essa mesma dose de N e K<sub>2</sub>O, também se observou o volume máximo de 11,8 cm<sup>3</sup> de raiz na dose de 420,4 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 2 D). A necessidade de menores teores de P (18,1 mg dm<sup>-3</sup>) para maximizar o comprimento radicular (CR) na maior dose de NK mostra a importância da adubação conjunta de P, N e K para essa variável. Plantas cultivadas com baixos teores de nutrientes tendem a investir mais energia na produção de raízes para aumentar a absorção dos mesmos (ZONTA et al., 2006). Quando o teor de P no solo era muito alto, as raízes eram mais grossas, o que reduziu a área de contato e, conseqüentemente, a absorção de nutrientes. Isto foi verificado no tratamento em que as maiores doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, N e K<sub>2</sub>O foram aplicadas, observando-se concomitantemente, o menor CR (Figura 2C) e maior VR (Figura 2D).

A produção máxima de MSR ocorreu na dose de 407 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 2A). As doses de P para as quais ocorreu a máxima produção de MSA e MST, nas três doses de NK, foram semelhantes, sendo, respectivamente, 447, 400 e 372 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 439, 402 e 389 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figuras 2E e F).

Em condições limitantes de suprimento de P, as raízes de algumas espécies florestais podem ser drenos preferenciais de fotossintatos, se comparadas com a parte aérea (FERNANDES et al., 2000), sendo o CR favorecido em solos deficientes em nutrientes, notadamente em N e em P (MARSCHNER, 1995). Isto teria ocorrido neste experimento, visto que o CR da erva-mate foi menor em menores doses de P quando as plantas estavam bem supridas em N e K (Figura 2C, dose de 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O), em comparação com as doses que maximizaram o crescimento em DC, HT e MSA (Figuras 2A, B e E).

O fato da erva-mate, na maioria das vezes, ser considerada uma espécie que cresce bem em solos de baixa fertilidade (CARVALHO, 2003) e pouco exigente em P (REISSMANN et al., 1983; RADOMSKI et al., 1992), não significa que esta não responda à fertilização. Neste trabalho, a resposta da erva-mate ao P demonstra que a espécie é exigente neste nutriente, sendo a magnitude da resposta condicionada à disponibilidade de N, K e sem descartar a do Ca, que, por sua presença no superfosfato triplo, o solo teve seu teor aumentado. Santin et al. (2008), ao testarem doses individuais de N, P e K em erva-mate, observaram o melhor desempenho das mudas para as variáveis de crescimento na dose de 447 mg kg<sup>-1</sup> de P. Por outro

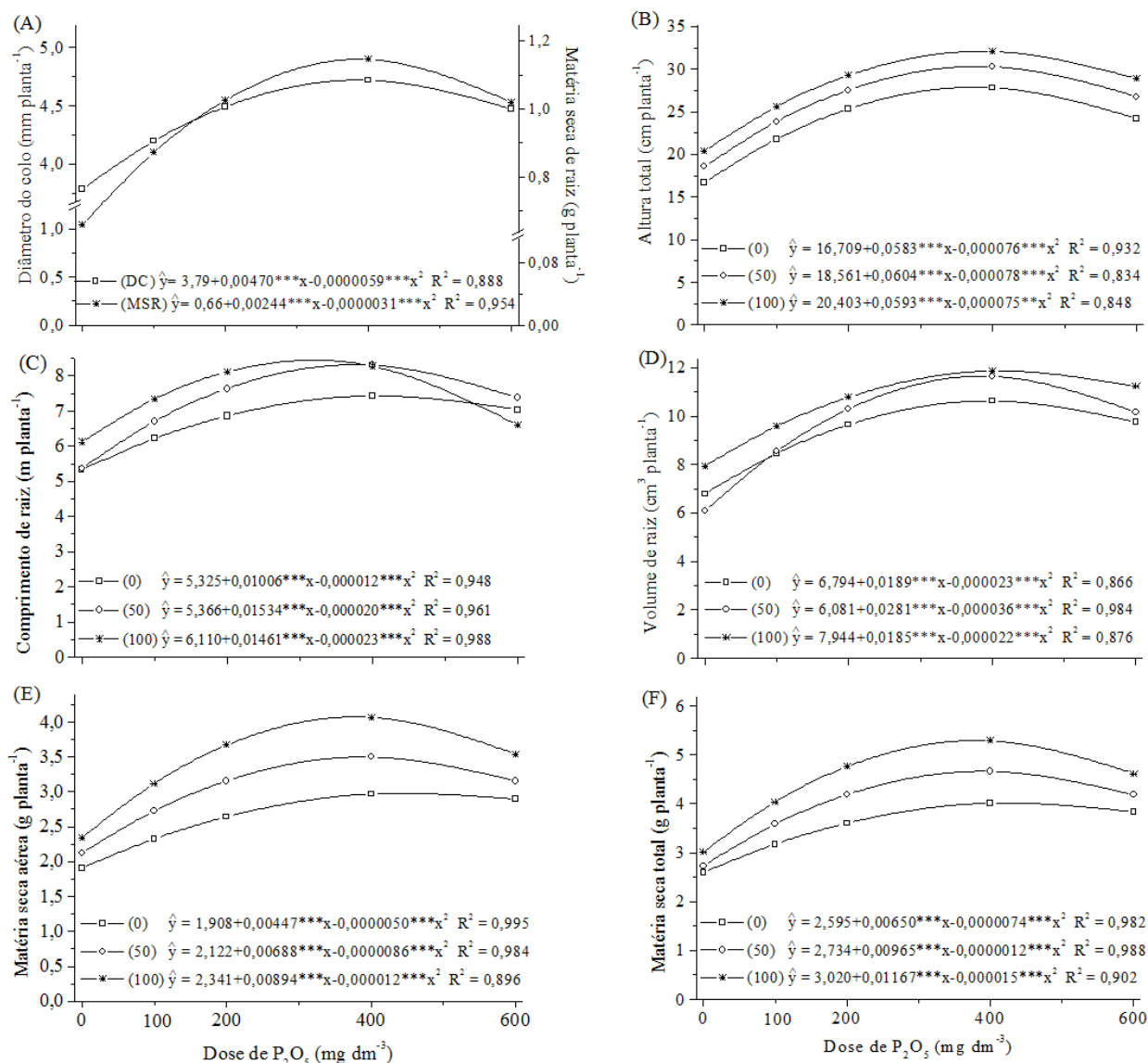


FIGURA 2: Características de crescimento de plantas jovens de *Ilex paraguariensis* em função das doses de P e NK. Diâmetro do colo e matéria seca de raiz (A), altura total (B), comprimento de raiz (C), volume de raiz (D), matéria seca aérea (E), matéria seca total (F). \*\*, \*\*\* significativo respectivamente a 1; 0,1 % e <sup>ns</sup> não significativo.

FIGURE 2: Growth characteristics of *Ilex paraguariensis* seedlings as affected by P and NK rates. Seedling stem diameter and root dry matter (A); height (B), root length (C), root volume (D), shoot dry matter (E) and seedling total dry weight (F). \*\*, \*\*\* Significant respectively to the 1; 0,1 % levels and <sup>ns</sup> no-significant.

lado, os mesmos autores, para as mesmas variáveis, constataram efeito negativo do N e K já na dose de 100  $mg\ kg^{-1}$ . A resposta positiva da erva-mate ao N e K neste trabalho, demonstra a importância de se testarem doses conjuntas de N, P e K que favoreçam o equilíbrio destes no solo, permitindo que as plantas demonstrem seu potencial de crescimento.

### Composição química da massa vegetal

Somente as doses de P influenciaram o teor foliar de P, N, Fe (Figura 3A, C e F) e Mg (Tabela 3); teor radicular de K, Fe (Figura 3B e F), Cu e Al (Tabela 3); e conteúdo de Ca e Mg (Figura 4D). Mas a interação das doses de P com as de NK afetaram o teor foliar de K, Ca, Zn (Figura

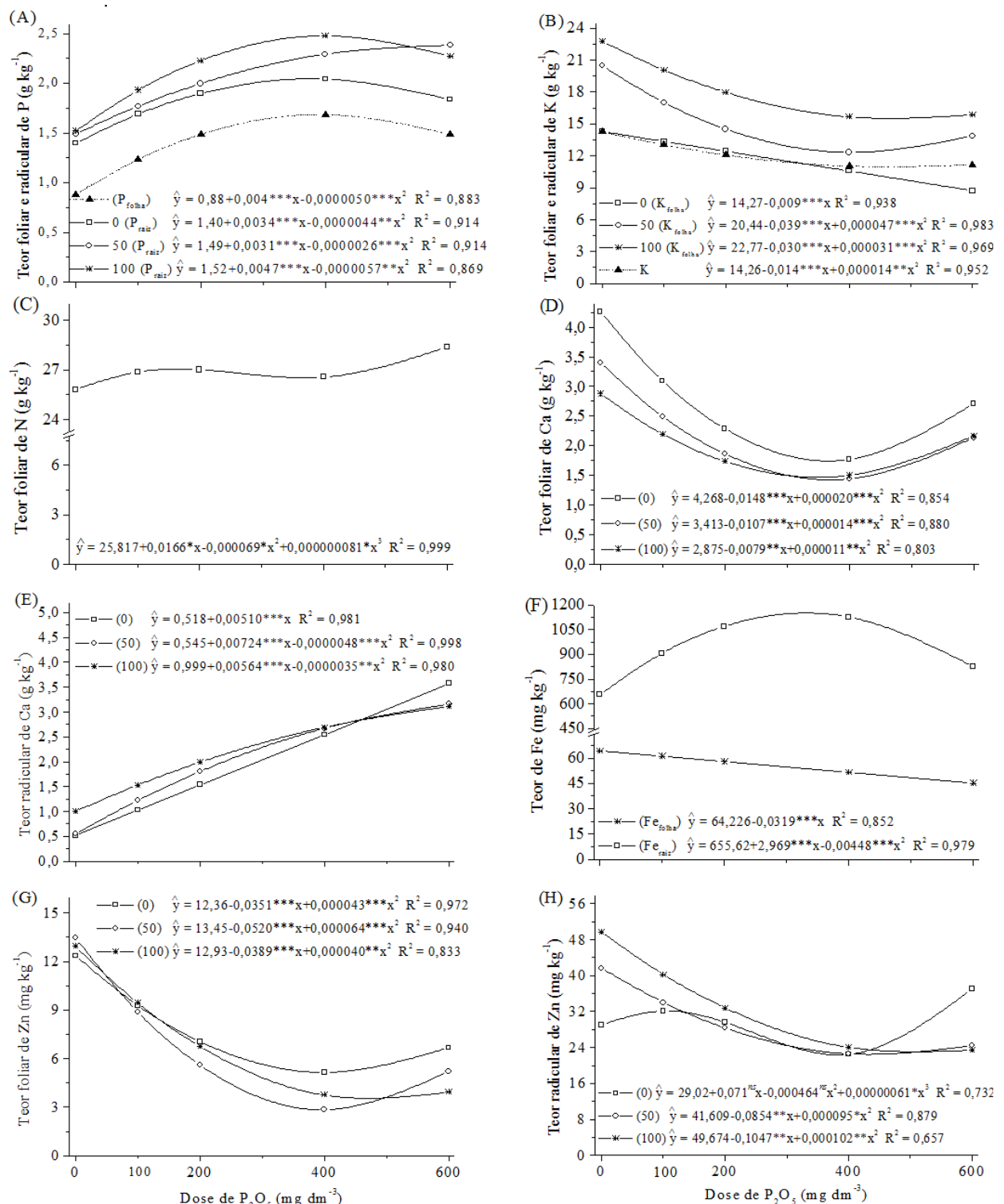


FIGURA 3: Composição química de plantas jovens de *Ilex paraguariensis* em função das doses de P e NK. Teor foliar e radicular de P (A), K (B) e Fe (F); teor foliar de N (C), Ca (D) e Zn (G); e teor radicular de Ca (E) e de Zn (H) em plantas jovens de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) submetidas a doses de P combinadas com NK. \*, \*\*, \*\*\* significativo respectivamente a 5; 1; 0,1 % e ns não significativo.

FIGURE 3: Chemical composition of *Ilex paraguariensis* seedlings as affected by P and NK fertilization. Leaf and root contents of P (A); K (B) and Fe (F); leaf content of N (C), Ca (D) and Zn (G), and root content of Ca (E) and Zn (H). \*, \*\*, \*\*\* significant respectively at the 5; 1; 0,1 % levels and ns non-significant.

TABELA 3: Equação de regressão para o teor foliar de Cu, Mn, Mg e N e teor radicular de Mg, Mn, Cu, Al, N e K em plantas jovens de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) submetidas a doses de P combinadas com NK

TABLE 3: Regression equations relating (*Ilex paraguariensis*) leaf Cu, Mn, Mg, and N content, and root Mg, Mn, Cu, Al, N and K content with P and NK rates.

| Variável   | Elemento (mg dm <sup>3</sup> ) | Equação de regressão <sup>1/</sup>                                        | R <sup>2</sup> |
|------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Mg (raiz)  | 0                              | $\hat{y} = 1,124 + 0,00073^{**}x$                                         | 0,703          |
|            | 50                             | $\hat{y} = \bar{y} = 1,084^{ns}$                                          | ----           |
|            | 100                            | $\hat{y} = 1,398 - 0,00228^{**}x + 0,0000031^{*}x^2$                      | 0,908          |
| Cu (folha) | 0                              | $\hat{y} = 12,135 - 0,0249^{***}x + 0,000035^{**}x^2$                     | 0,534          |
|            | 50                             | $\hat{y} = 14,020 - 0,0294^{***}x + 0,000034^{**}x^2$                     | 0,544          |
|            | 100                            | $\hat{y} = 13,182 - 0,0400^{***}x + 0,000053^{***}x^2$                    | 0,928          |
| Mn (folha) | 0                              | $\hat{y} = 1086,45 - 4,769^{**}x + 0,02132^{**}x^2 - 0,000022^{**}x^3$    | 0,609          |
|            | 50                             | $\hat{y} = 738,11 + 1,508^{*}x - 0,00120^{ns}x^2$                         | 0,938          |
|            | 100                            | $\hat{y} = 748,26 + 2,497^{**}x - 0,00314^{**}x^2$                        | 0,907          |
| Mn (raiz)  | 0                              | $\hat{y} = \bar{y} = 383,63^{ns}$                                         | ----           |
|            | 50                             | $\hat{y} = 704,37 - 2,1723^{**}x + 0,00282^{*}x^2$                        | 0,683          |
|            | 100                            | $\hat{y} = 743,91 - 6,5730^{**}x + 0,02290^{**}x^2 - 0,000021^{**}x^3$    | 0,946          |
| Mg (folha) | Doses de P                     | $\hat{y} = 2,872 - 0,0109^{***}x + 0,000038^{**}x^2 - 0,000000036^{*}x^3$ | 0,895          |
| Cu (raiz)  |                                | $\hat{y} = 79,770 - 0,2385^{***}x + 0,000291^{***}x^2$                    | 0,901          |
| Al (raiz)  |                                | $\hat{y} = 522,59 + 0,6468^{***}x$                                        | 0,962          |
| N (folha)  | Doses de N e K                 | $\hat{y} = 24,166 + 0,0552^{***}x$                                        | 0,980          |
| N (raiz)   |                                | $\hat{y} = 17,483 + 0,0120^{*}x$                                          | 0,733          |
| K (raiz)   |                                | $\hat{y} = 9,569 + 0,0548^{***}x$                                         | 0,992          |
| Mg (folha) |                                | $\hat{y} = 2,480 - 0,0039^{*}x$                                           | 0,892          |

Em que: <sup>1/</sup>\*, \*\*, \*\*\* significativo respectivamente a 5; 1; 0,1 % e <sup>ns</sup> não significativo.

Wherein: <sup>1/</sup>\*, \*\*, \*\*\* Significant respectively to the 5; 1; 0,1 % levels and <sup>ns</sup> non-significant.

3B, D e G), Cu e Mn (Tabela 3); radicular de P, Ca, Zn (Figura 3A, E e H), Mg e Mn (Tabela 3); e conteúdo de N, P e K (Figura 4A, B e C). Para o teor foliar de N e Mg e teor radicular de N e K, além da significância isolada das doses de P, também foram significativas as doses de NK (Tabela 3).

O comportamento do teor máximo de P nos órgãos da erva-mate foi semelhante, sendo na folha 1,7 g kg<sup>-1</sup> (na dose de 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O) e na raiz 2,5 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente na dose de 400 e 410 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 3A). Considerando que o teor foliar é o indicativo mais utilizado do estado nutricional de plantas (MARSCHNER, 1995), para a erva-mate é possível verificar teores foliares de P desde 0,8 g kg<sup>-1</sup> (SOUZA et al., 2008) até 3,0 g kg<sup>-1</sup> (WISNIEWSKI et al., 1996). Neste trabalho o teor foliar de P variou de 0,9 a 1,7 g kg<sup>-1</sup>, quando aplicadas doses, respectivamente, de 0 e 400 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,

que correspondem, de acordo com SBCS (2004), ao nível muito baixo (1,9 mg dm<sup>-3</sup>) e muito alto (24,7 mg dm<sup>-3</sup>) de P no solo (Figura 1A). Esse comportamento pode explicar até então, o porquê de alguns pesquisadores (REISSMANN et al., 1983; RADOMSKI et al., 1992) considerarem a erva-mate uma espécie pouco exigente em P. No entanto, esses resultados, juntamente aos verificados por Santin et al. (2008), demonstram que a erva-mate cresce bem em condições de altos teores de P no solo, já que mesmo na maior dose (teor de 43,0 mg dm<sup>-3</sup>) não foram observados sintomas foliares de toxidez deste elemento.

Com o aumento da disponibilidade de P no solo o teor de K na folha e na raiz reduziu, sendo a redução linear do teor foliar de K somente quando o solo não recebeu K e N (Figura 3B). Quando adicionados 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O, o teor foliar mínimo foi, respectivamente, de 12,4 e 14,5 g kg<sup>-1</sup> de K, correspondente a 415 e 489 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

O teor mínimo radicular de 10,9 g kg<sup>-1</sup> ocorreu na dose de 493 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 3B). A redução do teor foliar de K pode ser devido ao efeito de diluição, comprovado pelo aumento da produção de massa vegetal (Figura 2E e F), e diminuição da disponibilidade de K no solo (Figura 1B).

O teor de N na folha teve comportamento cúbico, sendo que o aumento a partir da dose de 464 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 3C) pode estar relacionado ao efeito de concentração, visto que, próximo a essa dose ocorreu redução da produção de MSA (Figura 2E). Ao analisar somente o efeito das doses de NK sobre o teor foliar e radicular de N, observou-se aumento linear deste, obtendo-se, respectivamente, o teor máximo de 29,7 e 18,7 g kg<sup>-1</sup> de N (Tabela 3).

O P atuou de forma diferenciada sobre o teor de Ca, reduzindo-o na folha e, aumentando-o na raiz (Figura 3D e E). Os teores foliares mínimos de 1,53, 1,35 e 1,46 g kg<sup>-1</sup> de Ca ocorreram, respectivamente, nas doses de 0, 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de N

e K<sub>2</sub>O e de 370, 382 e 359 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 3D). Esse resultado sugere duas hipóteses, uma relacionada à ação negativa de NK no teor de Ca e, a outra, referente à inibição da translocação do Ca da raiz para a parte aérea com o aumento das doses de P. A primeira é verificada pelo maior teor foliar de Ca (Figura 3D) e aumento linear do teor radicular de Ca, na dose de 0 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O, quando comparado ao comportamento quadrático nas doses 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O com as doses de P (Figura 3E). A segunda hipótese é que, mesmo com o aumento do teor de Ca nas raízes (Figura 3E) em consequência da maior disponibilidade de Ca no solo (Figura 1C), o aumento do teor de P na planta (Figura 3A) pode ter causado a redução do teor de Ca na folha (Figura 3D). Behling et al. (1989) e Horst et al. (1992) já haviam sugerido uma baixa eficiência de utilização de Ca em algumas espécies, causada pela inativação do mesmo, devida à ligação e, ou, à precipitação na forma de fosfato de cálcio.

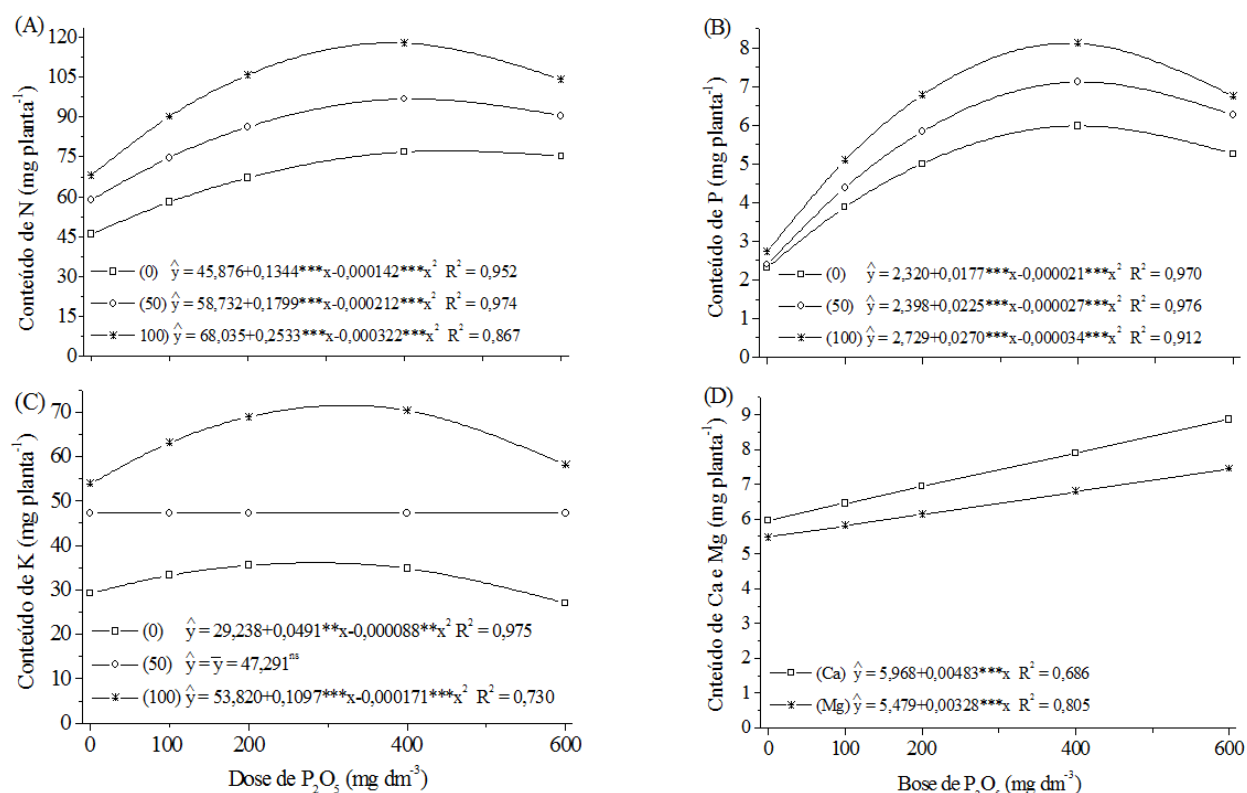


FIGURA 4: Composição química de plantas jovens de *Ilex paraguariensis* em função das doses de P e NK. Conteúdo de N (A), P (B), K (C) e Ca e Mg (D) na folha+raiz. \*\*, \*\*\* significativo respectivamente a 1; 0,1 % e <sup>ns</sup> não significativo.

FIGURE 4: Chemical composition of *Ilex paraguariensis* seedlings as affected by P and NK fertilization. Leaf and root contents of N (A); P(B); K (C) and Ca and Mg (D). \*\*, \*\*\* significant respectively at the; 1; 0,1 % levels and <sup>ns</sup> no-significant.

Os resultados desse estudo indicam que a erva-mate, em condições de teores elevados de P no solo, poderia utilizar parte do Ca da raiz para formar compostos com o P, como estratégia para evitar que altos teores de P nas folhas causem desordens nutricionais à planta. Isso merece uma investigação especial, já que precedentes na literatura com outras espécies pouco esclarecem o fato. Apesar de o Ca estar em nível adequado no solo, a sua interação com o P reduziu o seu teor foliar atingindo teores abaixo do que normalmente é verificado em mudas de erva-mate (REISSMANN et al., 1983; RADOMSKI et al., 1992), o que poderia limitar o crescimento das plantas.

Para o Mg, de maneira geral, o teor foliar diminuiu com adição de doses de P (Tabela 3). Na raiz, o aumento linear do teor de Mg na dose de 0 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O, a falta de significância na dose de 50 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O e a redução do teor deste na dose de 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O, pode ser um indicativo do efeito de diluição de Mg com o aumento da produção de massa vegetal (Figura 2E e F). Cabe salientar que, apesar do Mg no solo estar em nível considerado baixo (SBCS, 2004) (Tabela 2), na dose de P (372 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), que maximizou a produção de MSA (Figura 2E), o teor foliar de Mg (2,2 g kg<sup>-1</sup>) foi superior ao do Ca (1,5 g kg<sup>-1</sup>), mostrando que a erva-mate em condições de baixos níveis de Mg no solo é eficiente na sua absorção.

A influência das doses de P no teor de Fe nos compartimentos da planta foi bem distinta. Enquanto que na raiz o teor de Fe aumentou até 1147,6 mg kg<sup>-1</sup> na dose de 331 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, na folha, o teor deste reduziu linearmente com o aumento das doses de P (Figura 3F). De forma geral, a proporção entre o teor radicular/foliar de Fe variou de 10 a 21:1. A partir da dose de 400 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> observou-se clorose internerval nas folhas jovens, sintomas típicos de deficiência de Fe, induzido pelas altas doses de P. Assim, teores foliares de Fe abaixo de 50 mg kg<sup>-1</sup> induzem sintomas de deficiência e podem limitar o crescimento da erva-mate. Sintomas semelhantes causados pelo alto nível de P no solo também foram verificados por Missio et al. (2004) em grábia. O declínio do teor de Fe na folha com o aumento das doses de P, normalmente ocorre pela precipitação do Fe com o fosfato nos espaços intracelulares (ADAMS, 1980), possível estratégia da planta para evitar a toxidez de Fe na parte aérea.

Com exceção para o teor foliar de Mn e radicular de Al que aumentaram com as doses de P, o teor foliar de Cu (Tabela 3) e Zn e, teor radicular

de Zn (Figura 3H), Cu e Mn (Tabela 3) reduziram. Considerando a interação entre os nutrientes testados, nas doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para todas as doses de N e K<sub>2</sub>O, o teor foliar mínimo de Zn e Cu variou respectivamente de 2,9 a 5,2 e 5,6 a 7,7 mg kg<sup>-1</sup> e, o teor mínimo radicular de Zn de 22,2 a 32,1 mg kg<sup>-1</sup>. Tanto o teor de Zn quanto o de Cu na raiz foi superior ao da folha.

A hipótese mais aceita da interação antagônica do P sobre o teor de Zn e Cu na planta é que o desbalanço entre nutrientes na solução do solo dificulta a absorção destes. Mesmo quando a raiz absorve Zn e Cu em quantidades ideais, se houver na raiz altos teores de P, pode ocorrer formação de compostos fosfatados pouco solúveis que dificilmente serão translocados para a parte aérea (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2000). Esta hipótese corrobora com os resultados deste trabalho, tanto pela redução do teor na raiz, quanto pela diferença de teores foliares e radiculares de Zn e Cu, em função das doses de P.

Dentre os micronutrientes analisados, o Mn foi o único em que o teor radicular foi menor que o teor foliar (Tabela 3). Este comportamento se deve ao baixo transporte de Mn no floema, ocasionando seus menores teores obtidos em órgãos de reserva e raízes (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2000). O máximo teor foliar de Mn (1244,7 mg kg<sup>-1</sup>) na dose de 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O situou-se acima dos demais micronutrientes, mostrando que a erva-mate pode acumular altos teores deste elemento, sem prejudicar seu desenvolvimento. Esta observação já havia sido ressaltada por Reissmann e Carneiro (2004), que indicaram sobre a possibilidade de que a erva-mate seja acumuladora de Mn, ao constatarem teores foliares acima de 1000 mg kg<sup>-1</sup>.

Os conteúdos de N, P e K foram significativamente afetados pelas doses de P e de NK (Figuras 4A, B e C), sendo que para o conteúdo de K a interação apenas atuou nas doses 0 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O (Figura 4C). Já os conteúdos de Ca e Mg foram afetados apenas pelas doses de P (Figura 4D). Houve alta correlação entre o crescimento e os conteúdos de N, P, K e Mg na folha, raiz e folha+raiz, com exceção da correlação entre o conteúdo de K na folha e folha+raiz com DC. O conteúdo da Ca nas folhas não se correlacionou significativamente com o crescimento (Tabela 4).

A semelhança das curvas do conteúdo de N e P na folha+raiz (Figura 4A e B) com as da HT, MSA e MST (Figura 2B, E e F) e a alta correlação entre elas (Tabela 4) são indicativos da maior contri-

TABELA 4: Coeficientes de correlação linear simples (r) entre variáveis de crescimento e conteúdo de N, P, K, Ca e Mg na matéria seca de plantas jovens *Ilex paraguariensis* em função das doses de P e NK.TABLE 4: Simple linear correlation coefficients (r) between growth variables and contents of N, P, K, Ca and Mg in dry matter of *Ilex paraguariensis* seedlings content with P and NK rates.

| Variáveis de crescimento <sup>1/</sup>           | Nutrientes |         |                    |                     |         |
|--------------------------------------------------|------------|---------|--------------------|---------------------|---------|
|                                                  | N          | P       | K                  | Ca                  | Mg      |
| Conteúdo foliar (g planta <sup>-1</sup> )        |            |         |                    |                     |         |
| HT                                               | 0,83***    | 0,96*** | 0,50***            | -0,21 <sup>ns</sup> | 0,30*   |
| DC                                               | 0,55***    | 0,81*** | 0,09 <sup>ns</sup> | -0,06 <sup>ns</sup> | 0,32*   |
| MSF                                              | 0,95***    | 0,93*** | 0,63***            | -0,05 <sup>ns</sup> | 0,48**  |
| MSR                                              | 0,75***    | 0,90*** | 0,32*              | -0,14 <sup>ns</sup> | 0,42*** |
| MST                                              | 0,93***    | 0,95*** | 0,58***            | -0,08 <sup>ns</sup> | 0,48*** |
| VR                                               | 0,78***    | 0,90*** | 0,38**             | -0,20 <sup>ns</sup> | 0,37**  |
| CR                                               | 0,70***    | 0,80*** | 0,35**             | -0,19 <sup>ns</sup> | 0,43*** |
| Conteúdo radicular (g planta <sup>-1</sup> )     |            |         |                    |                     |         |
| HT                                               | 0,84***    | 0,87*** | 0,65***            | 0,74***             | 0,48*** |
| DC                                               | 0,72***    | 0,74*** | 0,32*              | 0,68***             | 0,50*** |
| MSF                                              | 0,82***    | 0,88*** | 0,78***            | 0,76***             | 0,45*** |
| MSR                                              | 0,90***    | 0,94*** | 0,62***            | 0,82***             | 0,61*** |
| MST                                              | 0,86***    | 0,92*** | 0,76***            | 0,80***             | 0,50*** |
| VR                                               | 0,83***    | 0,87*** | 0,59***            | 0,81***             | 0,66*** |
| CR                                               | 0,76***    | 0,78*** | 0,57***            | 0,67***             | 0,55*** |
| Conteúdo na folha+raiz (g planta <sup>-1</sup> ) |            |         |                    |                     |         |
| HT                                               | 0,86***    | 0,95*** | 0,55***            | 0,29*               | 0,38**  |
| DC                                               | 0,60***    | 0,80*** | 0,14 <sup>ns</sup> | 0,38**              | 0,40*** |
| MSF                                              | 0,96***    | 0,94*** | 0,69***            | 0,43***             | 0,53*** |
| MSR                                              | 0,81***    | 0,93*** | 0,40**             | 0,39**              | 0,52*** |
| MST                                              | 0,95***    | 0,96*** | 0,64***            | 0,43***             | 0,55*** |
| VR                                               | 0,81***    | 0,91*** | 0,44***            | 0,34**              | 0,48*** |
| CR                                               | 0,73***    | 0,81*** | 0,42**             | 0,18 <sup>ns</sup>  | 0,51*** |

Em que: <sup>1/</sup>HT: altura total, DC: diâmetro do colo, CR: comprimento radicular, VR: volume radicular, MSF: matéria seca da folha, MSR: matéria seca radicular e MST: matéria seca total. \*, \*\*, \*\*\* significativo respectivamente a 5; 1; 0,1 % e <sup>ns</sup> não significativo.

Wherein: <sup>1/</sup>HT: total height, DC: diameter, CR: root length, VR: root volume, MSF: dry weight of leaves, MSR: root dry matter and MST: total dry weight. \*, \*\*, \*\*\* significant at respectively 5, 1, 0.1 % and <sup>ns</sup> not significant.

buição positiva destes nutrientes para o crescimento da erva-mate. Esse resultado reforça a hipótese que a erva-mate é exigente em P (SANTIN et al., 2008) e também em N.

Para o K, a grande diferença entre o conteúdo máximo de 36,1 e 71,4 mg planta<sup>-1</sup>, respectivamente nas doses de 0 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de N e K<sub>2</sub>O (Figura 4C), mostra que se deve ter atenção especial com esse nutriente no solo. Isso fica evidente pela correlação significativa (r= 0,78, não demonstrada) entre o aumento do conteúdo de K na folha+raiz e a redução do teor de K no solo (Figura 1B).

O comportamento diferenciado entre o

teor de Ca e Mg na folha e na raiz (Figura 3D e E; Tabela 3) e a ausência de correlação entre o conteúdo de Ca foliar e todas as variáveis de crescimento, aliados à característica calcífuga (REISSMANN e CARNEIRO, 2004), reforçam a hipótese da possível baixa exigência da erva-mate nesses nutrientes. Por outro lado, a alta correlação entre as variáveis de crescimento e o conteúdo de Ca radicular indica a importância desse nutriente no crescimento das raízes e pode ter refletido positivamente nas demais variáveis de crescimento (Tabela 4). Esse comportamento do Ca merece um estudo específico para maiores esclarecimentos.

## CONCLUSÕES

A erva-mate é exigente em P, demonstrando o melhor crescimento quando o teor deste no solo se situa na faixa entre 18,5 e 28,6 mg dm<sup>-3</sup>.

O desequilíbrio entre nutrientes causado por altos teores de P no solo favorece a interação antagonista entre o teor de P com o de Ca, Mg, Fe, Cu e Zn da folha, sendo que doses acima de 400 mg dm<sup>-3</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> causaram deficiência de Fe provocando clorose internerval nas folhas da erva-mate.

A ordem decrescente de macronutrientes mais exigidos e que mais contribuíram para o crescimento da erva-mate foi P>N>K>Mg>Ca. Porém, para o crescimento de raiz a ordem foi P>N>Ca>K>Mg.

A erva-mate cresce bem em solos com altos teores de P, mas, a maximização do crescimento das plantas depende da boa disponibilidade de N, K e Ca.

## AGRADECIMENTO

À empresa Baldo S.A. de São Mateus do Sul e à UFPR - PR, que juntas, possibilitaram a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645-736.
- ADAMS, F. Interaction of phosphorus with other elements in soils and in plant. In: KHASAWNEH, F. E. et al. (Ed.) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1980. p. 655-680.
- ALVES, A. C. et al. Exigências nutricionais em potássio, cálcio e magnésio do sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 5, p. 529-536, maio. 1988.
- ALVES, V. M. C. et al. Efeito da omissão de fósforo na absorção de nitrogênio por híbridos de milho (*Zea mays*, L.). **Revista Ceres**, Viçosa, v. 43, n. 248, p. 435-443, 1996.
- BEHLING, J. P.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. The distribution and utilization of calcium by two tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) lines differing in calcium efficiency when grown under low-Ca stress. **Plant and Soil**, Netherland, v. 113, p. 189-196, 1989.
- BREMNER, J. M. Nitrogen total. In: SPARKS, D. L. **Methods of soil analysis**. Part 3. Madison: America Society of Agronomy, 1996. p. 1085-1121.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 1039 p. v. 1.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91-132.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.
- FAGERIA, N. K.; ARAÚJO, A. P.; STONE, L. F. Mudanças químicas na rizosfera. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 161-186.
- FERNANDES, L. A. et al. Crescimento inicial, níveis críticos de fósforo e frações fosfatadas em espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 6, p. 1191-1198, jun. 2000.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Científica Symposium**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 36-41, jul./dez. 2008.
- FONSECA, J. A. da; MEURER, E. J. Inibição da absorção de magnésio pelo potássio em plântulas de milho em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 47-50, 1997.
- GONÇALVES, J. L. M. et al. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, n. 2, p. 107-111, 1985.
- GONÇALVES, J. L. M. et al. Cinética de transformação de fósforo-lábil e não-lábil, em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 1, p. 13-24, 1989.
- HORST, W. J.; CURRLE, C.; WISSEMEIER, A. H. Differences in calcium efficiency between cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) cultivars. **Plant and Soil**, Netherland, v. 146, p.45-54, 1992.
- JESCHKE, W. D. et al. Effects of P deficiency on assimilation and transport of nitrate and phosphate in intact plants of castor bean (*Ricinus communis* L.). **Journal Experimental Botany**, v. 48, n. 1 p. 95-91, Jan. 1997.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3rd ed. Boca Raton, London: CRC Press, 2000. 331 p.
- LAMBERS, H.; POORTER, H. Inherent variations in growth rate between higher plants: A search for physiological causes and ecological consequences. **Advances in Ecological Research**, San Diego, v.

23, p.187-261, 1992.

LORENAGAN, J.F.; WEBB, M.J. Interaction between zinc and others nutrients affecting the growth of plant. In: ROBSON, A. D. **Zinc in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993, p. 119-134

LUCA, E. F. de. et al. Eficiência de absorção e utilização de fósforo ( $^{32}\text{P}$ ) por mudas de eucalipto e arroz. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 543-547, 2002.

MACCARI, JR. A.; MAZUCHOWSKI, J. Z. **Produtos alternativos e desenvolvimento da tecnologia industrial na cadeia produtiva da erva-mate**. Curitiba: Câmara Setorial da Cadeia Produtiva da Erva-Mate Paraná MCT/CNPq/PROJETO PADCT Erva-Mate. Curitiba. 2000. 176 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London, Academic Press, 1995. 889 p.

MARTINS, A. P. L.; REISSMANN, C. B. Material vegetal e as rotinas laboratoriais nos procedimentos químico-analíticos. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 8, n. 1, p. 1-17, 2007.

MISSIO, E. L. et al. Exigências nutricionais da grápia ao fósforo e enxofre em Argissolo Vermelho distrófico arênico: Efeito da adubação no crescimento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 4, p.1051-1057, jul./ago. 2004.

MORTVEDT, J. J.; KHASAWNEH, F. E. Effects of growth responses on cationic relationships in plants. **Soil Science**, Baltimore, v.141, n. 3, p. 200-207, 1986.

NICOLOSO, F. T. et al. Exigências nutricionais da grápia em Argissolo Vermelho distrófico arênico: (II) Efeito da adubação NPK no teor de nutrientes nos tecidos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 372-380, mar./abr. 2007.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, UFV, DPS. 1999. 399 p.

OLSEN, G. M. Interacciones de los micronutrientes. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. (Ed.). **Micronutrientes en agricultura**. México: AGT, 1983. p. 317-348.

RADOMSKI, M. I. et al. Avaliação dos teores de macro e micronutrientes em folhas jovens e velhas de erva-mate nativa. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 4, p. 453-456, 1992. (Edição Especial).

REDDY, K. P.; SAXENA, M. C.; PAL, U. R. Effect of iron and manganese on in  $^{65}\text{Zn}$  absorption and translocation in soybean seedlings. **Plant and Soil**, Netherland, v. 49, p. 409-415, 1978.

REISSMANN, C. B. et al. Bio-elementos em folhas e hastes de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill.) sobre cambisolos na região de Mandirituba – PR. **Floresta**, Curitiba, v. 14, n. 2, p. 49-54, 1983.

REISSMANN, C. B.; CARNEIRO, C. Crescimento e composição química da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), transcorrido oito anos de calagem. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 281-386, 2004.

ROLIM NETO, F. C. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 953-964, 2004.

RUFTY JR. T. W.; MACROWN, C. T.; ISRAEL, D. W. Phosphates stress effects on assimilation of nitrate. **Plant Physiology**, Illinois, n. 94, p. 328-333, 1990.

SANTIN, D. et al. Nitrogênio, fósforo e potássio no crescimento de mudas de erva-mate. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 59-66, 2008.

SBCS - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Comissão de química e fertilidade do solo. 10. ed. Porto Alegre. 2004, 400 p.

SHUMAN, L. M. Effect of phosphorus level on extractable micronutrients and their distribution soil fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 136-141, 1988.

SHUMAN, L. M. Mineral nutrition. In: WILKINSON, R. E., ed. **Plant-environment interactions**. New York, Marcel Dekker, 1994. p. 149-182.

SOUZA, J. L. M. et al. Teores de nutrientes foliares em plantas de erva-mate em função da posição e orientação geográfica da copa, em Guarapuava-PR. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 49-58, 2008.

VENTURIN, N. et al. Adubação mineral do angico-amarelo (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 3, p. 441-448, mar. 1999.

VENTURIN, N. et al. Fertilização de plântulas de *Copaifera langsdorffii* Desf. (óleo copaíba). **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 2, p. 1-17, 1996.

WISNIEWSKI, C. et al. Exportação de biomassa e macronutrientes com a primeira poda de formação da erva-mate na região de Pinhais-PR. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 15, n. 2, p. 179-186, 1996.

ZONTA, E. et al. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 07-52.