

TRANSFORMAÇÕES DO NITROGÊNIO EM DOIS SOLOS SUBMETIDOS A INUNDAÇÃO¹

JOSÉ FRANCISCO VALENTE MORAES², CLÁUDIO JOSÉ DA SILVA FREIRE³ e ENEDINO CORRÊA DA SILVA⁴

SINOPSE.— Foi realizado um experimento de laboratório, no Rio Grande do Sul, com o objetivo de estudar as transformações do nitrogênio em dois solos submetidos à inundação, depois de incubados por períodos diferentes em condições de boa aeração. Depois de adubados com 100 — 120 — 100 kg de N, P e K por hectare, respectivamente, nas formas de $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, K_2HPO_4 e KCl , os solos foram submetidos aos períodos de 0, 7, 14, 28, 42 e 46 dias com umidade próxima à capacidade de campo, seguidos de períodos de inundação até completarem as oito semanas de observações.

Durante o tempo de inundação, a cada sete dias eram coletadas amostras do percolado para a determinação de N-NO_3^- e do N-NH_4^+ . Ao final do experimento foi determinado o teor de NH_4^+ intercambiável no solo de cada tratamento.

A nitrificação do NH_4^+ depende diretamente do tempo durante o qual o solo é mantido em contato com o ar atmosférico. Também o tipo de solo influencia a intensidade de oxidação do nitrogênio amoniacal.

Palavras chaves adicionais para índice: Nitrificação, inundação, oxidação, redução, solução do solo.

INTRODUÇÃO

Está bem estabelecido que a redução dos nitratos à forma gasosa de nitrogênio, principalmente N_2O e N_2 , pode ocorrer se o solo é privado de oxigênio. A eliminação do intercâmbio gasoso entre o solo e o meio exterior, causada pelo excesso de água, faz com que os nitratos do solo sejam reduzidos e o nitrogênio gasoso formado se perca na atmosfera. O tempo que o solo, depois de adubado, permanece exposto à oxidação, é importante para a nutrição das espécies vegetais que, como o arroz, se desenvolvem em condições de solo inundado.

Black (1968) afirma que o crescimento das plantas é mais freqüentemente limitado pela deficiência de nitrogênio do que pela de qualquer outro nutriente. Do mesmo modo, Viets (1965) mostra a importância do nitrogênio na nutrição vegetal e observa que as plantas contêm mais átomos deste elemento do que de qualquer outro nutriente absorvido do solo, com exceção do hidrogênio.

De acordo com Matsushima (1964), o nitrogênio é o fator mais importante na determinação da produção de arroz, mas seu aproveitamento somente será eficiente caso considerados todos os fatores que lhe condicionam a utilização.

Devido à sua importância, muitos experimentos têm sido realizados para estudar as diferentes formas de ni-

trogênio que ocorrem nos solos e a sua utilização pelas plantas. Sob condições de boa aeração, o nitrogênio do solo tende a ser oxidado a nitratos. Assim, o NH_4^+ e o NO_2^- não se acumulam no solo, sendo transformados em NO_3^- .

Black (1968) verificou que, em condições de umidade próximas da capacidade de campo, o teor de NH_4^+ do solo diminuiu e o de NO_3^- aumentou. O acúmulo de nitrato mostrou-se maior do que a perda do NH_4^+ , devido à mineralização da matéria orgânica e à rápida oxidação do nitrogênio amoniacal à forma nítrica. Estas observações foram confirmadas por Tisdale e Nelson (1969), Leal e Alvahydo (1972), Nõmmik e Thorin (1972) e Sanchez (1972). Eno *et al.* (1955) observaram que, depois de duas semanas de incubação, de 173 ppm de NH_4^+ aplicadas ao solo, 139 ppm se haviam transformado em NO_3^- .

Sendo o solo inundado, o suprimento de oxigênio atmosférico é reduzido e a oxidação do amônio cessa. Os organismos anaeróbios se multiplicam rapidamente e usam o oxigênio dos compostos oxidados do solo, reduzindo-os. Como resultado, os nitratos se transformam nas formas gasosas do nitrogênio, principalmente NO_2 , N_2O e N_2 (Ponnamperuma 1965, Black 1968, Sanchez 1972).

Nõmmik e Thorin (1972), estudando o comportamento do nitrato e do nitrito em solos de floresta, observaram que, na ausência do oxigênio, mais de 80% do nitrogênio aplicado ao solo foram recuperados sob forma de gás, nos primeiros 10 dias de estudo. Os resultados obtidos permitiram-lhes determinar que a seqüência NO_2^- — N_2O — N_2 é a mais provável de ocorrer durante a redução dos nitratos do solo.

Parte do nitrogênio aplicado fica retida no solo na forma fixada ou na forma intercambiável. Allison *et al.* (1953) e Velasquez (1972) citam que a secagem do solo aumenta a fixação do nitrogênio amoniacal, en-

¹ Aceito para publicação em 4 de junho de 1974. Apresentado ao XV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 16 a 23 de julho de 1973, Santa Maria, RS.

² Eng.º Agrônomo, M.Sc., da Seção de Solos do Instituto de Pesquisas Agropecuárias do Sul (IPEAS), Cx. Postal E, Pelotas, Rio Grande do Sul, e bolsista do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq).

³ Eng.º Agrônomo da Seção de Química e Tecnologia do IPEAS.

⁴ Eng.º Agrônomo, M.Sc., da Seção de Estatística Experimental e Análise Econômica do IPEAS e bolsista do CNPq.

quanto seu umedecimento causa a liberação do NH_4^+ para a solução.

No que se refere ao NH_4^+ intercambiável, Ponnampetuma (1965) cita que a presença de grandes quantidades de Fe^{2+} intercambiável nos solos inundados significa que uma porção equivalente de cátions, incluindo o NH_4^+ , foi deslocada para a solução do solo, fato importante para a nutrição das plantas.

Com a finalidade de estudar as transformações do nitrogênio amoniacal aplicado ao solo como fertilizante, foi realizado experimento de incubação no laboratório da Seção de Solos do Instituto de Pesquisas Agropecuárias do Sul (IPEAS).

MATERIAL E MÉTODOS

Usaram-se os solos Pelotas e Formiga, escolhidos com base no mapa de levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul (Divisão de Pesquisa Pedológica 1971), cujas características químicas, determinadas no laboratório da Seção de Solos do IPEAS, são mostradas no Quadro 1.

QUADRO 1. Dados químicos de avaliação da fertilidade dos solos estudados

Solos	pH (1:2,5)	Al (emg%)	Ca + Mg (emg%)	K (ppm)	P (ppm)	M.O. (%)
Formiga	5,2	0,4	7,2	44	1,6	1,53
Pelotas	5,0	0,6	3,6	50	7,4	1,53

Para atingir o objetivo, colocaram-se 2 kg de solo adubado com 100, 120, e 100 kg de N, P e K por ha, respectivamente, em vasos cônicos de plásticos, mantidos em condições de laboratório por oito semanas. Aos 0, 7, 14, 28, 42 e 56 dias após a adubação, eles foram sendo inundados em conformidade com o tratamento a que estavam submetidos.

Como fonte dos elementos, usou-se uma mistura de fosfato monoácido de amônio, fosfato monoácido de potássio e cloreto de potássio.

Os tratamentos do experimento foram os de um fatorial completo 2x6 (dois solos e seis épocas de inundação do solo), em duas repetições, e o esquema experimental completamente casualizado.

Durante a primeira fase do estudo, os solos permaneceram com teor de umidade próximo à capacidade de campo. A partir da inundação, a cada período de sete dias coletavam-se amostras do percolado do solo para a determinação química quantitativa do N-NH_4^+ , do N-NO_3^- e do $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$. Fizeram-se as determinações do nitrogênio no laboratório da Seção de Química e Tecnologia do IPEAS, seguindo-se os métodos da Association of Official Agricultural Chemists (AOAC 1965).

Para que a amostragem do percolado de todos os tratamentos ocorresse no mesmo dia, adotou-se o critério de adubar os solos aos 56, 42, 28, 14, 7 e 0 dias antes da inundação.

Para o estudo da velocidade de transformação do nitrogênio foram isolados, dentro de cada época de inundação, três dos oito graus de liberdade referentes às

nove determinações químicas, realizadas em espaços de sete dias. Portanto, a regressão polinomial, estudada em seus três componentes (linear, quadrático e cúbico) assumiu a forma

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 P_{1i} + \beta_2 x_2 P_{2i} + \beta_3 x_3 P_{3i},$$

o que possibilitou, através da análise da variância de regressão, testar a significância dos parâmetros e realizar o ajustamento das curvas.

Ao final do experimento coletaram-se amostras de solo de cada vaso e quantificou-se o NH_4^+ intercambiável, dentro da metodologia proposta por Jackson (1958).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com a determinação química quantitativa do N-NO_3^- do percolado dos solos Formiga e Pelotas são mostrados nas Fig. 1 e 2. Observou-se que os teores de NO_3^- aumentaram com o tempo em que o solo ficou incubado em condições de boa aeração. Aos zero dias da inundação do solo, a concentração de N-NO_3^- se elevou, alcançando valores compreendidos

entre 5 e 82 ppm de nitrogênio no solo Formiga (Fig. 1) e entre 0 e 35 ppm de nitrogênio no solo Pelotas (Fig. 2). Em ambos os casos, os maiores valores de N-NO_3^- manifestaram-se nos tratamentos em que o solo, depois de adubado, permaneceu mais tempo em contato com o ar atmosférico. Os valores menores pertencem aos solos inundados logo depois da adubação.

Os teores de N-NO_3^- diminuíram com o decorrer do tempo. No solo Formiga, aos sete dias, esses valores eram cerca de metade dos observados no dia do alagamento e, no solo Pelotas, eram um pouco maiores. Ao fim de três semanas, a concentração de N-NO_3^- , nos dois solos estudados, apresentava valores próximos de zero ppm.

Comparando-se as Fig. 1 e 2 verifica-se que, em todos os tratamentos, a concentração de nitratos na solução do solo Formiga foi cerca de duas vezes maior do que a determinada no solo Pelotas, no mesmo tratamento.

A análise da variância revelou diferenças significativas nas concentrações de nitratos entre os solos, bem como dentro do mesmo solo, entre tratamentos.

Acredita-se que os altos teores de nitratos observados nos solos foram causados pela oxidação do NH_4^+ , tanto do fertilizante como do derivado da decomposição da matéria orgânica do solo à forma nítrica. De acordo com Black (1968), as bactérias dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter* são os principais agentes transformadores do nitrogênio do solo à forma de nitrato. A oxidação do nitrogênio ocorre enquanto existe oxigênio. Na ausência de oxigênio elementar, os organismos do solo

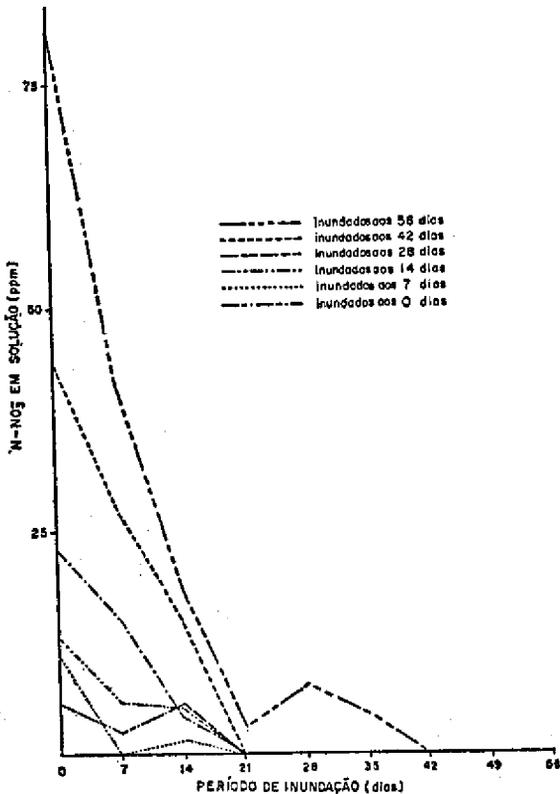


FIG. 1. Efeito da época de inundação sobre a concentração do $N-NO_3^-$ na solução do solo Formiga.

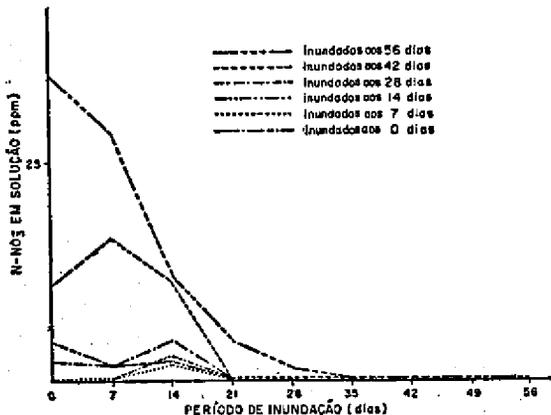


FIG. 2. Efeito da época de inundação sobre a concentração do $N-NO_3^-$ na solução do solo Pelotas.

usam o derivado dos nitratos e de outros compostos oxidados do solo. A remoção do oxigênio do NO_3^- reduz estas substâncias e o produto final é, em sua maioria, nitrogênio gasoso, incluindo o NO_2 , o N_2O e o N_2 , que escapam para a atmosfera (Nömmik & Thorin 1972). Só uma pequena quantidade de N nítrico é reduzida a amônio (Broadbent & Clark 1965). No presente estudo,

a inundação do solo praticamente eliminou o suprimento de oxigênio. Com isso, os nitratos foram reduzidos à forma gasosa e perdidos na atmosfera. Observou-se que grande número de borbulhas escapava do solo e rebentava à superfície da água.

Nas Fig. 3 e 4 são apresentados os teores de $N-NH_4^+$ determinados no percolado dos solos, destacando-se também as curvas ajustadas pela regressão. A concentração do $N-NH_4^+$ foi alta no início, diminuiu durante as duas primeiras semanas de inundação e começou a aumentar novamente. Isto ficou bem evidenciado na análise da variância da regressão, onde os componentes quadrático e cúbico foram quase sempre significativos.

A baixa inicial da concentração do $N-NH_4^+$ deve ter sido causada, em maior proporção, pela oxidação deste composto à forma nítrica e à sua posterior redução a N gasoso (Moraes & Freire 1973). O aumento posterior, de acordo com diversos autores, deve-se principalmente ao deslocamento do NH_4^+ do complexo de intercâmbio para a solução do solo, pelo Fe^{2+} e Mn^{2+} (Ponnamperuma 1965, Sanchez 1972, e Moraes & Freire 1974) e pela mineralização da matéria orgânica do solo, na ausência do oxigênio.

Em um mesmo tratamento, os teores de $N-NH_4^+$ do percolado do solo Pelotas (Fig. 4) eram maiores do que os observados no percolado do solo Formiga (Fig. 3). Tais resultados concordam com os das Fig. 1 e 2. O solo Formiga apresentou maior quantidade de nitrogênio em forma nítrica do que o solo Pelotas e, conseqüentemente, maior perda deste nutriente. Por conseguinte, não poderia liberar a mesma quantidade de NH_4^+ que o solo Pelotas. Do mesmo modo, nos tratamentos em que o solo ficou mais tempo em contato com o ar atmosférico, houve menor liberação de nitrogênio para a solução do que nos tratamentos menos expostos à oxidação.

Assim, nas Fig. 3 e 4 inverte-se a posição das curvas do nitrogênio, quando considerados os diferentes períodos de incubação dos solos antes do alagamento. Em ambos os casos, os solos incubados por 56 dias e que tinham mais NH_4^+ no início da incubação foram os que apresentaram os menores teores deste cátion no final do experimento.

As diferenças de comportamento dos dois solos, no que se refere a transformações do nitrogênio, foram devidas às suas características químicas. De acordo com os resultados do levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul (Divisão de Pesquisa Pedológica 1971), o solo Formiga, por apresentar maior capacidade de troca de cátions do que o solo Pelotas, retém o $N-NH_4^+$ intercambiável mais fortemente, diminuindo portanto a intensidade da nitrificação. Do mesmo modo é alterada a quantidade de $N-NH_4^+$ que é liberada para a solução do solo, depois da inundação.

O NH_4^+ intercambiável (Fig. 5) determinado no final do experimento confirma as observações anteriores. Como mostra a Fig. 5, dentro de um mesmo solo o teor de amônio intercambiável foi maior no tratamento em que o solo permaneceu menos tempo em contato com o ar atmosférico. Portanto, é justificável que nesses tratamentos houvesse maior liberação de nitrogênio amoniacal para a solução do solo (Fig. 3 e 4).

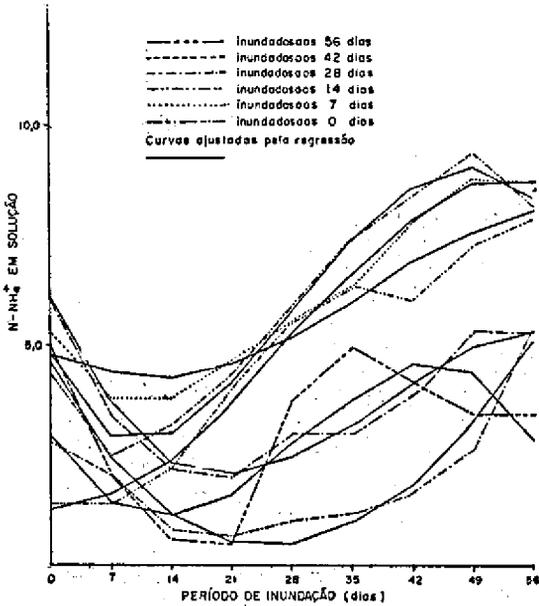


FIG. 3. Efeito da época de inundação sobre a concentração do $N-NH_4^+$ na solução do solo Formiga.

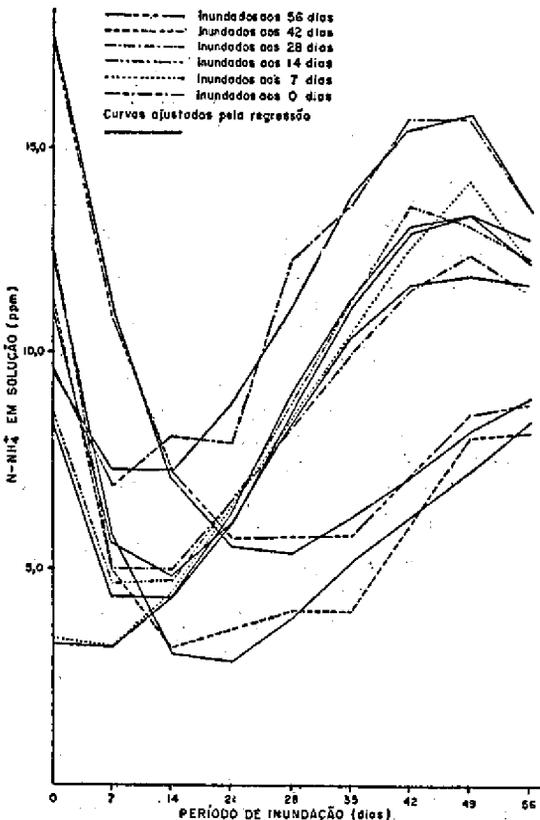


FIG. 4. Efeito da época de inundação sobre a concentração do $N-NH_4^+$ na solução do solo Pelotas.

Nas Fig. 6 e 7 aparecem os resultados das duas formas de nitrogênio determinadas durante o período de inundação, destacando-se novamente as curvas ajustadas pela regressão. Verifica-se que os teores de nitrogênio, nas primeiras 24 horas de alagamento, foram muito altos, diminuindo com o tempo. Alcançaram os valores mínimos duas a cinco semanas depois da submersão, quando começaram a aumentar novamente, fato evidenciado pela análise da variância da regressão; com os componentes quadrático e cúbico quase sempre significativos.

As quantidades de N inicialmente determinadas estavam, na maior proporção, em forma nítrica, mas, depois da terceira semana de inundação, o NH_4^+ era a principal forma de nitrogênio mineral presente na solução do solo.

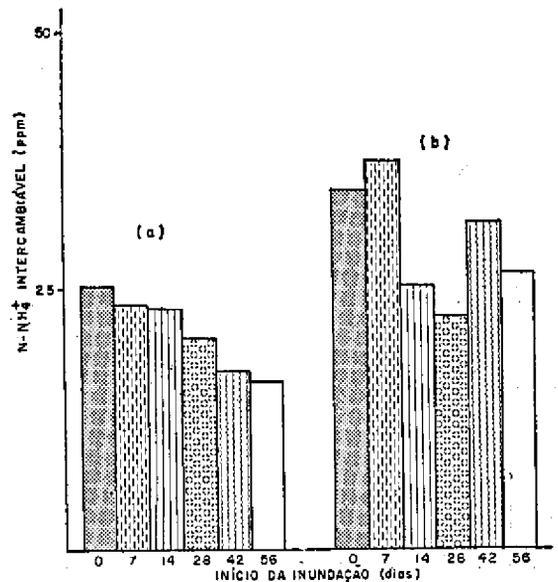


FIG. 5. Concentração de $N-NH_4^+$ intercambiável determinada no solo Pelotas (a) e no solo Formiga (b) ao final do experimento.

As Fig. 6 e 7 mostram, também, que o solo Formiga apresentou maior quantidade de nitrogênio, no início da inundação, do que o solo Pelotas. Entretanto, a partir da terceira semana, a situação foi modificada.

A análise da variância dos resultados obtidos da soma do $N-NH_4^+$ mais o $N-NO_3^-$ mostrou que, em ambos os solos, os tratamentos diferiram significativamente (teste F a 1% de probabilidade).

A análise da variância mostrou, para cada uma das épocas de determinação química do nitrogênio, diferenças significativas entre os tratamentos no que se refere aos teores de $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$ e $NO_3^- + NH_4^+$ (teste F a 1% de probabilidade). Também pelo teste F, os solos estudados diferiram significativamente nos teores de nitrogênio presentes na solução, ao nível de 1% de probabilidade. A interação solo x tempo de incubação foi significativa ao nível de 1% de probabilidade.

CONCLUSÕES

Em função da discussão dos resultados apresentados no presente trabalho, ficou determinado que a nitrificação do NH_4^+ depende diretamente do tempo em que o solo é mantido em contato com o ar atmosférico. Também o tipo de solo influencia a intensidade de oxidação do nitrogênio amoniacal.

Quando se modificam as condições de óxido-redução causadas pela inundação do solo, os nitratos nele presentes são reduzidos a nitrogênio gasoso. Por outro lado, depois da inundação do solo, a concentração de NH_4^+ na solução aumenta, devido, principalmente, à substituição deste cátion pelo Fe^{2+} e Mn^{2+} no complexo de intercâmbio e à liberação do NH_4^+ resultante da decomposição anaeróbica da matéria orgânica.

Para a liberação do NH_4^+ depois da inundação do solo, tem importância a quantidade deste composto retida em forma intercambiável, a qual será tanto maior quanto menor for o tempo de contato do solo com o ar atmosférico.

REFERÊNCIAS

Allison, F.E., Janet, H.D. & Roller, E.M. 1953. Availability of fixed ammonium in soils containing different clay minerals. *Soil Sci.* 75:361-362.

Association of Official Agricultural Chemists 1965. Official methods of analysis of the Association of Official Agricultural Chemists. Horwitz, W. (ed.) Assoc. Off. Agric. Chem., 10th ed., New York, p. 17.

Black, C.A. 1968. Soil-plant relationships, 2nd ed. John Wiley, New York. 792 p.

Broadbent, F.E. & Clark, F. 1965. Denitrification. *Agronomy* 10:344-359.

Divisão de Pesquisa Pedológica 1971. Mapa de levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul.

Eno, C.F., Blue, W.G. & Good Jr., J.M. 1955. The effect of anhydrous ammonia on nematodes, fungi, bacteria, and nitrification in some Florida soils. *Soil Sci. Soc. Proc.* 19:55-58.

Jackson, M.L. 1958. Soil chemical analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York. 498 p.

Leal, J.R. & Alvahydo, R. 1972. Transformação e deslocamento do íon amônio em solo da série Itaguaí. *Pesq. agropec. bras., Sér. Agron.*, 6:129-135.

Matsushima, S. 1964. Nitrogen requirements at different stages of growth, p. 219-242. In *Int. Rice Res. Inst. (ed.) The mineral nutrition of the rice plant*. Johns Hopkins Press, Baltimore.

Moraes, J.F.V. & Freire, C.J.S. 1974. Variação do pH, da condutividade elétrica e da disponibilidade dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio em quatro solos submetidos à inundação. *Pesq. agropec. bras., Sér. Agron.*, 9: 35-43.

Nömmik, H. & Thorin, J. 1972. Transformations of N^{15} -labelled nitrite and nitrate in forest raw hummus during anaerobic incubation. Proceedings of a Symposium at the International Atomic Energy Agency, Vienna.

Ponnampuruma, F.N. 1965. Dinamic aspects of flooded soils, p. 295-328. In *Int. Rice Res. Inst. (ed.) The mineral nutrition of the rice plant*. Johns Hopkins Press, Baltimore.

Sanchez, P.A. 1972. Nitrogen fertilization and management in tropical rice. *North Carolina Agric. Exp. Stn Tech. Bull.* 213.

Tisdale, S.L. & Nelson, W.L. 1969. Soil fertility and fertilizers. 2nd ed. MacMillan Company, New York. 694 p.

Viets Jr., F.G. 1965. The plant's need for and use of nitrogen. *Agronomy* 10:503-549.

Velasquez Hernandez, A. 1971. Determinación del amonio no intercambiable y la capacidad de fijación del amonio en distintos suelos de México. Tese M.Sc., Escuela Nacional de Agricultura, México. 65 p.

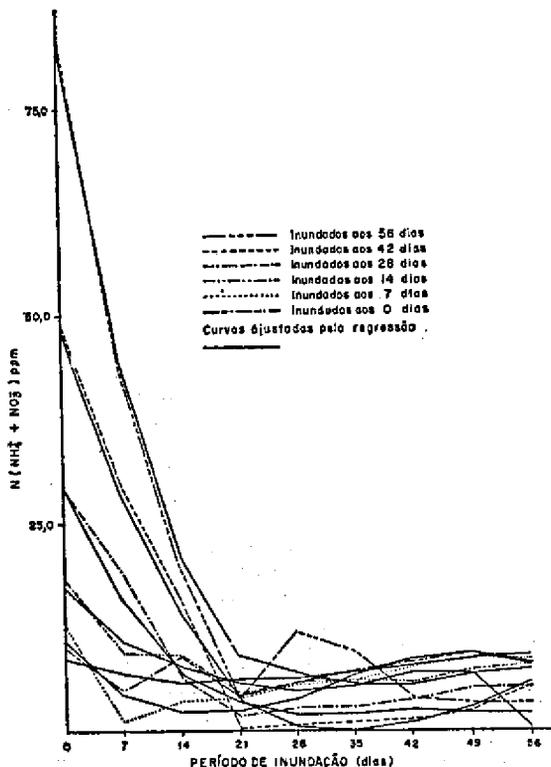


FIG. 6. Efeito da época de inundação do solo sobre a concentração do N ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) na solução do solo Formiga.

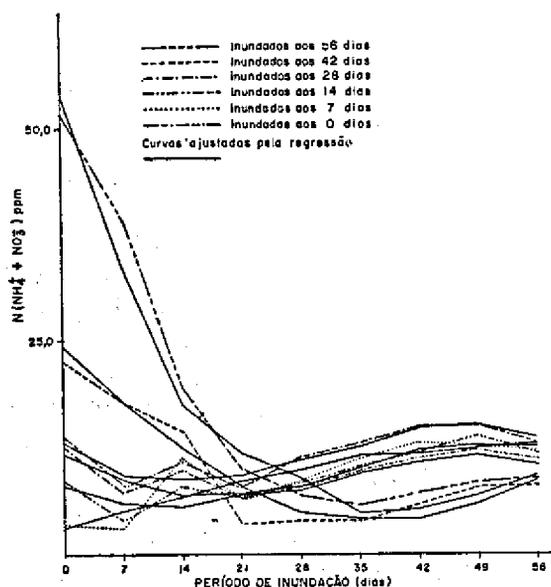


FIG. 7. Efeito da época de inundação do solo sobre a concentração do N ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) na solução do solo Pelotas.

ABSTRACT.- Moraes, J.F.V.; Freire, C.J.da S.; Silva, E.C.da [Nitrogen transformations in two rice soils of Rio Grande do Sul under submerged conditions]. Transformações do nitrogênio em dois solos submetidos a inundação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Série Agronomia* (1975) 10, 25-30 [Pt, en] EMBRAPA, Cx. Postal E, Pelotas, RS, Brazil.

A laboratory experiment was conducted with the objectives of studying nitrogen transformation in two rice soils of Rio Grande do Sul. Samples of the soils were treated with 100, 120, and 100 kg/ha of N, P, and K, respectively, applied as $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, K_2HPO_4 and KCl. The treated soils were then adjusted to moisture contents approximating their field moisture capacities and incubated at room temperature for periods of 0, 7, 14, 28, 42, or 56 days.

At the end of each incubation period the soils were flooded, soil percolate collected every 7 days, and percolates analyzed for nitrate (NO_3) and ammonium (NH_4). Exchangeable ammonium was measured in each soil after flooding was terminated. The analytical results were used to calculate the extent and rate of nitrogen transformations.

Oxidation of nitrogen of ammonium was a direct function of the amount of time during which the treated soils were incubated at field moisture capacity prior to flooding. Soil type also significantly influenced the rate of ammonium oxidation.

Additional index words: Nitrification, nitrification rates, nutrient leaching.