

DINÂMICA DO FÓSFORO EM UM MOLISSOL DO URUGUAI
SOB TRÊS SISTEMAS AGRÍCOLAS E A LONGO PRAZO (1964-1989)

DAVID ALEJANDRO MORÓN YACOEL
Engenheiro-Agrônomo

Orientador: PROF. DR. JORGE DE CASTRO KIEHL

Tese apresentada à Escola Superior
de Agricultura "Luiz de Queiroz",
da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de Concentração:
Solos e Nutrição de Plantas.

P I R A C I C A B A

Estado de São Paulo - Brasil

Outubro - 1990

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Morón Yacoel, David Alejandro

M868d Dinâmica do fósforo em um molissol do Uruguai sob
três sistemas agrícolas e a longo prazo (1964-1989).
Piracicaba, 1990.
195p.

Tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Fósforo em solo - Uruguai 2. Solo - Adubação -
Uruguai 3. Solo - Química - Uruguai I. Escola Super-
ior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.41

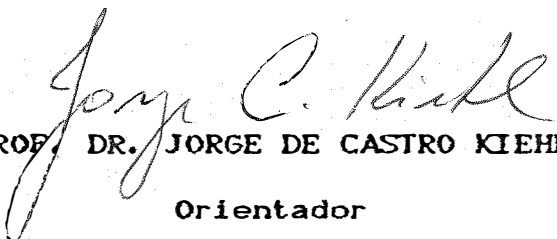
DINÂMICA DO FÓSFORO EM UM MOLISSOL DO URUGUAI
SOB TRÊS SISTEMAS AGRÍCOLAS E A LONGO PRAZO (1964-1989)

ALEJANDRO MORÓN YACOEL

Aprovada em: 23/11/1990

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Jorge de Castro Kiehl ESALQ/USP
Prof. Dr. Toshiaki Kinjo ESALQ/USP
Prof. Dr. Carlos Clemente Cerri CENA/USP
Prof. Dr. Geraldo Victorino de França ESALQ/USP
Dr. Bernardo Van Raij IAC


PROF. DR. JORGE DE CASTRO KIEHL
Orientador

Aos meus pais,

Alejandro Elías e Flora,

AGRADEÇO.

À Inés, minha esposa,

e aos nossos filhos,

Patricia Victoria,

Lucía Magdalena,

Alejandro Elías,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Jorge de Castro Kiehl, pelo apoio e estímulo na realização do curso de Doutorado e do presente trabalho.

Ao Departamento de Solos da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", pela oportunidade de realização do Curso de Doutorado.

Ao Eng. Agr. MSc. Roberto Diaz, chefe do Projeto Solos da Estação Experimental "La Estanzuela", pelo apoio na realização do curso de Doutorado e desta pesquisa.

Ao Brasil, que através da CAPES e CNPq prestou apoio financeiro na realização do Curso de Doutorado.

Ao Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas (IICA), pelo apoio financeiro na realização do Curso de Doutorado.

Ao Dr. H. Bassewitz da GTZ (Alemanha), pelo apoio financeiro do presente trabalho.

Ao Convênio CIAAB-BID pelo apoio financeiro do presente trabalho.

À senhora Cloris Silva pela colaboração no laboratório de análise do Projeto Solos da Estação Experimental "La Estanzuela".

À minha esposa Inés, pelo seu apoio e colaboração no presente trabalho.

Ao técnico em estatística Wilfredo Ibañez, pela colaboração na análise estatística.

Ao Dr. Walter Baethgen da FAO, pelas sugestões feitas para o presente trabalho.

À Senhora Myriam Ernest do laboratório de análises do Projeto Solos da Estação Experimental "La Estanzuela", pelo cuidado e conservação das amostras de solo do presente trabalho.

À Estação Experimental "La Estanzuela" e aos funcionários técnicos e não técnicos que direta ou indiretamente trabalharam a partir do ano de 1963 neste trabalho de rotações.

Ao Dr. Jose Luis Arzeno, colega do curso de Doutorado, por sua sincera amizade.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiv
SUMMARY	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. O Fósforo no Solo	4
2.1.1. O fósforo na solução do solo	4
2.1.2. O fósforo na fase sólida	6
2.1.2.1. O fósforo na fase sólida inor- gânica	7
2.1.2.2. O fósforo na fase sólida orgâ- nica	13
2.1.2.3. O fósforo disponível	23
2.2. Alterações do Equilíbrio	32
2.2.1. Transformações durante a pedogênese ...	33
2.2.2. As reações entre o P aplicado e o solo.	36
2.2.3. A remoção do fósforo através de produ- tos agrícolas e animais	42
2.2.4. As perdas do fósforo pela ação da chuva	45
2.2.5. Efeito do cultivo e da adubação com fósforo	52
2.2.6. Efeito da pastagem e de adubação fosfa- tada	60

	Página
3. MATERIAL E MÉTODOS	70
3.1. Pluviosidade e Temperaturas Locais	70
3.2. Classificação e Propriedades dos Solos	71
3.3. Delineamento Experimental, Instalação e Condução do Experimento	73
3.4. Dados do Experimento Selecionados para este Estudo	79
3.4.1. Produção das culturas	79
3.4.2. Teores de carbono orgânico e nitrogênio total do solo	80
3.5. Determinação das Formas de Fósforo do Solo ...	80
3.6. Determinação da Retenção de Fósforo com Base nas Isotermas de adsorção	83
3.7. Determinação do Fósforo na Biomassa Microbiana do Solo	84
3.8. Métodos Estatísticos	86
3.9. Balanço do Fósforo na Área do Experimento	87
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4.1. Sistema 1: Agricultura Contínua Sem Adubação .	92
4.1.1. Balanço do fósforo na área do experimento	93
4.1.2. Mudança no estágio interno do fósforo no sistema 1	96
4.2. Sistema 2: Agricultura contínua com adubação .	108
4.2.1. Balanço do fósforo na área do experimento	109

	Página
4.2.2. Mudança no estágio interno do fósforo no Sistema 2	112
4.3. Sistema 5: Agricultura em rotação com pastagem com adubação	123
4.3.1. Balanço do fósforo na área do experimento	124
4.3.2. Mudanças no estágio interno do fósforo no Sistema 5	128
4.4. Relação Entre o P Disponível e Outras Frações Segundo Análises de correlação e regressão Múltiplas	139
4.5. Efeitos dos Sistemas na Capacidade do Solo em Reter Fósforo	145
4.6. Efeitos dos Sistemas no Nível de Fósforo Presente na Biomassa Microbiana do Solo	148
5. CONCLUSÕES	150
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
APÊNDICE	170

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Mudanças nas formas e quantidades do P do solo com o tempo	34
2	Evolução da concentração de fósforo total no Sistema 1 durante o período 1964-87	94
3	Evolução da concentração de fósforo orgânico no Sistema 1 durante o período 1964-87	97
4	Evolução da concentração de fósforo inorgânico no período 1964-87	97
5	Evolução da relação entre conteúdos de C orgânico - P orgânico no Sistema 1 durante o período 1964-87	99
6	Evolução da relação entre conteúdos de N total e P orgânico no Sistema 1 durante o período 1964-86	99
7	Evolução da concentração de fosfato de alumínio no Sistema 1 durante o período 1964-87	100
8	Evolução da concentração de fosfato de ferro no Sistema 1 durante o período 1964-87	101
9	Evolução da concentração de fosfato de cálcio no Sistema 1 durante o período 1964-87 .	101
10	Evolução da concentração do fosfato ocluso no Sistema 1 durante o período 1964-87	103
11	Evolução do conteúdo das formas oclusas dentro do P inorgânico no Sistema 1 durante o período 1964-87	104
12	Evolução da relação entre frações do P inorgânico no Sistema 1 durante o período 1964-87	105
13	Evolução da concentração do P disponível - Bray I no Sistema 1 durante o período 1964-87	106

Figura		Página
14	Evolução da concentração do P disponível - resinas no Sistema 1 durante o período 1964-87	106
15	Evolução da concentração de fósforo total no Sistema 2 durante o período 1964-87	110
16	Evolução da concentração do fósforo orgânico no Sistema 2 durante o período 1964- 87	113
17	Evolução da relação entre conteúdos de C orgânico e P orgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87	113
18	Evolução da relação entre conteúdos de N total e P orgânico no Sistema 2 durante o período 1964-86	114
19	Evolução da concentração de fósforo inorgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87 ...	114
20	Evolução da concentração de fosfato de alumínio no Sistema 2 durante o período 1964-87 ..	115
21	Evolução da concentração de fosfato de ferro no Sistema 2 durante o período 1964-87	116
22	Evolução da concentração de fosfato de cálcio no Sistema 2 durante o período 1964-87	116
23	Evolução da concentração do fosfato ocluso no Sistema 2 durante o período 1964- 87	118
24	Evolução do conteúdo das formas oclusas dentro do P inorgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87	119
25	Evolução da relação entre frações do P inorgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87	120
26	Evolução da concentração do P disponível - Bray I no Sistema 2 durante o período 1964-87	120
27	Evolução da concentração do P disponível - resinas no Sistema 2 durante o período 1964-87	121
28	Evolução da concentração de fósforo total no Sistema 5 durante o período 1964-87	125

Figura		Página
29	Evolução da concentração do fósforo orgânico no Sistema 5 durante o período 1964-87	129
30	Evolução da relação entre conteúdos de C orgânico e P orgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87	129
31	Evolução da relação entre conteúdos de N total e P orgânico no Sistema 5 durante o período 1964-86	130
32	Evolução da concentração de fósforo inorgânico no Sistema 5 durante o período 1964-87 ...	131
33	Evolução da concentração do fosfato de alumínio no Sistema 5 durante o período 1964-87 ..	132
34	Evolução da concentração do fosfato de ferro no Sistema 5 durante o período 1964-87	132
35	Evolução da concentração de fosfato de cálcio no Sistema 5 durante o período 1964-87	133
36	Evolução da concentração de fosfato ocluso no Sistema 5 durante o período 1964-87	133
37	Evolução do conteúdo das formas oclusas dentro do P inorgânico no Sistema 5 durante o período 1964-87	134
38	Evolução da relação entre frações do P inorgânico no Sistema 5 durante o período 1964-87	135
39	Evolução da concentração do P disponível - Bray I no Sistema 5 durante o período 1964-87	136
40	Evolução da concentração de P disponível-resinas no Sistema 5 durante o período 1964-87	136
41	Relação entre a qualidade do P inorgânico e o P disponível - Bray I nos três Sistemas durante o período 1964-87	141

Figura		Página
42	Relação entre a qualidade do P inorgânico e o P disponível-resinas nos três Sistemas durante o período 1964-87	141
43	Relação entre o PAI e o P disponível-resinas nos três Sistemas durante o período 1964-87 .	143
44	Relação entre o PAI e o P disponível - Bray I nos três Sistemas durante o período 1964-87 .	143
45	Isoterma de adsorção de P no Sistema 1 Média de blocos e anos 1986-87	145
46	Isoterma de adsorção de P no Sistema 2 Média de blocos e anos 1986-87	146
47	Isoterma de adsorção do P no Sistema 5 Média de blocos e anos 1986-87	146

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Propriedades químicas de amostras de solo coletadas nos blocos I, II e III em 1963 e 1964	72
2	Sequência das culturas nos sistemas 1 e 2, para os blocos I, II e III	74
3	Sequência das culturas no sistema 5, para os blocos I, II e III	75
4	Doses de fósforo aplicadas no sistema 2, para os blocos I, II e III (superfosfato, kg P_2O_5 /ha/ano)	77
5	Doses de fósforo aplicados no sistema 5, para os blocos I, II e III (superfosfato, kg P_2O_5 /ha/ano)	78
6	Teste estatístico para diferença entre coeficientes de regressões lineares no Sistema 1. Período 1964-73, b1. Período 1974-87, b2 ...	93
7	Fósforo total ($\mu g P/g$) na profundidade 20-40 cm	94
8	Aproximação a um balanço de fósforo total (kg P_2O_5 /ha/ano) no Sistema 1	95
9	Sistema 1, coeficientes de regressões (b) e intervalos de confiança. Porcentagem de variação no período 1964-87	107
10	Teste estatístico para diferença entre coeficientes de regressão lineares no Sistema 2. Período 1964-73, b1. Período 1974-87, b2.	109
11	Aproximação a um balanço de fósforo total (kg P_2O_5 /ha/ano) no sistema 2	111
12	Sistema 2, coeficientes de regressão (b) e intervalos de confiança. Porcentagem de variação no período 1964-87	122

Tabela		Página
13	Teste estatístico para diferença entre coeficientes de regressões lineares no Sistema 5. Período 1964-73,b1. Período 1974-87,b2	124
14	Aproximação a um balanço de fósforo total (kg P_2O_5 /ha/ano) no Sistema 5	126
15	Sistema 5, coeficientes de regressões (b) e intervalos de confiança. Porcentagem de variação no período 1964-87	138
16	Matriz de correlação linear entre as diferentes frações do fósforo do solo. Análise conjunta dos Sistemas 1, 2 e 5. Período 1964-87	140
17	Correlação e regressões múltiplas. Análise conjunta dos Sistemas 1, 2 e 5. Período 1964-87	144
18	Retenção de fósforo na fase sólida do solo para distintas concentrações na solução. Média de blocos e anos 1986-87 para os Sistemas 1, 2 e 5	147
19	Fósforo ($\mu g P/g$) na biomassa microbiana do solo	148

DINÂMICA DO FÓSFORO EM UM MOLISSOL DO URUGUAI SOB TRÊS SISTEMAS AGRÍCOLAS E A LONGO PRAZO (1964-1989)

Autor: DAVID ALEJANDRO MORÓN YACOEL

Orientador: PROF. DR. JORGE DE CASTRO KIEHL

RESUMO

No presente trabalho procurou-se obter uma caracterização ampla e a longo prazo da evolução do fósforo do solo em três sistemas agrícolas de produção. Os sistemas foram selecionados de um experimento da rotação de culturas instalado em 1963 na Estação Experimental "La Estanzuela", no Uruguai. O solo dominante na área de estudo é um Molissol. Os sistemas selecionados foram: Sistema 1, rotação de culturas sem adubação; Sistema 2, rotação de culturas com adubação; e Sistema 5, rotação de culturas incluindo pastagens, com adubação. O tamanho das parcelas e o delineamento do ensaio fizeram com que o solo fosse trabalhado a favor do declive (3%). Os Sistemas 2 e 5 receberam uma aplicação média anual de $40 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$. No Sistema 5 a forragem era cortada e devolvida ao solo. Dados de produção de grãos no período 1964-87 eram disponíveis e foram utilizados neste estudo.

Amostras de solo coletadas anualmente das parcelas do experimento à profundidade de 0-20 cm durante o mesmo período também eram disponíveis, tendo sido submetidas

às seguintes determinações químicas: P total por digestão com $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$; P orgânico por ignição a 240°C ; fracionamento do P inorgânico segundo CHANG & JACKSON (1957) modificado; P disponível segundo os métodos de BRAY & KURTZ (1945) modificado e o da resina de troca catiônica de ZAMUZ & CASTRO (1974) modificado. O P inorgânico total e o P ocluso foram calculados por diferença. Dados do conteúdo de C orgânico e N total das amostras eram disponíveis e foram utilizados para estudar a evolução das relações C/P e N/P orgânicos durante os muitos anos de cultivo. O efeito dos sistemas de rotação na capacidade de retenção de fósforo do solo foi avaliado em amostras coletadas em 1986 e 1987. A quantidade de fósforo na biomassa microbiana do solo foi determinada em amostras frescas coletadas em 1989.

O balanço do conteúdo de P total do solo mostrou que a erosão foi a principal via de saída nos três sistemas de cultivo. No Sistema 1, o balanço foi claramente negativo, no Sistema 2 foi próximo de zero e no Sistema 3 mostrou-se positivo. No Sistema 1 o P orgânico foi a fração que apresentou o maior decréscimo com o tempo de cultivo. Os resultados do Sistema 2 revelaram que a aplicação de P não deteve esse decréscimo, mas no Sistema 3 isso foi conseguido pela inclusão de pastagens no esquema de rotação.

A quantidade de fosfato de alumínio no solo sob rotação de culturas sem adubação diminuiu 60% no período 1964-87. O P disponível (Bray I e resina) também sofreu acentuada redução durante o período. A aplicação de P aumen-

tou a quantidade de todas as frações de P inorgânico, sendo que 48% passaram para a fração oclusa no solo sob rotação sem pastagem e 61% quando a pastagem foi incluída.

Os teores de P disponível (Bray I) no solo sob o Sistema 2 de rotação foram sempre superiores a 12 $\mu\text{g P/g}$, enquanto sob o Sistema 5 o conteúdo foi menor que os anteriores na maioria dos anos. A fração fosfato de alumínio foi a que melhor se correlacionou com o P disponível (Bray I e resina).

As relações C orgânico/P orgânico e N total/P orgânico no solo sob rotação sem adubação decresceram durante o período de 1964 e 1987. Nos demais sistemas a tendência não foi significativa.

Para manter a concentração de 0,1 $\mu\text{g P/ml}$ na solução do solo, o solo sob o Sistema 1 exigiu na fase sólida 48% mais fósforo que os solos dos demais sistemas.

A rotação de culturas com pastagem aumentou a quantidade de P na biomassa microbiana.

DYNAMICS OF PHOSPHORUS IN AN URUGUAYAN MOLLISOL UNDER THREE LONG-TERM (1964-1989) AGRICULTURE SYSTEMS

Author: DAVID ALEJANDRO MORÓN YACOEL

Adviser: DR. JORGE DE CASTRO KIEHL

SUMMARY

This work intended to obtain a broad and long-term characterization of the evolution of soil phosphorus under three systems of agriculture production. The systems were selected from a crop rotation experiment started in 1963 at the "La Estanzuela" Experiment Station, in Uruguay. The prevailing soil in the study area is a Mollisol. The selected systems were: System 1, crop rotation without fertilization; System 2, crop rotation with fertilization; and System 5, crop rotation including pasture, with fertilization. Due to the large area involved and the experimental design, soil operations were performed downhill (3% slope). Systems 2 and 5 received an average annual application of 40 kg P_2O_5 /ha. In System 5 the forage material was cut and returned to the soil. Data of grain yields for the period of 1964-89 was available and utilized in this study.

Soil samples collected annually from the experimental plots at the depth of 0-20 cm during the same period were also available and subjected to the following chemical analysis: total-P by HNO_3-HClO_4 digestion;

organic-P by ignition at 240°C ; inorganic P fractionation according to modified method of CHANG & JACKSON (1957); available-P according to modified method of BRAY & KURTZ (1945) and cation exchange resin modified method of ZAMUZ & CASTRO (1974). Total inorganic-P and occluded-P were calculated by difference. Data of organic-C and total-N content of these samples was available and utilized to study the evolution of the organic-C and total-N content of these samples was available and utilized to study the evolution of the organic C/P and N/P ratios during the many years of cultivation. The effect of the rotation systems on the phosphorus retention capacity of the soil was evaluated in samples collected in 1986 and 1987. The amount of phosphorus in the soil microbial biomass was determined in fresh samples collected in 1989.

The balance for total-P content of the soil showed that erosion was the main route of P loss in all the cropping systems. Balance in System 1 was clearly negative, in System 2 was close to zero and in System 5 was positive. In System 1 the organic-P was the fraction showing the greatest decrease with time of cultivation. Results from System 2 showed that application of P did not hinder this decrease, but in System 5 this was achieved by including pastures in the rotation program.

The amount of aluminum-P in the soil under crop rotation without fertilization was reduced in 60% from

1964 to 1987. The available-P (Bray I and resin) was also markedly reduced during this period. The application of P increased the amount of all inorganic-P fractions; 48% of the applied P was converted to occluded-P in the soil under crop rotation without pastures, and 61% when pastures were included.

Available-P (Bray I) content in the soil under System 2 was always above 12 $\mu\text{g P/g}$, whereas under System 5 the content was smaller than the former for most of the years. Aluminum-P was the fraction that best correlated to available-P (Bray I and resin).

The organic-C/organic-P and total-N/organic-P ratios in the soil under crop rotation without fertilization decreased during the period of 1964 to 1987. For the other systems the trend was not significant.

To maintain a phosphorus concentration of 0.1 $\mu\text{g P/ml}$ in the soil solution, soil under System 1 required in the solid phase amount of phosphorus 48% higher than the average amount necessary for the soils under Systems 2 and 5.

Crop rotation including pastures increased the amount of P in the microbial biomass.

1. INTRODUÇÃO

No Uruguai, o nitrogênio e o fósforo são os dois principais nutrientes que limitam o rendimento das culturas e pastagens. Além de ser o nutriente mais consumido, o fósforo é um insumo importado.

A partir de 1980, no Uruguai foram desenvolvidas diversas pesquisas com a finalidade de avaliar as melhores doses de fósforo para diferentes culturas, comparar diferentes fontes desse nutriente, selecionar e calibrar métodos de análise do solo, dentre outros objetivos. Entre o final da década dos 70 e o início da década dos 80, realizaram-se estudos, sobre a evolução do fósforo disponível, especialmente em pastagens (CASTRO *et alii*, 1981a; MORÓN & PEREZ, 1981).

O conhecimento da dinâmica do fósforo é necessário para aumentar a eficiência biológica e econômica de sua utilização. Este conhecimento, segundo HARRISON (1985) deve ser apoiado tanto no balanço do nutriente no ecossistema, como nas transformações do nutriente no solo.

Como continuação da pesquisa sobre fósforo, no Uruguai, este trabalho procurou obter uma caracterização ampla e a longo prazo da evolução do nutriente em diversos

sistemas agrícolas de produção. Não é um fato comum na pesquisa agrícola poder-se dispor de informações coletadas ao longo de mais de vinte anos. Neste trabalho, teve-se a oportunidade de realizar um estudo utilizando-se amostras de solo sob rotação de culturas, num experimento conduzido na Estação Experimental "La Estanzuela", Uruguai.

Os sistemas agrícolas estudados foram selecionados sob a hipótese geral de que as formas de fósforo no solo apresentariam dinâmicas contrastantes, permitindo compreender melhor a evolução das mesmas a longo prazo. Especificamente, propôs-se estudar os seguintes aspectos:

- 1) Quantificar as alterações do nível de fósforo total no solo através do tempo, assim como as entradas e saídas do ecossistema.
- 2) Conhecer as frações do fósforo que fazem possível manter um sistema sem adubação.
- 3) Identificar e quantificar a evolução das frações do fósforo no solo que são afetadas pela adubação fosfatada.
- 4) Conferir a importância da imobilização do fósforo na forma orgânica durante o período em que o solo permaneceu com pastagens.
- 5) Estabelecer relações entre a variação do fósforo disponível e as diversas frações do fósforo no solo.
- 6) Quantificar a evolução das relações carbono orgânico: fósforo orgânico e nitrogênio total: fósforo orgânico.

- 7) Estudar as alterações que provocam os distintos sistemas na capacidade de retenção de fósforo pelo solo.
- 8) Estudar a importância do fósforo presente na biomassa microbiana na dinâmica desse nutriente no solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O Fósforo no Solo

2.1.1. O fósforo na solução do solo

As raízes das plantas absorvem o fósforo da solução do solo. Normalmente o P inorgânico encontra-se na solução do solo como H_2PO_4^- ou HPO_4^{2-} dependendo do pH do solo o predomínio de uma ou de outra forma (LINDSAY, 1979).

DALAL (1977), em uma completa revisão sobre o P orgânico, enfatiza que a solução do solo pode conter apreciável quantidade de P orgânico. Conclui que a concentração de P orgânico na solução do solo pode ultrapassar a do P inorgânico, e que fração hidrolisável pode ser absorvida pelas plantas diretamente ou depois de ser desfosforilada pelas enzimas fosfatases perto da raiz.

Para algumas plantas, a concentração ótima na solução do solo tem sido estimada em $0,03 \mu\text{g P inorgânico/ml}$, enquanto para outras pode ser 25 vezes maior (ASHER & LONERAGAN, 1967). BECKWITH (1965), sugeriu um valor para a maioria das plantas de $0,2 \mu\text{g P inorgânico/ml}$, reconhecendo que este valor poderia variar segundo o solo, assim como

para diferentes culturas. FOX & KAMPRATH (1970), trabalhando com diversos solos tratados com quantidades de P suficientes para obter uma concentração na solução de $0,2 \mu\text{g P inorgânico/ml}$, obtiveram 95% do máximo rendimento de *Pennisetum typhoides* cultivado durante 4 semanas.

Como a concentração na solução do solo é normalmente inferior à necessária, a mesma torna-se um fator limitante no processo de absorção. A necessidade de se conhecer a relação entre o fósforo da solução e o da fase sólida tem levado ao desenvolvimento de isotermas de solubilidade e isotermas de adsorção.

As isotermas de solubilidade de diversos minerais fosfatados em função do pH têm sido apresentadas por LINDSAY (1979) e OLSEN & KHASAWNEH (1980). As isotermas de solubilidade são úteis para conhecer os minerais fosfatados que podem estar controlando a concentração na solução. Sua maior limitação é que sua construção baseia-se em supor a presença de compostos cristalinos puros em equilíbrio com a solução, quando isso é difícil de ocorrer em um meio heterogêneo como o solo (OLSEN & KHASAWNEH, 1980).

As isotermas de adsorção também são úteis na medida que nos informam as relações solução-fase sólida. A habilidade do solo de reter fósforo em curto espaço de tempo, caracterizada pelas isotermas de adsorção, relaciona-se negativamente com a eficiência de utilização do adubo aplicado (BARROW, 1975). Existe a dúvida se a habilidade de reter fósforo em curto prazo relaciona-se com as chamadas

reações "demoradas" entre o solo e o P aplicado (BARROW, 1980a). As reações demoradas determinam uma retrogradação até formas mais estáveis e de menor utilidade para as plantas (BARROW, 1980b).

Dada uma concentração de fósforo na solução do solo - limitante ou não - a quantidade correspondente de fósforo na solução em um determinado momento é várias vezes inferior à quantidade que absorve uma cultura ou pastagem em um período de crescimento. Portanto, sua reposição a partir da fase sólida torna-se imprescindível.

2.1.2. O fósforo na fase sólida

O fósforo na fase sólida pode dividir-se em dois grandes grupos: inorgânico e orgânico. Embora essa divisão facilite o estudo, não se deve esquecer o fato de que cada fração, orgânica e inorgânica, é parte de um ciclo complexo. Neste sentido, SMECK (1985) assinala que, enquanto os estudos ecológicos geralmente têm enfatizado o fluxo de P dentro de compartimentos orgânicos (flora, fauna, serapilheira, microorganismos e matéria orgânica do solo), os estudos em pedologia e adubação têm tradicionalmente examinado as transformações do P inorgânico dentro do solo.

SMECK (1985) sustenta que é necessário integrar essas duas aproximações para desenvolver um conhecimento mais compreensivo da dinâmica do fósforo no ecossistema solo.

2.1.2.1. O fósforo na fase sólida inorgânica

O fósforo inorgânico encontra-se combinado com metais como ferro, alumínio e cálcio, assim como com minerais argilosos de grade 1:1 ou 2:1.

A proporção relativa dos compostos inorgânicos de fósforo com ferro, alumínio ou cálcio é dependente do pH e da quantidade e natureza dos minerais existentes na fração argila. Nos solos ácidos com predomínio de caulinita e óxidos de Fe e Al, são mais importantes as combinações com ferro e alumínio. No entanto, nos solos neutros ou calcários têm maior importância os fosfatos combinados com cálcio, os quais formam compostos de baixa solubilidade.

Segundo revisão realizada por SAMPLE *et alii* (1980), há muito tempo a precipitação e a adsorção têm sido os mecanismos alternativos utilizados para esclarecer a retenção de fósforo. Embora a precipitação seja às vezes considerada, o mecanismo da adsorção de fósforo ao Fe e Al parece ser mais importante porque normalmente a quantidade de Fe e Al na solução do solo não é suficiente para precipitar todo o fósforo imobilizado.

RYDEN *et alii* (1977) sugerem que a adsorção específica do fósforo na superfície dos óxidos de Fe ocorre através da substituição da água ou de oxidrilas, sendo esse um dos processos que afetam a disponibilidade do elemento para a planta. Com o tempo há um processo de envelhecimento do fosfato adsorvido (menor solubilidade) que vai tomando

uma constituição mineralógica mais estável e de mais difícil solubilização.

Segundo SAMPLE *et alii* (1980), parece ser opinião dominante que sob baixas concentrações de fósforo, os óxidos hidratados retêm o fósforo por reações de adsorção, porém, em altas concentrações a precipitação seria o mecanismo envolvido. Os mesmos autores sustentam que não existe consenso real sobre as contribuições relativas de cada mecanismo na retenção de fósforo no solo. Além disso, assinalam que na prática agrícola, altas quantidades de adubo fosfatado solúvel são aplicadas como grânulos ou soluções concentradas, cujas consequências no solo são comparáveis à dos grânulos porque a solução do solo adjacente à região de aplicação adquire concentrações muito altas em fósforo.

Como os óxidos de Fe e Al podem estar carregados positivamente quando existem valores de pH abaixo do ponto de carga zero, a retenção de fósforo poderia ser processada através de mecanismos não específicos de troca iônica. Segundo RYDEN *et alii* (1977), este mecanismo carece de importância.

Outro mecanismo que tem sido proposto para explicar a retenção de fósforo no solo é a combinação do fósforo com os minerais de argila. As possíveis reações seriam:

- Substituição de um grupo OH^- ligado a um átomo de alumínio estrutural.
- Ligação com cálcio no complexo de troca para formar um complexo argila-Ca- PO_4 .

A retenção de fósforo é maior em minerais argilosos de grade tipo 1:1 que nos de grade 2:1. Isto é explicado pela maior quantidade de grupos Al-OH que aqueles minerais têm expostos em relação aos minerais argilosos tipo 2:1. A intensidade da fixação segundo a mineralogia da fração argila segue a seguinte ordem: óxidos amorfos (incluindo alofana) > óxidos cristalinos (goetita, gibsitita) > argilas 1:1 > argilas 2:1 (SANCHEZ, 1981; STEVENSON, 1986).

Nos solos calcários, a química do fósforo é dominada pelos carbonatos. Da revisão de SAMPLE *et alii* (1980) surge a observação de que a adsorção de fósforo domina quando soluções diluídas de P são adicionadas ao CaCO_3 , porém, as reações de precipitação prevalecem em soluções concentradas de P. Nesses solos, os compostos solúveis de fósforo, com o tempo, vão se transformando em carbonatoapatita, que é altamente insolúvel.

CHANG & JACKSON (1957) classificaram o fósforo inorgânico do solo em quatro principais grupos: fosfato de cálcio, fosfato de alumínio, fosfato de ferro e fosfato solúvel em redutores.

O fósforo solúvel em redutores ou P ocluso refere-se ao fósforo fisicamente encapsulado por minerais que são estruturalmente desprovidos de fósforo. Assim, o P ocluso é fisicamente protegido das interações com formas mais reativas. Geralmente o P é ocluso pelos óxidos de Fe (hematita e goethita). O P ocluso é chamado de P solúvel em redutores porque pode ser liberado por um agente redutor como

citrato-ditionito. O P ocluso pela gibsita pode ser liberado pelo NaOH, enquanto o encapsulado por minerais primários ou secundários, chamado inorgânico residual, só pode ser liberado por tratamentos muito fortes com solução de HF ou fusão com Na_2CO_3 (SMECK, 1985).

CHANG & JACKSON (1957) propuseram um fracionamento químico do fósforo inorgânico que consiste de uma série de extrações sucessivas de uma mesma amostra do solo com diferentes extratores. O método baseia-se na seletividade de determinados reativos em solubilizar classes ou grupos definidos de P inorgânico. Pode ser esquematizado da seguinte forma:

1) Fosfatos hidrossolúveis:

Extração com NH_4Cl 1N

2) Fosfatos de Alumínio (PAI):

Extração com NH_4F 0,5 (pH 7,0)

3) Fosfato de ferro (PFe):

Extração com NaOH 0,1N

4) Fosfato de cálcio (PCa):

Extração com H_2SO_4 0,5N

5) Fosfatos de Fe oclusos:

Extração com ditionito-citrato

6) Fosfatos de Al oclusos:

Extração com NH_4F 0,5N

O P extraído no primeiro passo geralmente tem uma magnitude muito baixa. ROCHE et alii (1980), utilizando esse método de fracionamento, e com o objetivo de simplifi-

car a determinação de P oclusos calculou essa fração pela diferença entre o P total e a soma PAI + PFe + PCa + Porgânico.

Como o NH_4F pode extrair PFe além de PAI, CHANG & JACKSON (1957) propuseram que a fração PFe extraída com NaOH fosse incrementada em cerca de 10%, descontando essa quantidade do fósforo extraído com NH_4F (pH 7,0).

PETERSON & COREY (1966) apresentaram duas modificações para o esquema de CHANG & JACKSON (1957). Para minimizar a extração de PFe quando se utiliza o NH_4F , os autores ajustaram o pH deste último para 8,2. O P solúvel em redutores foi extraído antes do tratamento com H_2SO_4 para evitar extração do PFe e do PAI oclusos, pelo reativo ácido.

Nos solos calcários a aplicação de NH_4F na presença de CaCO_3 determina a formação de CaF_2 , que é capaz de reter P que logo é recuperado em outras frações como P ocluso ou PCa. SYERS *et alii* (1972), para contornar esse problema, eliminaram a extração com NH_4F . O custo dessa alteração foi não poder separar as frações PFe e PAI. Sua proposta pode ser esquematizada da seguinte forma:

1) Fosfatos de Fe e Al:

Extração com NaOH 0,1N.

2) Fosfato adsorvido pelos carbonatos no item (1):

Extração com NaCl 0,1N e solução citrato-bicarbonato.

3) P ocluso dentro de óxidos de Fe e óxidos hidratados:

Extração com solução citrato-ditionito-bicarbonato.

4) Fosfato de cálcio:

Extração com HCl 1N.

5) Fosfato inorgânico:

P inorgânico residual.

OLSEN & KHASAWNEH (1980) criticaram o esquema de CHANG & JACKSON (1957) porque não diferencia componentes individuais dentro de uma classe. Assim, se estiverem presentes fosfatos monocálcico e fosfato dicálcico (relativamente solúveis) junto com hidroxiapatita e fluorapatita (baixa solubilidade), todos estariam dentro da classe fosfatos cálcicos. Da revisão por eles realizada surge que a principal crítica é a pouca exatidão da diferenciação entre PAI e PFe. Para resolver este problema diversos autores aumentaram o pH do NH₄F a valores entre 8,2 e 8,5.

STEVENSON (1986) sintetizou as limitações dos diversos esquemas de fracionamento do P inorgânico:

- 1) Parte do fósforo que é liberado pode ser readsorvido a partir da solução por diversos compostos do solo.
- 2) Produtos intermediários da reação do adubo aplicado podem resistir durante anos e o comportamento dos produtos durante sucessivas extrações não é conhecido.
- 3) Parte do P inorgânico pode estar sendo derivado de formas orgânicas.

O fracionamento de CHANG & JACKSON (1957), modificado ou não, tem sido amplamente utilizado para pesquisar as formas do P inorgânico nativo e as transformações do P aplicado com adubo (STEVENSON, 1986). No Uruguai, o método

foi utilizado em trabalhos de caracterização das formas de fósforo no solo (ESCUADERO & MORÓN, 1979) assim como para estudar as relações das diversas frações com a disponibilidade para as plantas (MENDEZ, 1975; ZAMALVIDE *et alii*, 1975).

2.1.2.2 O fósforo na fase sólida orgânica

O conteúdo de P orgânico no solo varia de forma considerável, oscilando geralmente entre 20 e 80% do fósforo total no horizonte superficial (DALAL, 1977).

O conteúdo de P orgânico é medido pelo incremento que se produz na fração inorgânica, quando o P orgânico é convertido em ortofosfato. Existem duas vias importantes para se realizar essa conversão: ignição ou extrações sucessivas com HCl e NaOH.

No método de ignição, o P orgânico é convertido em P inorgânico pela ignição do solo a altas temperaturas, sendo então calculado pela diferença entre o P inorgânico extraído por ácidos em amostras de solo submetidas e não submetidas à ignição. Segundo DALAL (1977), a principal deficiência deste método surge quando se utilizam altas temperaturas, que aumentam a solubilidade da fração inorgânica. Isto conduz a uma superestimativa do P orgânico. LEGG & BLACK (1955) desenvolveram o método para uma temperatura não elevada (240°C).

O método de extrações sucessivas com HCl e NaOH (METHA *et alii*, 1954) tem o problema de poder produzir

alguma hidrólise do P orgânico nos pré-tratamentos com ácidos (STEVENSON, 1986). Soma-se ainda o fato de ser uma análise mais trabalhosa que a da ignição.

Menos da metade dos compostos de fósforo orgânico do solo podem usualmente ser identificados (DALAL, 1977; TIESSEN & STEWART, 1983) ficando o resto como fósforo não extraível ou em associação com ácidos húmicos ou ácidos fúlvicos (TIESSEN & STEWART, 1983).

DALAL (1977), em sua revisão sobre fósforo orgânico do solo, diz que dos componentes identificados, o inositol-fosfato é a fração dominante, enquanto os ácidos nucléicos e seus derivados e os fosfolipídeos abrangem apenas pequena fração do P orgânico.

Uma alternativa para identificação dos compostos individuais é empregar procedimentos de extração de frações do P orgânico de acordo com a estabilidade em relação a reativos específicos, e tentar relacioná-los com a biodisponibilidade. Neste sentido, BOWMAN & COLE (1978b) tentaram obter frações que variavam desde as formas lábeis até as altamente resistentes, com um "turnover time" de centenas de anos. Quatro categorias foram estabelecidas:

- 1) Formas lábeis, extraídas pelo NaHCO_3 0,5M;
- 2) Formas moderadamente lábeis, compostas de P orgânico solúvel em ácidos e P inorgânico solúvel em álcalis;
- 3) Fração moderadamente resistente em álcalis e ácidos (P-ácido fúlvico);

4) Fração resistente, solúvel em álcalis mas insolúvel em ácidos (P-ácido húmico).

PARTON *et alii* (1988) desenvolveram um modelo de simulação abrangente e a longo prazo, envolvendo a influência de certas variáveis como clima e manejo, na dinâmica de C, N, P e S em agroecossistemas. No submodelo de fósforo, a fração P orgânico foi dividida em três frações:

- a) Uma fração ativa, contituída pela biomassa microbiana e metabólitos, apresentando uma relação C/P de 30 a 80, e um valor de "turnover time" de 2 a 4 anos.
- b) Uma fração protegida física e quimicamente, mais resistente à decomposição, apresentando uma relação C/P de 90 a 200 e um "turnover time" de 20 a 50 anos.
- c) Uma fração química e fisicamente protegida, apresentando um longo "turnover time" de 800 a 1200 anos e uma relação C/P de 20 a 200.

A biomassa microbiana é definida como a parte viva da matéria orgânica do solo, excluindo as raízes das plantas e os grandes animais. Devido à sua magnitude e ao fato de ser o maior componente lábil da matéria orgânica do solo, a biomassa é um importante reservatório de nutrientes potencialmente disponíveis para as plantas (SIQUEIRA & FRANCO, 1988). Segundo STEWART & TIESSEN (1987), a natureza dinâmica do P orgânico é encoberta pelo fato de só uma pequena porção do total da matéria orgânica ser biologicamente

ativa. Sustentam que o componente central do ciclo ativo do P orgânico é o P na biomassa microbiana.

BROOKES *et alii* (1982) e HEDLEY & STEWART (1982) desenvolveram métodos para medir o P contido na biomassa microbiana. Nos dois métodos as células microbianas são rompidas por fumigação com clorofórmio (CHCl_3), seguindo-se extração do fósforo liberado com NaHCO_3 0,5M.

STEWART & SHARPLEY (1987), esquematizando o ciclo do fósforo, descrevem a atividade microbiana como uma roda que se movimenta em resposta às entradas de carbono. A roda poderia deter-se ou diminuir de velocidade se houver queda nas entradas de carbono ou esterilização parcial do solo, ficando então o suprimento das plantas limitando ao P inorgânico lábil. No entanto, se a roda está operando, as plantas têm maior quantidade de P em solução, dado que este está sendo repostado a partir de formas inorgânicas e orgânicas lábeis.

BROOKES *et alii* (1984), estudando o P presente na biomassa microbiana de 15 solos com históricos agrícolas contrastantes, verificaram que perto de 3% do P orgânico encontram-se na biomassa de solos aráveis, e de 5 a 24% em solos sob pastagens. No mesmo trabalho, admitindo-se que a biomassa microbiana seca contém 50% de carbono, a porcentagem de P na biomassa variou desde um valor mínimo de 1,4% até uma máximo de 4,7% com uma média de 3,25%.

McLAUGHLIN *et alii* (1988), estudando o ciclo do P em solo sob rotação trigo/pastagem, chamam a atenção

pelo fato de o P presente na biomassa microbiana ter sido aproximadamente 4 vezes maior que o presente no trigo. Nesse sentido, sugerem a necessidade de outras pesquisas para determinar os fatores envolvidos na liberação desse fósforo.

HALM *et alii* (1979), estudando o ciclo do fósforo em um ecossistema de pastagens naturais, salientaram que as populações de fungos e bactérias no solo contêm mais P que a quantidade total presente no material vegetal.

Segundo a revisão de TIESSEN & STEWART (1983), a liberação do P contido na população microbiana é controlada por fatores ambientais como congelamento, secagem ou predação da fauna do solo.

As relações C/N, C/P e C/S da biomassa microbiana do solo variam amplamente. A relação C/N varia de 3 a 20, a relação C/P de 10 a 150 e a relação C/S de 47 a 494 (STEWART, 1987).

A composição da biomassa microbiana com respeito aos compostos fosfatados tem sido estudada em culturas de laboratório. Acima de 60% do P microbiano intracelular se encontra na forma de ácidos nucleicos, 20% como ésteres solúveis em ácido e 5% como fosfolipídeos (STEWART & TIESSEN, 1987). Pode haver ampla variação em todas as formas metabolicamente ativas.

Os compostos químicos que caracterizam o P orgânico na biomassa microbiana e o P orgânico no solo são muito diferentes. A porcentagem do P orgânico que se encontra na forma de inositol no solo (>30%) é bem mais elevada

que a que se encontra na biomassa microbiana (<10%) (STEWART & TIESSEN, 1987). Essa diferença é o resultado de uma estabilização preferencial dos componentes do P orgânico no ambiente do solo (TIESSEN & STEWART, 1983).

O fósforo orgânico forma parte da matéria orgânica e segue em sua totalidade o esquema de acumulação e perda da mesma (DALAL, 1977; STEVENSON, 1986).

Embora o P orgânico se encontre bem correlacionado com o C e o N, os fatores que afetam seu equilíbrio não necessariamente afetam ao C e N na mesma extensão (ANDERSON, 1980). O conteúdo de P na matéria orgânica varia mais que o conteúdo de N ou S (DALAL, 1977).

A relação C orgânico: P orgânico no solo e nos resíduos das plantas tem sido utilizada para predizer a ocorrência de imobilização ou mineralização líquida no solo. STEVENSON (1986) sugere que com relações C orgânico: P orgânico inferiores a 200 predomina a mineralização, enquanto que acima de 300 prevalece a imobilização. Entre valores de 200 e 300 existiria um equilíbrio entre mineralização e imobilização. DALAL (1977) diz que o índice C/P pode não ser consistente em prever imobilização ou mineralização, já que as quantidades de P inorgânico presentes nos materiais vegetais são significativas e muito variáveis. Também pode haver limitações na formação de P orgânico pela insuficiência na disponibilidade de nitrogênio.

McGILL & COLE (1981), em revisão sobre a ciclagem de C, N, S e P na matéria orgânica, propõem que os

ciclos desses elementos no húmus do solo podem ser melhor interpretados com um esquema de um sistema dicotômico. Elementos como N e parte do S ligados ao C são estabilizados como resultado direto da associação com carbono. São mineralizados como resultado da necessidade de oxidação do carbono para prover energia. Assim, aqueles elementos — P ou S — existentes como ésteres (C-O-S ou C-P-O) seriam estabilizados através de reações com componentes do solo e seriam mineralizados por enzimas extracelulares cuja produção por plantas e microorganismos é controlada pela concentração do produto final, isto é, pela quantidade de P inorgânico solúvel do meio.

McGILL & COLE (1981) sugerem que as fosfohidrolases são produzidas em resposta às necessidades de P, sendo reprimidas quando o suprimento de P é adequado. A relação C/P na matéria orgânica é afetada pelas quantidades relativas de C e P mineralizadas. Nos solos com altos conteúdos de P lábil, a produção de fosfohidrolases é reprimida durante a oxidação da matéria orgânica. Assim, o P orgânico tende a acumular-se em relação ao carbono, resultando matéria orgânica com baixa relação C/P, geralmente menor que 100. Nos solos com baixo conteúdo de P lábil, a produção de fosfohidrolases é induzida, resultando liberação de P pela hidrólise de ésteres mais rapidamente que o C oxidado. Neste caso, a matéria orgânica poderia exibir uma relação C/P de 200 ou mais.

Uma vez que a mineralização do P orgânico é controlada pela aplicação do produto final, P lábil, MCGILL & COLE (1981) chamaram o processo de "mineralização bioquímica", em contraste com a clássica mineralização biológica do carbono. Assim, se as raízes das plantas têm necessidades de P, podem hidrolisar ésteres (C-O-P), não necessitando da intermediação microbiana.

Por outro lado, HARRISON (1982) estudou a relação entre a mineralização do P orgânico lábil e as propriedades físicas e químicas de 50 solos de floresta. A mineralização do P orgânico lábil foi estudada através do comportamento do RNA marcado com ^{32}P . As principais variáveis que influenciaram positivamente foram o pH e o conteúdo de cálcio trocável, havendo forte interação com a estação do ano e o material geológico. A mineralização aumentou dez vezes para a faixa de pH (3,1 - 7,9) encontrada nesses solos e foi cinco vezes mais rápida na primavera que no outono.

Compilando informações de diversos autores, STEWART & SHARPLEY (1987) chegaram à conclusão de que em geral as quantidades absolutas e relativas de P orgânico mineralizado são maiores nos solos mais meteorizados dos trópicos que nos de regiões temperadas.

A imobilização do fósforo depende da disponibilidade de fósforo inorgânico lábil e de substratos orgânicos para o crescimento e manutenção da biomassa microbiana do solo (STEWART & TIESSEN, 1987). A acumulação do P orgânico no solo é primeiro um resultado da atividade microbiana

(DALAL, 1977) e não da acumulação de material vegetal ou animal.

SHARPLEY (1985a) analisou a variação estacional nas quantidades e formas de P em diversos solos de pastagens e outras culturas. Durante dois anos foram tomadas quase mensalmente, amostras de solos adubados e não adubados. Nos solos não adubados o P total e o P inorgânico ficaram praticamente constantes durante os dois anos, enquanto o P orgânico assumia valores mais baixos no verão que no inverno. Nos solos adubados o P total e o P inorgânico apresentavam incrementos importantes por ocasião da adubação. O P orgânico apresentou um comportamento similar ao dos solos não adubados. A variação no P orgânico tanto para solos adubados como não adubados foi explicada pelas variações da fração moderadamente lábil (fraccionamento de BOWMAN & COLE, 1978b). As frações lábil e as mais resistentes ficaram constantes.

ANDERSON (1980) sustentava que o P orgânico no solo não deveria ser considerado como perdido ou indesejável. As evidências apresentadas sugerem que essa fração seja olhada como um reservatório que aumenta ou diminui segundo as condições do solo e do clima.

HEDLEY *et alii* (1982) utilizaram um esquema de fraccionamento que abrange tanto a fração inorgânica como a orgânica. Seu procedimento pode ser esquematizado como segue:

Fração	Tratamento	Comentários
1	Extração com resinas de troca aniônica na forma de bicarbonato	Remove as formas biologicamente mais disponíveis do P inorgânico
2a	Extração com NaHCO_3 0,05M	Remove P inorgânico e orgânico lábeis adsorvidos nos minerais do solo mais uma pequena fração do P presente na biomassa microbiana.
2b	Tratamento com clorofórmio (CHCl_3) seguido de extração com NaHCO_3 0,5M	A diferença entre 2b e 2a representa P inorgânico e orgânico proveniente da biomassa microbiana. Constitui-se até 40% do P presente na biomassa microbiana do solo.
3	Extração com NaOH	Remove componentes inorgânico e orgânico ligados fortemente por quimio-adsorção à superfície dos compostos de Fe e Al.
4	Extração com NaOH 0,1M seguida de tratamento com ultrassom	Permite a extração de P inorgânico e orgânico contido na superfície interna dos agregados do solo.
5	Extração com H_2SO_4 1 M	Remove principalmente minerais tipo apatita, mas também P ocluído em solos meteorizados.
6	Oxidação com H_2O_2 e digestão ácida com H_2SO_4 do resíduo final	São as formas mais estáveis do P orgânico e relativamente insolúveis do P inorgânico.

Dentro das frações 2a, 2b, 3 e 4 o método separa as partes orgânica e inorgânica. Este método foi amplamente utilizado na Universidade de Saskatchewan (Canadá).

2.1.2.3. O fósforo disponível

Do ponto de vista da disponibilidade do fósforo para as plantas, tem sido muito difundido o esquema desenvolvido por LARSEN (1977): P solução \leftrightarrow P lábil \leftrightarrow P não lábil. É essencialmente um estabelecimento de equilíbrios químicos inorgânicos.

Classicamente, entende-se por lábil ou disponível, aquela fração do fósforo inorgânico presente na fase sólida capaz de repor o fósforo da solução do solo à medida que a concentração deste último tende a diminuir devido à absorção pelas raízes das plantas em crescimento.

A avaliação do P disponível mediante métodos de extração — a via mais utilizada — baseia-se no princípio de agitar uma amostra de solo com uma solução que solubiliza a fração ou uma parte proporcional, do que seria disponível para as plantas. A quantidade de fósforo solubilizada não é uma fração bem definida, dado que varia com a solução extratora utilizada, o tempo de agitação e a relação solo: solução. Além disso, independentemente de dissolver fósforo, a solução extratora pode reagir com outros componentes (óxidos, argilas, carbonatos) e ter sua capacidade de

extração modificada, comportando-se de diferentes formas em diversos solos.

Portanto, o resultado da análise de P lábil ou disponível, obtido mediante soluções extratoras, não tem muito valor se tomado isoladamente. O extrator será válido e os valores obtidos terão algum significado somente se os resultados se correlacionarem com a resposta em produção de matéria seca e ou fósforo absorvido pela espécie vegetal de interesse.

KAMPRATH & WATSON (1980) apresentaram uma classificação completa dos extratores e os mecanismos envolvidos na remoção do P disponível. Afirmam que os métodos Bray I (CHCl_3 0,025 N + NH_4F 0,03 N) e Olsen (NaHCO_3 0,5 M pH 8,5) foram os que melhor se comportaram para uma ampla faixa de condições de solo.

Segundo JACKSON (1964), o método Bray I age mediante o ión F, que complexa os íons Al e Fe com a conseqüente liberação do fósforo retido por estes cátions trivalentes. Além disso, solubiliza a parte mais reativa dos fosfatos de cálcio devido ao baixo pH e evita a precipitação do P solubilizado pela ação do fluor.

O método de Olsen diminui a concentração de cálcio em solução pela formação de CaCO_3 e, por outro lado, aumenta a concentração de P em solução. Segundo JACKSON (1964), o extrator de Olsen também remove parte do P da superfície dos fosfatos de ferro e alumínio, que são mais abundantes nos solos neutros e ácidos.

No Uruguai, os dois métodos mais utilizados para extração do P disponível têm sido Bray I e resinas de intercâmbio catiônico saturadas com hidrogênio (ZAMUZ & CASTRO, 1974). No método de resinas catiônicas, a solubilização do fósforo é obtida por meio da fixação de cátions (ferro, alumínio, cálcio) por parte das resinas e a correspondente acidificação do meio.

KAMPRATH & WATSON (1980) concluíram que, para solos ácidos a neutros o fosfato de alumínio é a fonte primária de P para as plantas junto com um pouco de CaHPO_4 que possa estar presente. Os autores afirmam que tanto o método de Olsen como o de Bray I correlacionam-se primariamente com os fosfatos de alumínio.

GONÇALVES *et alii* (1986), trabalhando principalmente com Latossolos, verificaram em ensaios de vasos com *Pennisetum typhoides*, que a fração PAI foi a que melhor se correlacionou com o P absorvido. Por outro lado, BARBOSA FILHO *et alii* (1987), trabalhando com arroz cultivado também em Latossolos, obtiveram correlação significativamente negativa entre o P disponível medido por Bray I e os fosfatos de alumínio. As mesmas tendências foram observadas com respeito à porcentagem de P na parte aérea.

No Uruguai, MENDEZ (1975) e ZAMALVIDE *et alii* (1975) encontraram que tanto para o método Bray I, como para o de resinas de intercâmbio catiônico, a principal associação encontra-se com a fração PAI (fracionamento de CHANG & JACKSON, 1957). MENDEZ (1975), trabalhando com um Molissol,

encontrou as correlações mais baixas para os dois métodos com a fração PCa e intermediárias com a PFe. ZAMALVIDE *et alii* (1975), através de ensaios em vasos realizados com um espectro amplo de solos, verificaram que o método de resinas de intercâmbio catiônico associou-se em segundo lugar com os PCa e por último com os PFe.

A importância da liberação de fósforo a partir da fração orgânica para culturas e pastagens, especialmente em regiões tropicais, tem sido documentada em diversas revisões (ANDERSON, 1980; STEWART & SHARPLEY, 1987; STEWART & TIESSEN, 1987). Segundo ANDERSON (1980), a contribuição do P orgânico em regiões temperadas é mais lenta e a disponibilidade do P inorgânico é o principal fator que influi na resposta vegetal, não obstante haver encontrado alguns efeitos do P orgânico.

GILLINGHAM (1987), abordando o tópico do ciclo do fósforo sob pastagens, comenta que a mineralização da matéria orgânica contribui ao P disponível, mas que isto provavelmente seja mais importante em regiões de alta precipitação (como a Nova Zelândia) onde os solos podem conter 15 a 20% de matéria orgânica no horizonte A, que em regiões de baixa precipitação (como certas zonas dos EUA e Europa) onde os solos podem ter menos de 5% de matéria orgânica.

BOWMAN & COLE (1978a) demonstraram que mediante uma modificação do método de Olsen é possível medir ou detectar frações lábeis (mineralizáveis rapidamente) do P orgânico. O P orgânico lábil foi detectado nos extratos de

NaHCO através do incremento no P inorgânico depois de realizar uma digestão ácida nitro-perclórica. Foi demonstrado que o ácido ribonucléico RNA, os nucleotídeos (adenosina, cistidina, guanina e uridina) e os glicerofosfatos são frações mineralizáveis em curtos períodos de tempo, sendo possível detectá-las pelo método de Olsen modificado. Por outro lado, compostos como o fitato mostraram não ser mineralizáveis e, portanto praticamente não eram detectados pelo método de Olsen modificado.

BOWMAN & COLE (1978a) sugerem ser apropriado usar a soma de P inorgânico e P orgânico (extraído com NaHCO₃) como melhor indicador do comportamento vegetal, especialmente nos solos considerados deficientes segundo índice obtido por extração de fósforo inorgânico. BOWMAN & COLE (1978b) observam que em pastagens, uma alta porcentagem do fósforo total encontra-se na forma orgânica e que quando o teor de P inorgânico é menor que o nível adequado, as plantas devem depender da mineralização do P orgânico. Assim, o P inorgânico pode subestimar o potencial de P disponível para as plantas, especialmente em pastagens.

A partir de 168 amostras de solos do Departamento de Agricultura dos EUA - que representavam oito das dez ordens da "Soil Taxonomy" - TIESSEN *et alii* (1984) estudaram a distribuição do fósforo através das diferentes frações (HEDLEY *et alii*, 1982) e suas respectivas relações. Dentro da ordem Molissol o P lábil extraído pelas resinas aniônicas foi explicado em cerca de 86% pelas variações nas

frações moderadamente lábeis de P inorgânico (bicarbonato-P inorgânico e hidróxido-P inorgânico). Por outra parte, nos Ultissóis, os solos mais meteorizados, os 80% da variabilidade na fração resinas aniônicas foi explicado pela variação da fração orgânica mais lábil (bicarbonato-P orgânico). Isto sugeriria que a mineralização do P orgânico seria o principal fator determinante da disponibilidade de P nestes solos.

SHARPLEY *et alii* (1987) tomaram 120 amostras do horizonte A1 de solos não adubados e não cultivados de distintas partes do mundo. Foram divididos em calcários, levemente meteorizados (principalmente Molissóis) e altamente meteorizados (principalmente Oxissóis e Ultissóis). Realizaram-se extrações com Bray I ($\text{NH}_4\text{F} + \text{HCl}$), Mehlich ($\text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$), Olsen (NaHCO_3) e Texas A&M ($\text{NH}_4\text{Ac} + \text{EDTA}$) e o fracionamento de HEDLY *et alii* (1982). O objetivo foi determinar a contribuição relativa de resinas e as frações inorgânicas e orgânicas mais lábeis e as mais estáveis nas diferentes análises de P disponível. Uma quantidade significativamente maior do P orgânico foi observada nos solos altamente meteorizados (112 mg P/kg, 26% do P total) do que nos solos calcários (36 mg P/kg, 7% do P total). A associação entre o P orgânico e o P disponível em solos sem culturas e altamente meteorizados, é confirmada em todas as análises de P disponível executadas. SHARPLEY *et alii* (1987) sustentam que esse fato deve ser cuidadosamente considerado quando se avalia a fertilidade desses solos.

SHARPLEY (1985a) estudou a variação estacional nas quantidades e formas de P em pastagens e culturas de Oklahoma e Texas, EUA. Durante dois anos foram tomadas amostras quase mensalmente de solos adubados e não adubados, a uma profundidade de 0-5 cm. O P disponível (Bray I) em solos não adubados mostrou leve incremento nos meses de outono e valores mínimos durante a estação de crescimento de primavera e verão. O P disponível dos solos não adubados mostrou uma associação com o P orgânico, apresentando um coeficiente de determinação $r^2 = 0,81$. Ao contrário, os solos adubados apresentaram associação de P disponível com P inorgânico ($r^2 = 0,88$).

STEWART & SHARPLEY (1987), discutindo a dinâmica do ciclo do P no solo, concluem que as limitações dos métodos de análises de P disponível se devem ao fato de que só medem as formas inorgânicas e não levam em conta a contribuição das formas orgânicas mineralizadas e o histórico da área. A inclusão da contribuição da mineralização da matéria orgânica deve ter em conta a estacionalidade do "turnover" do fósforo.

SPARLING *et alii* (1985, 1987) chamaram a atenção sobre a interferência do P presente na biomassa microbiana nas análises de P disponível. Os valores de P disponível a partir de extratos de solos secos ao ar, como são utilizados no teste de Olsen, podem estar superestimados. Isto é verdade particularmente em solos com altos conteúdos de biomassa microbiana.

No trabalho realizado por SPARLING *et alii* (1985) em 15 solos sob pastagens da Nova Zelândia estudou-se o efeito do secamento das amostras nas mudanças no P inorgânico extraído com NaHCO_3 0,5 M. O secamento das amostras produziu um incremento exceto em 2 solos nos valores do P inorgânico extraído com NaHCO_3 que variava de 14-184%. A estimativa da contribuição da morte de microorganismos na análise de P inorgânico extraído com NaHCO_3 variava entre 0,4 e 15,8 $\mu\text{g/g}$ solo, ou seja, de 4 a 76% da quantidade extraída em solos secos. Assim, a contribuição do P presente na biomassa microbiana pode fazer com que solos deficientes apareçam com valores de suficiência. Isso é porque não se conhece quanto disponível é o P presente na biomassa microbiana.

Por outra parte, PARFITT *et alii* (1989) estudaram o papel da biomassa microbiana na perda de disponibilidade em diversos solos da Nova Zelândia. Seus resultados sugerem que a biomassa microbiana pode competir eficazmente com as plantas pelo P inorgânico. O P presente na biomassa microbiana incrementou-se com o nível de P aplicado e com o crescimento das plantas. A quantidade de P absorvida pela biomassa microbiana durante os ensaios em vasos foi similar à absorvida por *Trifolium repens* (trevo branco). PARFITT *et alii* (1989) afirmam que a ciclagem do fósforo através da biomassa microbiana pode ser importante e, a nível de campo, pode contribuir para a constatada perda estacional (outono) de disponibilidade de fósforo em pastagens.

BROOKES *et alii* (1984), admitindo um "turnover time" de 2,5 anos para o P presente na biomassa microbiana, calcularam o fluxo anual de P através da biomassa em uma profundidade de 10 cm. Para oito solos sob pastagens esse fluxo foi, em média, de 23 kg P/ha/ano, enquanto para seis solos sob culturas a média foi de 7 kg P/ha/ano. Para BROOKES *et alii* (1984) estes resultados sugerem que a biomassa poderia ter uma contribuição significativa para a nutrição das plantas em pastagens. Este enfoque positivo sobre o papel da biomassa não concorda, portanto, com o sugerido pelo trabalho de PARFITT *et alii* (1989).

Por outro lado, CAMPBELL *et alii* (1984) estudaram o efeito da umidade e temperatura nos teores de P inorgânico extraído com NaHCO_3 para distintas rotações agrícolas em um Chernozem, franco, de Saskatchewan (Canadá). Realizaram-se correlações simples e múltiplas (stepwise) relacionando P extraído com bicarbonato durante o período primavera-outono de 1974-78, com a umidade do solo no momento da coleta das amostras e com a média dos 5 anos das temperaturas máximas no ar para as distintas datas de coleta das amostras. Os níveis de P disponível em bicarbonato foram relativamente baixos quando a temperatura e a umidade eram baixas. Esses níveis aumentavam linearmente com o conteúdo de umidade e temperatura. O incremento causado pela temperatura foi maior que o provocado pela umidade. Entre 66 e 88% da variação no P disponível extraído com NaHCO_3 nos primeiros 15 cm de solo foram relacionados com a umidade do solo,

a temperatura do ar e a interação desses fatores. CAMPBELL *et alii* (1984) não sugerem quais mecanismos podem estar envolvidos nesses efeitos.

Por último, caberia mencionar o conceito de biodisponibilidade utilizado por BARBER (1984). Este autor entende a biodisponibilidade como o processo de fornecimento de nutrientes para as plantas, integrando os conceitos de disponibilidade de nutrientes do ponto de vista da química de solos, com o processo de absorção radicular estudado pela fisiologia vegetal. Na situação específica do fósforo, é interessante salientar que determinados resultados mostram a existência de variações em determinadas características radiculares que afetam o processo de absorção, cuja importância pode ser igual ou maior que a variação da concentração do fósforo na solução do solo.

2.2. Alterações do Equilíbrio

Em um ecossistema natural, a curto e médio prazo as distintas frações anteriormente mencionadas encontram-se em um equilíbrio dinâmico, sendo o ciclo do fósforo virtualmente fechado. Podem ser identificados dois processos que tendem a modificar os equilíbrios:

a) As transformações produzidas pela pedogênese as quais abrangem períodos de centenas ou milhares de anos.

b) As práticas agrícolas que o homem adota quando passa a utilizar o solo. Essas práticas, como a adubação fosfatada,

os cultivos contínuos sem adubação ou cultivos de pastagens determinam importantes modificações no equilíbrio do fósforo no solo. Como resultados podem ser alteradas as quantidades totais de fósforo, assim como as distintas frações e a relação entre elas.

2.2.1. Transformações durante a pedogênese

WALKER & SYERS (1976) estudaram cronossequências de solos desenvolvidos em ambientes contrastantes com o objetivo de conhecer as transformações do P na pedogênese. O estudo baseou-se no fracionamento do P contido em uma sequência de solos da Nova Zelândia. Tomaram-se quatro cronossequências diferentes, muito pouco modificadas pelo homem, sob diferentes climas (650 a 5090 mm anuais), com diferentes materiais de origem e com vegetação de floresta ou pastagem em clímax. A Figura 1 esquematiza as tendências encontradas. O P presente em minerais primários é denominado PCa. O P total inicialmente todo na forma PCa registra perdas importantes em solos velhos sob climas úmidos. Na cronossequência Franz Josef, com uma média de chuva de 5090 mm, e considerando um perfil de 75 cm de profundidade, registra uma perda anual de 0,5 kg P/ha/ano avaliada para um período de 22.000 anos. Por outro lado, para a cronossequência de Canterbury de origem aluvial com 650 mm anuais e sob pastagens, as perdas anuais não foram significativas em período de 6000 anos.

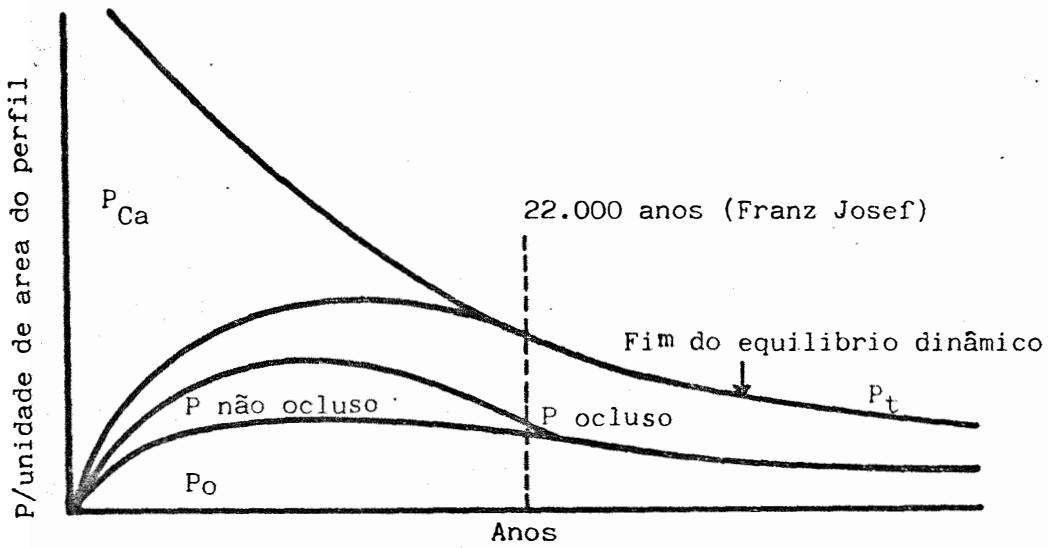


Figura 1. Mudanças nas formas e quantidades de P do solo com o tempo (WALKER & SYERS, 1976).

O modelo geral para o P em minerais primários é de declinar com o tempo, chegando a zero depois de 22000 anos em cronossequências úmidas. O P não ocluso sofre aumento inicial, enquanto o P ocluso aumenta durante o desenvolvimento do ecossistema. Quando alcança-se o equilíbrio dinâmico, o P ocluso e o P orgânico são as principais formas presentes; o quociente C orgânico: P orgânico é alto e a disponibilidade deveria ser muito baixa.

Para SMECK (1985) as transformações do P inorgânico acompanham a meteorização, e o processo é análogo a uma rua de uma só mão, com o P dos minerais primários sendo finalmente convertido em P ocluso, passando por formas intermediárias solúveis, lábeis e minerais secundários. Segundo o autor, de fato existe uma competição entre a via orgânica e a via inorgânica pelo P solúvel. Dado que a via inorgânica continua movimentando uma fração de P solúvel dentro do P ocluso, esta via poderia prevalecer após determinado tempo. Assim, no ponto final das transformações haveria no solo somente P ocluso e P orgânico, e nesse ponto, as plantas seriam dependentes da mineralização do P orgânico.

SMECK (1985) esquematizou as relações entre o conteúdo de P e suas formas, com o estado de desenvolvimento do solo e com as classes da "Soil Taxonomy". Com base na atividade das argilas, o grau de meteorização geralmente aumenta na seguinte seqüência: Entissol, Inceptissol, Molissol, Alfissol, Vertissol, Aridissol, Ultissol e Oxissol. Considera-se que todos os solos são derivados de

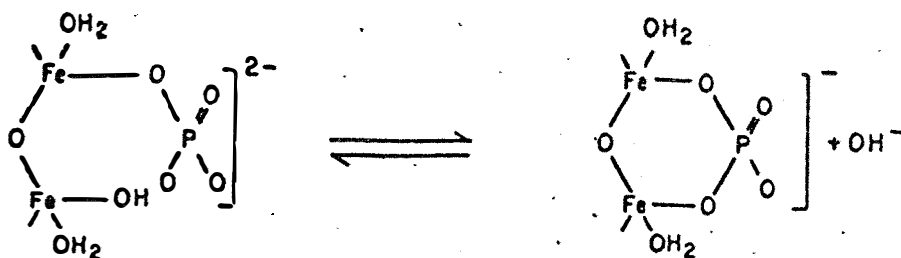
materiais de origem similares. O P total diminuiria dos Entissois para os Oxissois devido aos efeitos combinados da meteorização e lixiviação. O P dos minerais primários poderia ser uma grande fração do P em ordens fraca ou moderadamente meteorizadas, enquanto o P não ocluído (em minerais secundários) teria maior importância nos Alfissóis, Spodossois e Ultissois. O P ocluído é alto nos Ultissois e dominante nos Oxissois. Por último, o P orgânico alcança valores máximos nos moderadamente diferenciados Vertissois, Molissois e Alfissóis, e diminui nas ordens com estádios de meteorização mais avançados.

2.2.2. As reações entre o P aplicado e o solo

É conhecido que o efeito dos adubos fosfatados solúveis diminui com o tempo. Os fatores envolvidos são a remoção em produtos agrícolas, a lixiviação, a erosão, a imobilização em produtos orgânicos estáveis e as reações com o solo.

Segundo BARROW (1980b), quando o P solúvel é agregado ao solo ocorrem duas reações entre o P da solução e o solo: a) uma reação rápida, na qual o P é adsorvido à fase sólida e b) uma reação lenta, na qual o P é retido de uma forma mais energética. Um dos mecanismos freqüentemente invocado para explicar as duas reações entre o P e o solo processa-se através da reação inicial de adsorção de um dos átomos de oxigênio do ortofosfato. A segunda reação envolve

a ligação a um segundo átomo de oxigênio. OLSEN & KHASAWNEH (1980) apresentaram o seguinte esquema:



Fósforo adsorvido
reversível (lável)

Fósforo adsorvido
irreversível (não lável)

BARROW (1980b) afirma que a reação lenta envolve um período de vários anos, no qual há diminuição exponencial da intensidade com o tempo. A descrição matemática seria:

$$y = (1 + Kt)^{-b}$$

onde:

y = proporção de P que permanece disponível;

t = período de tempo considerado;

K e b = coeficientes.

O esquema de LARSEN (1977) mencionado em 2.1.2.3, é útil para entender a reação do solo com o P solúvel aplicado, como uma oposição do sistema em equilíbrio às mudanças introduzidas. Este processo foi observado através do crescimento de plantas e de análises de solos.

BARROW (1974) realizou incubações de um solo franco arenoso do oeste de Austrália, com grânulos de superfosfato em diferentes doses, por períodos de 0 a 217 dias e sob diferentes temperaturas e graus de umidade do solo. Em seguida, procedeu à semeadura de *Trifolium subterraneum* em casa de vegetação. O índice de eficiência do adubo foi muito afetado pelo tempo e a temperatura de incubação. A queda da eficiência com o tempo foi muito rápida inicialmente, passando em seguida a aproximar-se muito lentamente do valor zero. Cada aumento em 10°C na temperatura provocou um incremento de mais de três vezes na diminuição da eficiência. Quanto ao efeito da umidade, quando o solo passou do estado seco até a capacidade de campo houve significativa diminuição da eficiência do adubo fosfatado.

PARFITT *et alii* (1989), trabalhando com quatro solos e com uma metodologia similar à de BARROW (1974), concluem que em todos os solos a eficiência do P incubado por 218 dias foi aproximadamente 65% da eficiência do P incubado por 10 dias.

GILBERT (1989) descreve um modelo para estudar o efeito residual do fósforo em diferentes solos de Queensland, Austrália. Tomaram-se amostras de oito solos (0 a 10 cm) de parcelas de pastagens melhoradas as quais foram adubadas com diferentes doses de superfosfato na semeadura. As parcelas foram amostradas intensivamente todos os anos durante 10 anos para determinação do P disponível por dois métodos: ácido sulfúrico diluído e bicarbonato de sódio. O P

disponível medido pelos dois métodos diminuiu exponencialmente com o tempo. Depois de 6 anos registrava-se uma residualidade inferior a 10% do valor inicial quando o P disponível era extraído com bicarbonato de sódio. O autor não estabelece se toda a perda de disponibilidade se deve à reação do adubo com o solo.

KOHN *et alii* (1977) instalaram em 1962 um ensaio na localidade de Wagga Wagga, Austrália, em solo de terra vermelha semeado com trevo branco e centeio. Os tratamentos consistiam de três lotações de ovelhas e quatro doses de superfosfato em cobertura. Anteriormente o solo havia sido semeado com trigo, recebendo uma adição total de 718 kg de superfosfato simples. Aplicando o método de Mehlich ($\text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$) modificado, o P disponível nas parcelas não adubadas caiu de 21 $\mu\text{g P/g}$ em 1962 para 16 $\mu\text{g P/g}$ em 1967. O autor não discute as causas da diminuição.

BATTEN *et alii* (1979), continuando o trabalho de KOHN *et alii* (1977), no período 1969-71, semearam trigo com quatro doses de superfosfato simples. No início do estudo de residualidade, período 1972-74, existiam 16 níveis de P aplicado nos 10 anos prévios, variando de 0 a 324 kg P/ha. Sobre estes tratamentos foi semeado *Trifolium subterraneum*, sendo pastoreado. A diminuição do teor de P disponível Bray I oscilava entre 1,8 e 9,3 $\mu\text{g P/g/ano}$, sendo maior nas parcelas que haviam recebido mais fósforo. Realizando um balanço até 30 cm de profundidade, verificaram que 36% do P aplicado não se encontrava no solo. As principais vias de

perda indicadas foram a disposição de excrementos animais fora da área produtiva, a exportação sob forma de produto animal e a exportação nos grãos de trigo.

CASTRO *et alii* (1981a) instalaram seis ensaios de adubação de misturas de forrageiras (*Trifolium repens*, *Trifolium subterraneum* e *Festuca arundinacea*) em solos do litoral oeste uruguaio, a maioria Molissois. Os tratamentos incluíam níveis de 0 a 240 kg P_2O_5 /ha com e sem adubação fosfatada, sob forma de superfosfato e hiperfosfato (fosfato de Gafsa). Cada ensaio foi iniciado em três anos sucessivos. Foram realizados cortes com devolução da forragem, determinando-se rendimento em matéria seca, a composição botânica e, anualmente, antes da readubação, o P disponível pelo método Bray I. Determinou-se também a taxa de decréscimo dos valores de P disponível para cada solo e adubo. Em média, o aumento do P disponível devido à adubação, medido por Bray I, diminuiu com o tempo a uma taxa anual de 28% para o superfosfato e de 22% para o hiperfosfato.

MORON & PEREZ (1981), trabalhando em um Molissol no Uruguai, estudaram a residualidade de diferentes doses de P com superfosfato aplicado durante quatro anos de cultivos sucessivos de trigo. As doses acumuladas nos quatro anos oscilaram de 0 a 480 kg P_2O_5 /ha. Durante os 5 anos posteriores implantou-se uma pastagem mista (*Trifolium repens*, *Lotus corniculatus* e *Festuca arundinacea*) que foi avaliada mediante cortes com devolução de forragem. A residualidade, medida através de análises de P disponível (Bray

I e resinas de intercâmbio catiônico), mostrou uma tendência geral para as distintas doses estudadas de uma típica curva de extinção. As maiores perdas em termos absolutos foram naqueles tratamentos nos quais o nível de P disponível foi maior. Por outro lado, para cada tratamento as maiores perdas ocorreram no início do período, tendendo todos os tratamentos à convergirem para os valores naturais do solo ao final do período de estudo.

MIDDLETON & SMITH (1978) deram outro enfoque ao problema realizando um balanço para um ecossistema pastoreado de alta produtividade leiteira em estágio de clímax (equilíbrio dinâmico) na região de Waikato, Nova Zelândia. Para uma entrada anual de adubo 25 kgP/ha/ano, e considerando duas estimativas de perdas (máxima e mínima) através de excrementos animais exportados da área produtiva e através da erosão-lixiviação, as perdas por fixação no solo oscilaram entre um mínimo de 14% e um máximo de 30% do adubo aplicado.

PARFITT (1980) com um enfoque similar ao anteriormente mencionado, selecionou um sistema de produção leiteira bem conduzido na região de Taranaki, na Nova Zelândia. Com base na informação gerada anteriormente desenvolveu e quantificou o ciclo do fósforo em área sob pastoreio. O ecossistema recebia 38 kg P/ha/ano e era considerado em clímax. As chamadas perdas dentro do sistema, 11 kg P/ha/ano foram retidas nas formas inorgânicas de baixa disponibilidade.

KARLOVSKY (1981) questionou a importância da reação entre o adubo e o solo como mecanismo de perda de disponibilidade do P adicionado. Afirma que na Nova Zelândia as evidências mostram que a utilização do P em ecossistemas de pastagens varia entre 70 e 90% do P aplicado e reciclado, ficando de 10 a 30% perdidos dentro do solo (não disponível) e fora do solo (erosão e lixiviação).

De outro ângulo, caberia mencionar que quando o P é removido da solução do solo pelas raízes das plantas, o movimento tende a ser inverso. BARROW (1980) afirma que a reversibilidade das reações no campo parecem existir na medida que se consideram vários anos de observação.

Por último, é interessante salientar que diversos esquemas de recomendação de adubação de pastagens com distintos enfoques levam em consideração as reações entre o adubo e o solo (BOWDEN & BENNET, 1974; CASTRO *et alii* 1981b; CORNFORTH & SINCLAIR, 1984).

2.2.3. Remoção do fósforo através de produtos agrícolas e animais

Em termos gerais, pode-se afirmar que as perdas de P exportado em produtos agrícolas vai depender da quantidade de produto retirada e da sua concentração em fósforo. Segundo WILLIAMS (1974), usualmente as saídas mais importantes do sistema produtivo ocorrem como resultado de sua remoção na forma de produtos agrícolas. Considerando diver-

tos tipos de produtos (animal e vegetal), cita valores extremos desde menos de 0,5 kg P/ha/ano até um máximo de 40 kg P/ha/ano. Assinala como tendência geral menores extrações por pastagens que pelas demais culturas.

HANWAY & OLSON (1980) consideram as seguintes culturas e seus respectivos rendimentos médios: milho (5000 kg/ha), sorgo (4000 kg/ha), soja (1800 kg/ha), trigo (2400 kg/ha), aveia (1600 kg/ha) e cevada (1900 kg/ha). Apresenta uma variação na quantidade de P removido na parte colhida de 7 a 15 kg P/ha, com 2 a 8 kg P/ha tomados pela planta mas retornados ao solo na resteva.

BARBER (1979) encontrou fortes correlações negativas entre o teor de P disponível medido com resinas de intercâmbio aniônico e a quantidade de fósforo removida pelas culturas.

HEADLEY *et alii* (1982) estudaram as mudanças no P total e suas frações em uma seqüência de rotações trigo-trigo-pousio sem adubação, durante um período de 65 anos no Canadá. O grão e a palha exportadas considerando que essas partes tenham 0,4% P e 0,02% P respectivamente poderiam explicar aproximadamente 75% do decréscimo do P total. A erosão hídrica é geralmente um problema menor naquela região.

MIDDLETON & SMITH (1978) desenvolveram um balanço anteriormente citado para um ecossistema pastoril na Nova Zelândia. Com uma lotação de 2,5 cabeças de gado/ha e uma média anual de produção de leite por vaca de 3000 l, as perdas no produto animal foram da ordem de 8,8 kg P/ha/ano,

enquanto as perdas por dejeções de animais fora da área produtiva ascendiam a 5,7 kg P/ha/ano. PARFITT (1980), para outra região da Nova Zelândia, mas também para um ecossistema de produção leiteira, com uma produção de 11.000 kg de matéria seca/ha/ano e uma utilização de 80%, apresentou uma saída de produto animal de 10 kg P/ha/ano. Esta foi acompanhada por uma perda de 8 kg P/ha/ano em esterco depositado fora da área produtiva.

Em contraposição às altas perdas em sistemas de elevada produção leiteira, TILL (1981) encontrou perdas desprezíveis de P para um sistema intensivo de produção de lã (15-20 ovelhas/ha). Neste estudo considerou-se a lã como o único produto vendável.

Por sua parte CORNFORTH & SINCLAIR (1982) propõem um modelo geral na Nova Zelândia para calcular o P necessário para manter estável uma pastagem bem desenvolvida. A unidade de estoque foi o equivalente a uma ovelha de 55 kg desmamando um cordeiro por ano. Considerou-se pastagens rendendo 90% do máximo rendimento e com uma concentração de P na forragem de 0,35%. As saídas do sistema pelo fator animal (produto animal mais excrementos depositados fora da área produtiva) foram estimadas em um mínimo de 0,7 kg P/unidade de estoque/ano para ovelhas e bovinos em topografias planas ou levemente onduladas. A máxima perda foi estimada em 1.1 kg P/unidade de estoque/ano para ovelhas e bovinos em montanhas altas. Mais tarde os mesmos CORNFORTH & SINCLAIR (1984) apresentaram uma modificação em um esquema de recomendação

de adubação de pastagens. Assim, as perdas variam segundo a unidade considerada, desde um mínimo de 0,5 kg P para a unidade de estoque como ovelha no solo plano até um máximo de 1,1 kg P para unidade de estoque com vaca leiteira em solo de montanha alta.

2.2.4. As perdas do fósforo pela ação da chuva

O P pode ser perdido em solução por lixiviação dentro do perfil do solo, em solução por escoamento superficial e nas partículas de solo também por escoamento superficial. Estes processos existem naturalmente, mas a utilização do solo pelo homem (solo trabalhado, descoberto e exposto) produz normalmente um aumento do escoamento superficial. Em geral é aceito que as perdas por lixiviação são de magnitudes muito baixas (WILLIAMS, 1974; SHARPLEY & MENZEL, 1987).

Estritamente, o P perdido por erosão é somente aquele que se encontra presente nas partículas do solo que são arrastadas. O P nas partículas inclui o P adsorvido e o presente na matéria orgânica, aceitando-se que usualmente é a principal forma de saída de P pela ação da chuva.

FRERE *et alii* (1980), desenvolvendo um submodelo para as perdas de nutrientes em terras utilizadas para culturas, encontraram perdas de P na forma solúvel por escoamento superficial variando aproximadamente desde 0,04 a 4,7 kg P/ha/ano. Para o P transportado em partículas de

sedimento calcularam valores desde um mínimo de 0,9 a um máximo de 50 kg P/ha/ano.

SHARPLEY *et alii* (1988) apresentaram resultados de 10 anos de medição das perdas de P de vinte parcelas de escoamento, adubadas e não adubadas, sob pastagens e outras culturas, nos Estados de Oklahoma e Texas (EUA). As vinte parcelas foram consideradas representativas das planícies do sudeste dos EUA. As nove parcelas com pastagens nativas registraram, em média, as menores perdas: 0,28 kg $P_{25}O_5$ /ha/ano como P solúvel e 0,41 kg $P_{25}O_5$ /ha/ano como P em partículas de sedimento. As máximas perdas foram registradas nas seis parcelas destinadas à cultura de trigo, tendo sido, em média, iguais a 0,59 kg $P_{25}O_5$ /ha/ano como P solúvel e 4,56 kg $P_{25}O_5$ /ha/ano como P nas partículas. As parcelas com rotações de culturas e pastagens apresentaram perdas intermediárias.

Em uma situação ecológica diferente, McDOWELL *et alii* (1989) mediram as perdas de P em solução e em sedimentos por escoamento superficial desde 1973 até 1979 em Mississippi (EUA). As medições realizaram-se em uma bacia de 18,7 ha em um solo franco siltoso, com um declive de 0,2%. Eram conduzidas culturas contínuas de algodão adubadas com N e sem P. Com uma chuva média de 1355 mm e um escoamento superficial de 543 mm, foram perdidas em solução e nos sedimentos, para uma média de seis anos, 21 kg P/ha/ano, sendo 7,5% transportados em solução. Os autores expressam que as perdas são maiores que as esperadas nesses solos planos.

Segundo MIDDLETON & SMITH (1978), as estimativas de perdas de P por erosão e lixiviação em pastagens adubadas em cobertura na Nova Zelândia oscilam entre 2 e 7 kg P/ha/ano. Os autores consideram 3 kg P/ha/ano como um valor conservador para o modelo proposto. PARFITT (1980) modelou o ciclo do fósforo em um ecossistema de pastagens de alta produção leiteira em um solo franco com 1250 mm de chuva anual, na região de Taranaki na Nova Zelândia. As perdas por escoamento superficial (solução mais partículas) são estimadas em 2 kg P/ha/ano.

WILLIAMS (1974) chama a atenção sobre o significado que pode ter uma mesma quantidade de solo perdida, caso provenha de um sistema agrícola ou de um sistema sob pastagem. As adubações fosfatadas em cobertura determinam geralmente grande acumulação de P nos primeiros centímetros do perfil. Portanto, para a mesma quantidade de solo erodido, em um sistema de pastagens adubadas a perda de P pode ser significativamente mais importante que em outras culturas.

Segundo a revisão realizada por SHARPLEY & MENZEL (1987), a maior parte do P solúvel no escoamento superficial é biologicamente disponível, mas a biodisponibilidade do P presente nas partículas do solo pode apresentar importantes variações.

McDOWELL & MCGREGOR (1984) quantificaram as concentrações e perdas de P em solução e nas partículas de solo sob diversos tipos de cultivo (convencional, reduzido e

sem cultivo) e semeados com milho para silagem e grão. Utilizou-se um solo franco siltoso do Mississipi (EUA) com 5% de declividade, sendo adubado com NPK. Foi utilizado superfosfato como fonte de P. As perdas de P (solução + partículas), na média de 3 anos (1975-1977), para os tratamentos que incluem cultivo convencional, foram de 15,55 kg P/ha, sendo 1,3% transportado em solução. Para os tratamentos sem cultivo, a perda diminuiu para 2,45 kg P/ha, sendo 41% transportados na solução. Com cultivo reduzido, as perdas foram 2,4 kg P/ha com 21% em solução. As altas concentrações e perdas de P em solução para cultivos conservacionistas foram atribuídas à liberação de P dos resíduos das culturas e à insuficiente quantidade de sedimento para absorver fósforo da solução.

A erosão do solo é um processo seletivo no qual o sedimento está enriquecido em partículas finas e matéria orgânica (baixa densidade). O P concentra-se especialmente nas frações finas e a matéria orgânica geralmente apresenta um enriquecimento relativamente alto de P. Assim, o sedimento geralmente apresenta um enriquecimento em relação ao solo do qual se origina.

O grau de enriquecimento do sedimento é expresso pela razão de enriquecimento (ER), a qual matematicamente é o quociente da concentração do nutriente no sedimento dividido pela sua concentração no solo. Segundo SHARPLEY & MENZEL (1987), os valores de ER para P total têm variado desde um mínimo de 1,5 a um máximo de 8,9.

MASSEY & JACKSON (1952), MENZEL (1980) e SHARPLEY (1980, 1985b) relataram que existe uma relação linear negativa entre o logarítmo da razão de enriquecimento e o logarítmo da quantidade de solo perdido.

MENZEL (1980), a partir de informação proveniente de diversos solos, climas e culturas, generalizou uma equação $\ln(ER) = 2 - 0,2 \ln(Sed)$, onde Sed é a quantidade de solo erodido em quilogramas por hectare para eventos individuais de escoamento superficial. A razão de enriquecimento (ER) refere-se tanto ao P total como ao N total. Adverte-se que campos com terraços ou solos arenosos podem não seguir essa relação.

SHARPLEY (1980), estudando o efeito de diversas propriedades físicas e químicas do solo, da declividade e da intensidade da chuva, obteve a seguinte equação geral para eventos individuais: $\ln(ER) = 2,48 - 0,27 \ln(Sed)$, onde ER é a razão de enriquecimento em P total e Sed a quantidade de sedimento perdido em quilogramas por hectare. Esta equação é semelhante à da MENZEL (1980) anteriormente citada.

McDOWELL & MCGREGOR (1984), em trabalho anteriormente citado, avaliaram a razão de enriquecimento durante três anos e encontraram a média de 1,55 para P total em solo sob cultivo convencional, e de 3,7 em solo sem cultivo.

SHARPLEY (1980) demonstrou que a razão de enriquecimento aumenta marcadamente com o aumento da quantidade de P aplicado. Esta apresentava as maiores mudanças no solo Bernow (Glóssic Paleudalf). A ER aumentou de 2,43 para

6,29 com a adição de 100 kg P/ha. Isto foi atribuído a uma baixa quantidade de P total no solo e a um apreciável enriquecimento em frações finas no escoamento superficial. Os outros quatro solos estudados apresentaram incrementos na ER mais moderados. Como exemplo pode-se citar o solo de Kirkland (Udertic Paleustol), o qual passou de uma ER de 1,42 para 2,77 com a aplicação de 100 kg P/ha.

SHARPLEY (1980) determinou que tanto o aumento da intensidade da chuva como da declividade do solo provocam decréscimo na ER. O fato da força da erosão aumentar com a declividade resulta em um aumento na proporção de material grosseiro transportado e, portanto, na diminuição na ER.

SHARPLEY (1985b) estudou o enriquecimento de diversas formas de fósforo, nitrogênio e carbono nos sedimentos de seis solos de diferentes propriedades físicas e químicas. Utilizou chuva simulada (60 e 120 mm/h). As ER médias para P extraído por Bray I (2,45) e para P lábil por diluição isotópica (2,89) foram significativamente maiores que as ER determinadas para as outras formas de P (1,48). As razões de enriquecimento médias para C, N e P orgânico (nos seis solos foram: 2,0; 1,61 e 1,47 respectivamente. Isso indica que a erosão pode reduzir a relação C/N/P orgânico.

McDOWELL *et alii* (1989) em experimento realizado no Mississippi, anteriormente citado, determinaram que a ER para P total média de 6 anos foi 1,40 enquanto para o N total foi de 2,19 e para a matéria orgânica de 2,26.

A erosão como processo seletivo pode afetar de distintas maneiras as diversas frações do fósforo no solo. Neste sentido, é interessante conhecer alguma informação sobre a relação entre as frações granulométricas e as distintas frações químicas do P no solo.

Scheffer *et alii*¹, citado por BLACK (1975), trabalhando em solo da Alemanha, mostraram que as frações de fósforo ligado a ferro e alumínio concentram-se nos componentes finos do solo, enquanto os fosfatos de cálcio apresentam-se mais concentrados nas frações mais grosseiras. O P orgânico mostrava certa tendência de concentrar-se nas frações mais finas.

SYERS *et alii* (1969) trabalharam em dois solos aluviais da Nova Zelândia, de diferentes idades (600 e 6000 anos). Realizaram separação granulométrica e os respectivos fracionamentos pelo método de CHANG & JACKSON (1957) modificado. O P total, e especialmente o P orgânico, concentravam-se na fração argila. O P ocluso foi especialmente concentrado na fração argila dos dois solos estudados, e a tendência geral foi da sua concentração diminuir com o aumento no tamanho das partículas. Houve uma exceção importante no solo de maior idade, onde a fração areia grossa apresentou acentuado aumento na concentração de P ocluso. Esse fato sugere que o P ocluso pode apresentar-se em grânulos que se encontram na fração areia grossa.

¹ SCHEFFER, F.; KLOKE, A.; HEMPLER, K. Die Phosphat-Formen im Boden und ihre Verteilung auf die Korngrößen-Fraktionierungen. Zeitschr. Pflanzen-ernähr, Düng, Bodenk, 91:240-252. 1960.

2.2.5. Efeito do cultivo e da adubação com fósforo

O desenvolvimento de cultivos contínuos em um solo que previamente suportava vegetação nativa ou pastagens, altera o equilíbrio do ecossistema. Geralmente, essa alteração tende a reduzir o carbono orgânico e o nitrogênio, deteriorar a agregação do solo e baixar a atividade biológica.

O fósforo não é alheio às mudanças introduzidas pela utilização do solo pelas culturas. HASS *et alii* (1961) estudaram o efeito da cultura do solo e da adição de esterco nos conteúdos de P total, P inorgânico, P orgânico e P disponível - Olsen do solo à profundidade de 0-15 cm. Selecionaram 15 estações experimentais das Grandes Planícies, EUA. No período médio de 33 anos, a rotação de culturas sem adição de adubo ou esterco provocou uma queda de 9% no P total. Por outro lado, a aplicação de 6,16 a 12,32 kg P/ha/ano de esterco de aves elevou o conteúdo de P total em 14%. O P inorgânico não foi influenciado pela rotação de culturas sem esterco, mas o P orgânico foi reduzido em média 35% em relação aos correspondentes solos virgens. A aplicação de esterco aumentou consideravelmente o teor de P inorgânico mas não teve efeito em reduzir as perdas de P orgânico. A rotação de culturas sem adição de esterco apresentou uma tendência a aumentar os valores de P disponível Olsen, mas quando se aplicava esterco, os valores aumentavam perto de 5 vezes em relação ao solo virgem.

DALAL & MEYER (1986) observaram as mudanças produzidas na profundidade de 0-10 cm pelo cultivo de cereais de inverno e sorgo, principalmente, na fertilidade de alguns solos no sudeste da Austrália. Tomaram-se seis séries de solos, englobando em média 14 localidades para cada série. As amostras foram coletadas de áreas com histórico conhecido e de uma área adjacente que nunca havia sido cultivada. Os solos, segundo a "Soil Taxonomy", foram de três tipos: Typic Paleustert, Typic Chromustert e Rhodic Paleustalf. O ambiente é semi-árido e a declividade do terreno igual ou menor que 1%. As seis séries tinham sido cultivadas durante 16 anos, em média. Três séries não foram adubada com fósforo, outras duas receberam quantidades muito baixas desse nutriente e a última recebeu as quantidades mais elevadas, em média 7,7 kg P/ha/ano. O P orgânico diminuiu em cinco das séries estudadas, variando desde um mínimo de 13% a um máximo de 38%. Em média, a diminuição para todas as séries foi de 24%. Em nenhuma das seis séries o P inorgânico apresentou mudanças significativas.

HEDLEY *et alii* (1982) estudaram as mudanças nas frações do P orgânico e P inorgânico depois de 65 anos de cultivo em uma rotação trigo-trigo-repouso, utilizando uma sequência particular anteriormente citada de fracionamento de fósforo. Utilizaram-se amostras de um Chernozem de duas parcelas não adubadas, uma cultivada por 65 anos e outra com pastagens permanentes. Os grãos e a palha de trigo foram removidos exceto nas duas últimas décadas, enquanto a

forragem foi removida só ocasionalmente durante o período de 65 anos. O conteúdo de P total do solo cultivado foi 29% menor que o da pastagem permanente. Como já foi comentado, a extração pelo trigo é considerada a principal via de saída de fósforo do sistema. A maior parte do P perdido foi nas formas orgânicas e residual (P orgânico estável + P inorgânico residual). Do total perdido, 22% provinham das formas orgânicas extraíveis, enquanto 52% foram originados do chamado P residual. O P orgânico extraível diminuiu 33% em relação ao valor original, o P inorgânico extraível 23% e o P residual 31%. Não é comentado pelos autores mas chama a atenção que uma fração como P residual teoricamente considerada muito estável apresenta esse nível de dinamismo.

TIESSEN *et alii* (1982) estudaram as perdas de P de três solos de pradaria de diferentes texturas durante cultivos nos quais se empregaram baixas quantidades de adubos. Utilizaram-se dois solos Cryoborols e um Cryorthent e os respectivos solos adjacentes não cultivados. O cultivo durante 60-70 anos de duração diminuiu em 12% as concentrações de P total no horizonte A de dois dos solos estudadas. Como o P inorgânico não apresentou variação significativa, a diminuição do P total foi explicada inteiramente pela diminuição da fração orgânica. Em um período comparável, o outro solo de textura mais arenosa apresentou perdas maiores (29%) de P total no horizonte A. Neste solo, as perdas são explicadas pela diminuição tanto da fração orgânica como da inorgânica. As perdas de P orgânico estenderam-se significativas

mente ao horizonte B, enquanto nos dois solos mais argilosos não foram encontradas perdas significativas no horizonte B.

SHARPLEY & SMITH (1983) analisaram as quantidades relativas e a distribuição de distintas formas de P em solos virgens em comparação com os mesmos solos cultivados e adubados. Foram oito solos agrícolas representativos de diferentes zonas agrícolas dos EUA. Os locais cultivados refletiam o manejo aplicado em cada região. O tempo de cultura prévia variava desde 16 até 72 anos. Também foram variáveis as doses de adubo utilizadas. A cultura e a adubação resultaram em um incremento no P total e no P inorgânico em cinco solos, enquanto o P orgânico apresentou uma diminuição em sete solos. Em média, as mudanças para os oito solos nos 15 cm superficiais foram de +25% no P total, +118% no P inorgânico e -43% no P orgânico. O subsolo relativamente não foi afetado pelas mudanças.

Os trabalhos citados parecem indicar que quando se cultiva um solo virgem, o P orgânico é a forma mais afetada, parecendo exercer papel de um reservatório. A adubação não evita a diminuição do P orgânico, produzindo geralmente um aumento do P inorgânico. Não se verificou quanto da diminuição do P orgânico é produto da mineralização e quanto é causado pela erosão.

PARTON *et alii* (1988) realizaram um modelo de simulação para analisar o impacto da cultura sem aplicação de adubo durante 100 anos em um solo cuja erosão foi considerada nula. As grandes modificações apareceram na

parte orgânica. Embora o teor de P orgânico apresentasse marcada diminuição até aproximadamente 60 anos, o P inorgânico mostrou-se pouco afetado.

CHATER & MATTINGLY (1980) tiveram como propósito analisar e quantificar as mudanças no teor de P orgânico de solos das Estações Experimentais de Rothamsted e Saxmundham. Utilizaram-se diversos experimentos de longo prazo nos quais foram comparados sistemas de cultivo e adubação contrastantes. A mineralização oscilou de 0,5 a 8,5 kg/P/ha/ano. Os valores mínimos (0,5 - 1,8 kg P/ha/ano) ocorreram em solos arados durante muitos anos e que não receberam esterco. Os valores intermediários (3,2 - 3,6 kg P/ha/ano) foram observados em solos que receberam resíduos de leguminosas ou esterco uma vez cada 4 anos. Os maiores valores (7,6 - 8,5 kg P/ha/ano) foram em solos arados a partir de pastagens permanentes ou naqueles que receberam grandes quantidades de esterco (100 t/ha). Os índices de mineralização mais elevados representaram perto de 50% do P removido cada anos pelos cereais, que em média produziram entre 4,5 - 5,0 t/ha.

SHARPLEY & SMITH (1985) continuaram o trabalho anteriormente citado - SHARPLEY & SMITH (1983) - estudando a mudança nas frações inorgânicas e orgânicas da camada 0-15 cm de oito solos representativos das principais zonas agrícolas dos EUA. Com base na presença de CaCO_3 livre foram separados três solos não calcários e 5 solos calcários. O esquema de fracionamento utilizado foi o de CHANG & JACKSON

(1957) modificado segundo o solo fosse calcário ou não calcário. O fracionamento do P orgânico foi o desenvolvido por BOWMAN & COLE (1978b). Nos solos não calcários, mais de 50% do incremento no P inorgânico concentraram-se principalmente na fração PAI e PFe. Esse fato sugere que dentro do P inorgânico a porcentagem de P não ocluso (PAI+PFe) aumente e a porcentagem de P ocluso diminua. Nos solos calcários, mais de 69% do P inorgânico concentraram-se na fração PCa, mas não se registraram mudanças relativas. O P orgânico apresentou diminuições em sete solos, mas não ocorreram mudanças relativas na distribuição das distintas frações orgânicas nos dois grupos de solos quando são cultivados e adubados.

O'HALLORAN *et alii* (1987a) relataram um trabalho cujo objetivo foi pesquisar a influência de distintas práticas de manejo de culturas, durante 15 anos, nas formas e distribuição do fósforo no solo. Utilizou-se um solo franco com duripan, com uma declividade menor que 1%, situado na zona das grandes planícies da América do Norte. Até 1970 o local permaneceu virgem, com pastagens. Em seguida, foi cultivado com trigo de inverno em rotação trigo-repouso utilizando três sistemas (tratamentos) de cultivo: plantio direto, cobertura morta feita com restos de cultura e sem restos de cultura. Não se aplicou nenhum adubo. Passados 15 anos, o solo foi amostrado à profundidade de 0-15 cm e submetido ao fracionamento do P segundo o esquema de HEDLEY *et alii* (1982). Praticamente nos 3 tratamentos todas as frações

orgânicas e inorgânicas sofreram diminuição em relação à testemunha sob pastagem. Quanto menos conservacionista foi o sistema de cultivo, o que depende do grau de cobertura, maior foi a diminuição registrada nas distintas frações. Grande parte das mudanças nas diferentes frações foi associada com o incremento no conteúdo de areia causado pela erosão. A erosão removia as partículas da fração argila e provocava a mistura do solo inferior ao horizonte 0-15 cm considerado. Em todos os tratamentos (incluindo a testemunha) o P total e o P inorgânico extraído com resinas relacionava-se negativamente com a porcentagem de areia presente. A maior diminuição no teor de P total (18%) ocorreu no tratamento sem restos de cultura, enquanto a menor (8,1%) registrou-se no tratamento com plantio direto. Os resultados encontrados com o fracionamento não apresentaram uma tendência clara a uma maior diminuição porcentual nas frações mais lábeis orgânica e inorgânica depois de 15 anos. Da mesma forma que no trabalho de HEDLEY *et alii* (1982), chama a atenção as mudanças absolutas e porcentuais na fração P-residual. Comparando os valores do sistema trigo sem restos de cultura com os do controle constata-se que praticamente a metade da diminuição do P total é explicada pela queda do P residual. Neste caso, provavelmente a explicação poderia ser encontrada se a fração P residual se concentrasse especialmente nas frações mais finas, as quais são mais susceptíveis à erosão. Porém, O'HALLORAN *et alii* (1987b), trabalhando em um Chernozem franco do Canadá, mostraram que a

fração P residual foi a única que não apresentava associação significativa com o conteúdo de areia em distintas práticas de manejo.

Em síntese, a estabilidade ou permanência das distintas frações orgânica e inorgânica vai depender de sua susceptibilidade à mineralização e à erosão.

Thompson *et alii*², citado por STEWART & TIESSEN (1987), estudaram a mineralização do P orgânico em 25 solos de Iowa cultivados e não cultivados (virgens). Em média, 33% do C, 32% do N e 24% do P orgânico foram perdidos.

TIESSEN *et alii* (1982) mostraram que as relações C orgânico: P orgânico apresentaram uma evolução muito similar nos três solos estudados, diminuindo de 73 para 60 em 65 anos de cultivo e caíndo para perto de 50 depois de 90 anos. Por outro lado, a relação N total: P orgânico variou de 6,79 a 5,74 em 65 anos de culturas.

DALAL & MEYER (1986) observaram, após 18 anos de cultivo em diferentes solos da Austrália, diminuição para o Carbono orgânico (33%) e N total (34%) maiores que a registrada para o P orgânico (24%).

Em resumo, há indicação de que o P orgânico é mais estável que o C orgânico ou nitrogênio. Parte da explicação poderia estar na propriedade biológica-bioquímica do processo de mineralização, durante o qual o P orgânico é

² THOMPSON, L.M.; BLACK, C.A.; ZOELLNER, J.Z. Occurrence and mineralization of organic phosphorus in soils, with particular reference to associations with nitrogen, carbon and pH. Soil Science, 77: 185-96, 1954.

mineralizado como resultado de uma demanda de P e não como consequência da mineralização do Carbono (McGILL & COLE, 1981).

Geralmente, a atividade biológica tende a diminuir durante a utilização do solo com culturas. Assim, o P presente na biomassa microbiana segue a mesma tendência. HEDLEY *et alii* (1982) determinaram 21,5 $\mu\text{g P/g}$ presentes na biomassa microbiana em solo não perturbado sob pastagem. Depois de 65 anos com rotação trigo-trigo-repouso o valor caiu para 13,6 $\mu\text{g P/g}$ na biomassa microbiana.

BROOKES *et alii* (1984), analisando solos de históricos agrícolas contrastantes, relataram que, em média, os oito solos sob pastagens tinham três vezes mais P na biomassa microbiana que os seis solos cultivados.

2.2.6. Efeito da pastagem e de adubação fosfatada

A implantação de pastagens melhoradas de gramineas e leguminosas de alta produtividade em solos previamente cultivados ou com vegetação nativa, usualmente determina um aumento no nível de equilíbrio dinâmico da matéria orgânica.

RUSSELL (1960a, 1960b) estudou as mudanças produzidas na fertilidade a longo prazo devidas à adubação de pastagens no Sul da Austrália. O experimento começou em 1919 em um solo de textura franco arenosa, com um pH moderadamente ácido, considerado um solonetz solodizado. A vegetação

ção natural era savana dominada por *Eucalyptus camandulensis* junto com gramíneas, cyperáceas e juncos. Depois de realizar a remoção das árvores e brotações, a área foi mantida com pastagem inalterada exceto pela adição de adubos e o pastoreio de ovelhas. Não foram plantadas sementes de pastagem, mas leguminosas do gênero *Trifolium* invadiram as parcelas. Nos últimos anos antes da amostragem de 1957-58 foi incluído *Trifolium subterraneum*. Os tratamentos com adubo fosfatado e pastoreio com ovelhas resultaram grande incremento no conteúdo de matéria orgânica no horizonte superficial. Grande parte do incremento foi concentrado nos 5 cm superficiais. Perto da metade do P aplicado como superfosfato foi encontrada nos primeiros 20 cm de solo. O restante, presume-se foi lixiviado para horizontes inferiores, provavelmente explicado pela textura arenosa e a baixa capacidade de fixação de fósforo. A aplicação de 483 kg P/ha como superfosfato no período 1926-57 provocou um incremento no teor de todas as frações. O P orgânico passou de 13 a 55, $\mu\text{g P/g}$ nos primeiros 5 cm, enquanto na camada de 5 a 10 cm passou de 6 a 30 $\mu\text{g P/g}$. Segundo o autor, a evolução do P orgânico parece ser mais relacionada ao conteúdo da matéria orgânica que às fontes e níveis de P aplicado. No tratamento antes mencionado, a fração não extraível - a mais estável - aumentou de 15 a 25 $\mu\text{g P/g}$ de solo no período 1926-57.

JACKMAN (1964) estudou modelos de assimilação de diversos elementos (carbono, nitrogênio, enxofre e fósforo) na forma orgânica quando dez solos foram destinados a

pastagens adubadas de boa qualidade. O estudo foi realizado na Nova Zelândia. Para a maioria dos solos estudou-se a evolução em períodos de 30 ou mais anos. A acumulação de matéria orgânica e a consequente imobilização de N, S e P ocorreu em geral nas 3 primeiras polegadas de profundidade, enquanto a mineralização líquida ocorria nas seguintes 3 polegadas de profundidade, se na época ou momento de semear a pastagem os solos haviam alcançado o equilíbrio dinâmico. A metade do tempo necessário para atingir o novo equilíbrio na acumulação de P orgânico nas três primeiras polegadas variou de 4 a 38 anos, apresentando-se os maiores valores nos solos alofânicos.

PARFITT (1980), estudando o ciclo do fósforo em um ecossistema de alta produção leiteira na Nova Zelândia, verificou que a adição de 38 kg P/ha/ano resultou em 7 kg P/ha/ano retido como P orgânico inerte.

Segundo BARROW (1980b), a imobilização de P na matéria orgânica tem recebido muita atenção na Austrália. Existe grande quantidade de solos muito deficientes em P com baixa quantidade de biomassa vegetal e, portanto, com um baixo nível de matéria orgânica. Esta situação dá um alto potencial para aumentar o nível de matéria orgânica. A aplicação anual de fósforo oscila entre 5 e 20 kg P/ha/ano e a imobilização orgânica varia entre 1,5 e 2,8 kg P/ha/ano.

SIMPSON *et alii* (1974) experimentaram três doses de superfosfato e duas pressões de pastoreio com ovelhas durante vários anos para estudar as mudanças

produzidas na fertilidade do solo. O estudo foi conduzido em solo franco arenoso da Austrália, sob pastagens de *Phalaris*, *Trevo subterrâneo* e espécies anuais de gramíneas. Não se observaram efeitos das doses de superfosfato nem da pressão de pastoreio sobre a acumulação de P orgânico entre 1964 e 1970. Uma média de 21,4 $\mu\text{g P/g}$ como P orgânico foi acumulada em todos os tratamentos durante 6 anos. Segundo os autores, a síntese de P orgânico foi governada por outros fatores que não a disponibilidade de P inorgânico.

KOHN *et alii* (1977), também na Austrália, obtiveram tendências semelhantes quanto ao efeito das doses de adubação fosfatada e lotações de ovelhas na acumulação de P orgânico no período 1963-67.

BLAIR *et alii* (1977) relataram dois trabalhos, um com gado e outro com ovelhas, onde não aparecem efeitos da lotação sobre o P orgânico.

BATTEN *et alii* (1979) estudaram a residualidade (1972-74) de diversos tratamentos com superfosfato em uma rotação pastagem-cultura onde a pastagem era *Trevo subterrâneo*. Não encontraram efeito significativo dos níveis prévios de superfosfato no conteúdo de P orgânico. Na fase residual (sob pastagem) houve um aumento médio de 5,4 $\mu\text{g P/g/ano}$ no P orgânico, independentemente dos níveis de P aplicados previamente.

Resultados contraditórios aos anteriormente relatados foram obtidos por McLACHLAN (1968) e LEWIS *et alii* (1987a). McLACHLAN (1968), trabalhando durante 15 anos com

diferentes lotações de ovelhas, encontrou um maior nível de P orgânico nas áreas que haviam sido pastoreadas com alta lotação. LEWIS *et alii* (1987a) quantificaram a acumulação de P em três áreas (com 30 parcelas em cada área) do sudeste da Austrália, nas quais existiam desde solos virgens até solos com pastagens semeadas há mais de 20 anos. A aplicação de superfosfato simples variava desde 0 a mais de 4000 kg/ha. Para cada 100 kg de superfosfato simples a acumulação de P orgânico nos 10 cm superficiais variava desde 1,3 até 18 kg P/ha segundo a área. Considerando-se os primeiros 30 cm, a acumulação variava de 2,0 a 2,7 kg P/ha.

Em 1952 foi instalado um ensaio de campo em Winchmore, Nova Zelândia, para determinar as necessidades de adubo fosfatado em pastagens de Trevo branco e Ryegrass. A pastagem foi irrigada e intensamente pastoreada com ovelhas em um solo franco siltoso, moderadamente meteorizado. Os tratamentos consistiam de 0, 188 e 376 kg/ha de superfosfato simples. Dois tratamentos receberam essas doses anualmente de 1952 a 1957, enquanto os outros dois tratamentos receberam-nas todos os anos essas doses desde 1952 a 1977. Os dados foram avaliados em dois trabalhos distintos. Segundo QUIN & RICKARD (1981) depois de transcorridos 10-15 anos, o C orgânico, o N total e o S orgânico alcançaram um máximo em todos os tratamentos, enquanto o P orgânico continuou aumentando. O trabalho de CONDRON & GOH (1989) evidencia que grande parte do incremento do P orgânico total foi devida aos aumentos na fração orgânica lábil extraída com NaHCO_3 . A

taxa de acumulação do P orgânico diminuiu com o tempo. Em cada tratamento foi lentamente alcançado um equilíbrio dinâmico para o P orgânico (CONDON & GOH, 1989). Entre 1971 e 1974, em todos os tratamentos houve diminuição no P orgânico total, com um efeito muito marcado no tratamento controle e nos tratamentos de adubação residual. O motivo foi uma aplicação de calcário (4 t/ha) realizada em 1972, a qual promoveu a mineralização. A calagem não pareceu afetar as quantidades de P orgânico lábil (extraído com NaHCO_3) em todos os tratamentos, porém houve marcados decréscimos na fração P orgânico - NaOH - I e paralelamente um incremento na fração P orgânico - NaOH - II (mais estável). Cabe salientar que o efeito do calcário foi transitório, pois nos tratamentos adubados anualmente, o nível de P orgânico voltou aos valores existentes antes da calagem. Portanto, adições regulares de calcário podem reduzir a acumulação de P orgânico.

BROOKES *et alii* (1984) demonstraram a importância que pode assumir o P presente na biomassa microbiana em pastagens. SPARLING *et alii* (1985) salientaram como o P presente na biomassa microbiana pode interferir consideravelmente nos valores de P disponível - Olsen em pastagens permanentes. Isso se deve ao fato de não se conhecer até que ponto esse P é disponível para as plantas. SPARLING *et alii* (1985, 1987) afirmam que há três condições para que a influência do P da biomassa microbiana, seja significativa em pastagens:

- 1) Solos com carbono orgânico maiores que 2%;
- 2) Valores de P disponível-Olsen inferiores a 20 $\mu\text{g P/g}$;
- 3) Déficit de umidade máximo no solo inferior a 350-400mm.

Solos com importantes défices de umidade apresentam populações microbianas mais resistentes à secagem e, portanto, exercem menor influência no nível de P disponível - Olsen.

Baseando-se na informação apresentada por diversos autores (RUSSELL, 1960a e 1960b; JACKMAN, 1964; KOHN *et alii*, 1977; MIDDLETON & SMITH, 1978; LEWIS *et alii*, 1987b) não há um denominador comum com respeito ao aumento ou diminuição das relações C orgânico: P orgânico e N: P orgânico pelo efeito das pastagens. PARTON *et alii* (1988), no modelo desenvolvido, propõem que a relação C orgânico: P orgânico das distintas frações da matéria orgânica (ativa, passiva e lenta) diminua à medida que aumenta o nível de P lábil. A explicação baseia-se em dois pontos:

- a) a relação C:P dos microorganismos varia em função do nível de P lábil; e
- b) as enzimas fosfatases são capazes de mineralizar o P diretamente (MCGILL & COLE, 1981). O efeito líquido é que a relação C:P da matéria orgânica varia em função do conteúdo de P lábil.

Resumindo, parece claro que o período de pastagens melhoradas induz importante aumento no conteúdo de P orgânico no solo. De acordo com os resultados e opiniões de diversos autores (BLAIR *et alii*, 1977; BOWMAN & COLE, 1978a;

ANDERSON, 1980; TIESSEN *et alii*, 1984; SHARPLEY *et alii*, 1987; STEWART & SHARPLEY, 1987), a acumulação de P orgânico não deveria ser considerada indesejável.

KOHN *et alii* (1977), estudando na Austrália o efeito de diversas doses de superfosfato (0 a 375 kg P/ha/ano) em uma pastagem de trevo subterrâneo e centeio sob pastoreio de ovelhas encontraram mudanças nas distintas frações do P inorgânico. O experimento foi conduzido desde 1962 a 1966. O fracionamento do P inorgânico realizado segundo CHANG & JACKSON (1957) mostrou que o nível de PAI aumentou mais rapidamente que as frações PFe e PCa. Isso acontece apesar do PFe ter inicialmente um conteúdo que praticamente duplicava em relação ao PAI. O P disponível - Mehlich ($\text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$) também aumentava com o incremento da dose de superfosfato. No tratamento não adubado, o PAI diminuiu mais rapidamente que o PFe ou o PCa, enquanto o P disponível Mehlich diminuiu de 21 $\mu\text{g P/g}$ em 1962 para 16 $\mu\text{g P/g}$ em 1967.

No trabalho realizado por BATTEN *et alii* (1979) - já citado - durante os 10 anos (1962-72) anteriores ao estudo de residualidade ocorreram um ciclo de pastagens e um ciclo de culturas, ambos adubados com doses de fósforo variando de 0 a 324 kg P/ha acumulados. Em 1972 constatou-se um aumento no P total, assim como nas frações do P inorgânico (P ClNH_4 , PAI, PFe e PCa) segundo o fracionamento de CHANG & JACKSON (1957). O PAI foi a fração que teve o maior aumento absoluto: 0,167 $\mu\text{g P/g}$ por kg P adicionado por hectare. Em segundo lugar encontrou-se o PFe e por

último o PCa. Durante o período 1972-74 (fase residual, pastagens), enquanto o P orgânico incrementava, o PAI e o P disponível Bray I diminuíam seu conteúdo. As frações PFe e PCa apresentavam aumentos moderados, os quais sugerem uma passagem a formas mais insolúveis. As diminuições no PAI oscilavam (período 1974-74) desde 0,6 $\mu\text{g P/g/ano}$ nas parcelas não adubadas até 7,5 $\mu\text{g P/g/ano}$ nas que haviam recebido mais adubo. O grau de diminuição no P disponível-Bray I oscilava aproximadamente entre 1,8 e 9,3 $\mu\text{g P/g/ano}$ com as mesmas tendências. As mudanças, tanto no P disponível - Bray I como no Mehlich, estiveram associadas com as mudanças na fração PAI. O P ocluso não mostrou mudanças entre parcelas com baixo e alto teor de fósforo. Segundo BATTEN *et alii* (1979), seria de esperar um incremento nas frações menos solúveis com grandes adições de P.

No trabalho de longo prazo de CONDRON & GOH (1989), já citado, os tratamentos adubados anualmente apresentaram uma taxa de acumulação do P orgânico que diminuía com o tempo, enquanto a acumulação do P inorgânico tornava-se mais importante. Entre 1958 e 1971 o P inorgânico acumulou-se predominantemente na fração NaHCO_3 e NaOH-I (P inorgânico associado a ferro e alumínio). Depois de 1971, o incremento no P inorgânico nesses tratamentos ocorreu principalmente na fração HCl (P ligado a Ca). Este último foi atribuído aos efeitos combinados da calagem realizada em 1972 e à presença de grandes quantidades de apatitas pouco solúveis e não reativas dentro do superfosfato aplicado

nesse período. Deve-se assinalar que a adição de calcário promove a fração extraída com HCl, a qual pode ser menos disponível para as plantas que o P extraído com NaHCO_3 e NaOH-I. Por outro lado, o P inorgânico no tratamento controle e nos tratamentos de residualidade (adubados entre 1952 e 1957) diminuiu no período 1958-77. A maior diminuição ocorreu na fração NaOH-I (P ligado ao ferro e alumínio).

Em resumo, no período de pastagem a fração inorgânica sofre concorrência da fração orgânica pelo P solúvel. O P inorgânico não parece apresentar mudanças em sua dinâmica interna com relação à apresentada no período de culturas. O P ligado ao alumínio e ferro parecem ser frações de maior disponibilidade e dinâmica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado empregando-se amostras de solo obtidas na Estação Experimental "La Estanzuela", do Instituto Nacional de Investigación Agropecuária (INIA) em Colonia, Uruguai. As amostras foram provenientes de um experimento de rotação de culturas e pastagens instalado em 1963. Estimou-se que o solo tinha 60 anos de agricultura quando este experimento foi iniciado.

3.1. Pluviosidade e Temperaturas Locais

De acordo com informações obtidas do "Projeto Clima", coletadas no próprio local entre 1965 e 1989, a precipitação média anual é de 1100 mm, com um desvio padrão de 231 mm. A precipitação média mensal mínima é de 74 mm e ocorre em agosto, enquanto a máxima é de 129,5 mm e se dá em março.

A temperatura média anual é de 16,3°C, com uma média mensal mínima de 10,5°C nos meses de junho e julho e máxima de 23,1°C em janeiro.

3.2. Classificação e Propriedades dos Solos

Segundo VICTORA *et alii* (1985) o solo dominante é um Brunossol Eutrício típico, suave a moderadamente ondulado (2-4% de declividade) e cujo perfil responde à seguinte descrição:

- 0-25 cm Espessura 25 cm (varia entre 18 e 30 cm), cor pardo muito escuro (10 YR 2/2); textura franco argilo-siltosa; estrutura em blocos subangulares, médios, moderados; transição clara.
- 25-65 cm Espessura 40 cm; cor cinza muito escuro a pardo cinzento muito escuro e pardo escuro em seu nível inferior, textura argilo-siltosa; estrutura em prismas médios e grandes, fortes, que quebram em blocos angulares médios, filme de argila e faces de deslizamento contínuas; concreções de ferro pequenas, comuns a abundantes e duras; transição gradativa.
- 65-85 cm Espessura 20 cm, cor pardo escuro ou pardo escuro cinzento e pardo; textura argilo-siltosa; estrutura similar ao B_{2t}; transição clara ou gradativa.
- 85 + cm Cor pardo; textura argilo-siltosa; estrutura em blocos angulares médios, moderados; concreções comuns e duras de carbonato de cálcio.

Ainda, segundo VICTORIA *et alii* (1985), uma pequena porção da área do experimento é ocupada por outros dois solos, um Vertissol Ruptico típico e um Brunossol Eutrítico típico a lúvico. Esses solos pertencem à Unidade Ecil-da Paullier - Las Brujas, da Carta de Reconhecimento de Solos do Uruguai (MINISTÉRIO DE AGRICULTURA Y PESCA, 1979).

Os resultados das análises de solo realizadas em amostras de 1963 (posteriormente extraviadas) e de 1964 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades químicas de amostras de solo coletados nos blocos I, II e III em 1963 e 1964.

PROPRIEDADE	ANO	BLOCO			MÉDIA
		I	II	III	
pH (H ₂ O)	1963	6,00	5,90	5,80	5,90
pH (KCl 1N)	1963	4,90	5,00	4,90	4,90
%C	1963	2,03	2,50	2,03	2,19
Bray I ug P/g	1963	8,70	5,90	6,80	7,10
%N total	1963	0,19	0,20	0,18	0,19
Ca meq/100g	1964	13,30	14,20	15,10	14,20
Mg meq/100g	1964	2,50	2,10	2,90	2,50
K meq/100g	1964	0,80	0,70	0,80	0,80
Na meq/100g	1964	0,40	0,40	0,40	0,40
S meq/100g	1964	17,00	17,40	19,20	17,90
Acidez potencial a pH 7 meq/100g	1964	5,30	4,90	3,80	4,70
CTC pH 7 meq/100g	1964	22,30	22,30	23,00	22,50
% Satur. em bases	1964	76,20	78,00	83,50	79,20

O pH foi medido em uma relação solo: solução de 1:2,5, o carbono orgânico determinado segundo TINSLEY (1967), o fósforo - Bray I segundo BRAY & KURTZ (1945) e o N total pelo método semi-micro Kjeldhal (BREMNER, 1965). O teor de bases, a acidez potencial e a CTC foram analisados segundo a metodologia descrita pelo MINISTÉRIO DE AGRICULTURA Y PESCA (1976).

3.3. Delineamento Experimental, Instalação e Condução do Experimento

O estudo de campo foi instalado em blocos ao acaso com três repetições, envolvendo originalmente sete sistemas de rotações. Para efeito do presente trabalho, foram selecionados três sistemas segundo a hipótese geral de que apresentariam as características mais contrastantes de acordo com os objetivos do trabalho. Esses sistemas foram:

Sistema 1: Rotação contínua de culturas sem adubação.

Sistema 2: Rotação contínua de culturas com adubação convencional (N-P).

Sistema 5: Rotação de pastagens (gramíneas e leguminosas) com outras culturas, com adubação (N-P).

As parcelas possuíam 25 m de largura por 200 m de comprimento. O tamanho das parcelas e o delineamento do

ensaio exigiram que as operações de manejo do solo fossem feitas a favor das águas. A preparação do solo foi realizada na forma convencional, exceto a partir de 1983 quando se incluiu a cultura de Girassol tardio; nesta, foi adotado o sistema de cultivo reduzido. As seqüências de culturas, assim como das pastagens nos sistemas 1, 2 e 3, são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Sequência das culturas nos sistemas 1 e 2, para os blocos I, II e III.

ANO	BLOCOS		
	I	II	III
1963	Linho	Linho	Linho
1964	Trigo	Trigo	Trigo
1965	Trigo	Trigo	Trigo
1966	Girassol	Girassol	Girassol
1967	Trigo	Trigo	Trigo
1968	Trigo	Trigo	Trigo
1969	Girassol	Girassol	Girassol
1970	Trigo	Trigo	Trigo
1971	Sorgo	Sorgo	Sorgo
1972	Linho	Linho	Linho
1973	Trigo	Trigo	Trigo
1974	Sorgo	Trigo	Girassol
1975	Linho	Sorgo	Trigo
1976	Trigo	Linho	Sorgo
1977	Girassol	Trigo	Linho
1978	Trigo	Girassol	Trigo
1979	Sorgo	Trigo	Girassol
1980	Linho	Sorgo	Trigo
1981	Trigo	Linho	Sorgo
1982	Girassol	Trigo	Linho
1983	Sorgo	Trigo	Cevada/Girassol
1984	Cevada/Girassol	Sorgo	Trigo
1985	Trigo	Cevada/Girassol	Sorgo
1986	Sorgo	Trigo	Cevada/Girassol
1987	Cevada/Girassol	Sorgo	Trigo
1988	Trigo	Cevada/Girassol	Sorgo
1989	Sorgo	Trigo	Cevada/Girassol

Tabela 3 - Sequência das culturas no sistema 5, para os blocos I, II e III.

ANO	BLOCOS		
	I	II	III
1963	Pastagem*	Pastagem	Pastagem
1964	Pastagem	Pastagem	Pastagem
1965	Pastagem	Pastagem	Pastagem
1966	Pastagem	Pastagem	Pastagem
1967	Girassol	Girassol	Girassol
1968	Linho	Linho	Linho
1969	Trigo	Trigo	Trigo
1970	Trigo	Trigo	Trigo
1971	Pastagem	Pastagem	Pastagem
1972	Pastagem	Pastagem	Pastagem
1973	Pastagem	Pastagem	Pastagem
1974	Sorgo	Pastagem	Pastagem
1975	Linho	Sorgo	Pastagem
1976	Trigo	Linho	Sorgo
1977	Girassol	Trigo	Linho
1978	Trigo	Girassol	Trigo
1979	Pastagem	Trigo	Girassol
1980	Pastagem	Pastagem	Trigo
1981	Pastagem	Pastagem	Pastagem
1982	Pastagem	Pastagem	Pastagem
1983	Sorgo	Pastagem	Pastagem
1984	Cevada/Girassol	Sorgo	Pastagem
1985	Trigo/Pastagem	Cevada/Girassol	Sorgo
1986	Pastagem	Trigo/Pastagem	Cevada/Girassol
1987	Pastagem	Pastagem	Trigo/Pastagem
1988	Pastagem	Pastagem	Pastagem
1989	Sorgo	Pastagem	Pastagem

* Espécies cultivadas: *Lotus corniculatus*, *Trifolium repens* e *Festuca arundinacea*.

Os sistemas propostos foram mantidos até o ano de 1973 inclusive, quando se tomou conhecimento da grande influência das diferenças climáticas de um ano para o outro, sobre a produtividade das culturas, enquanto variações constantes e de menor magnitude eram observadas entre blocos (DIAZ, 1983). Em consequência, para minimizar o efeito ano,

a partir de 1974 as rotações nos três blocos foram defasadas (Tabelas 2 e 3).

Por sua vez, DIAZ (1983) introduziu três modificações gerais que começaram em 1983:

- 1) A cultura da cevada substitui a de linho, que perdia importância econômica para o país.
- 2) O girassol foi semeado tardiamente logo após a cultura da cevada. A sequência básica de culturas é de três anos, com sorgo como cabeça de rotação, seguindo-se a cevada e girassol (tardio) e terminando com trigo.
- 3) A semeadura da pastagem é associadaa com o trigo, que finaliza a fase de culturas.

Procurou-se manter o manejo do solo e das culturas o mais homogêneo possível entre os diferentes sistemas, exceto, naturalmente, nas variáveis que distinguem um sistema do outro. Nos sistemas 2 e 5 a adubação fosfatada foi igual nos 3 blocos até 1973 inclusive. A partir daí, passou a ser realizada separadamente em cada bloco em função da cultura e do teor de fósforo disponível do solo. As doses de fósforo utilizadas encontram-se nas Tabelas 4 e 5. Para o período 1963-1987 os blocos I, II e III do sistema 2 receberam, em média, 39,0; 40,8 e 39,7 kg P_{25} /ha/ano respectivamente. Os blocos I, II e III do sistema 5 para o mesmo período tiveram, em média, 41,3; 43,3 e 40,8 kg P_{25} /ha/ano, respectivamente.

Tabela 4 - Doses de fósforo aplicadas no sistema 2, para os blocos I, II e III (superfosfato, kg P_2O_5 /ha/ano).

ANO	BLOCOS			MÉDIA
	BI	BII	BIII	
1963	41	41	41	41
1964	50	50	50	50
1965	46	46	46	46
1966	35	35	35	35
1967	36	36	36	36
1968	43	43	43	43
1969	52	52	52	52
1970	47	47	47	47
1971	42	42	42	42
1972	38	38	38	38
1973	62	62	62	62
1974	65	62	65	64
1975	63	48	63	58
1976	51	46	41	46
1977	53	36	48	46
1978	32	48	32	37
1979	42	39	46	42
1980	0	38	24	21
1981	0	37	31	23
1982	70	22	32	41
1983	0	20	15	12
1984	17	37	17	24
1985	0	0	0	0
1986	50	46	46	47
1987	40	50	40	43
1988	64	52	40	52
1989	37	43	40	40

Tabela 5 - Doses de fósforo aplicadas no sistema 5, para os blocos I, II e III (superfosfato, kg P_2O_5 /ha/ano).

ANO	BLOCOS			MÉDIA
	BI	BII	BIII	
1963	48	48	48	48
1964	31	31	31	31
1965	35	35	35	35
1966	69	69	69	69
1967	77	77	77	77
1968	26	26	26	26
1969	44	44	44	44
1970	47	47	47	47
1971	46	46	46	46
1972	46	46	46	46
1973	77	77	77	77
1974	0	44	44	29
1975	97	48	44	63
1976	51	46	24	40
1977	53	44	60	52
1978	40	40	32	37
1979	66	52	46	55
1980	0	35	28	21
1981	0	0	66	22
1982	35	35	13	28
1983	29	30	0	20
1984	26	58	0	28
1985	0	0	0	0
1986	46	62	92	67
1987	44	44	24	37
1988	0	0	0	0
1989	37	0	0	12

A adubação nitrogenada aplicada ao sistema 2, foi igual entre blocos até 1973, e no período de 1963 a 1987 foi, em média, de 40,2 kg N/ha/ano. O sistema 5, para o mesmo período incluindo os anos com pastagens, recebeu em média 19,2 kg N/ha/ano, concentrando-se sua aplicação na etapa de culturas que não pastagens.

Todos os anos, no mês de maio, foram retiradas 20 amostras de solo de cada parcela, na profundidade 0-20 cm, as quais foram misturadas para se obter uma amostra composta por parcela. Ditas amostras foram secadas em estufa a 40-45°C, moídas e armazenadas em envelopes de papel.

3.4. Dados do Experimento Seleccionados para este Estudo

Durante a condução do experimento ao longo de mais de duas décadas, foram acumuladas numerosas informações sobre as culturas, o solo e o clima do local. Dessas informações, os dados descritos a seguir foram seleccionados para auxiliar a interpretação dos resultados obtidos no presente estudo.

3.4.1. Produção das culturas

Anualmente, as parcelas foram colhidas e as produções de grãos avaliadas. No caso das pastagens, estas tinham seu rendimento avaliado e, em seguida eram cortadas, sendo geralmente o material vegetal devolvido ao solo.

Não havia dados sobre as perdas de fósforo através dos produtos agrícolas removidos das parcelas, nem por erosão.

3.4.2. Teores de carbono orgânico e nitrogênio total do solo

As amostras de solo coletadas anualmente das parcelas (item 3.3) foram submetidas à determinação do teor de carbono orgânico (período de 1963 a 1987) e de nitrogênio total (período de 1963 a 1986) no Laboratório de Análises do "Projeto Solos", da Estação Experimental "La Estanzuela", segundo metodologia anteriormente mencionada (item 3.3).

3.5. Determinação das Formas de Fósforo do Solo

Nas amostras anuais obtidas de cada parcela dos sistemas 1, 2 e 5, no período 1964-87 (item 3.3), realizaram-se as seguintes análises químicas:

- a) P total determinado por digestão com $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ segundo JACKSON (1964). A determinação do fósforo no extrato foi feita por colorimetria empregando-se o ácido ascórbico como redutor, segundo MURPHY & RILEY (1962). Testes preliminares indicaram que o emprego de H_2SO_4 na concentração 2,5N ao invés de 5N dava melhores resultados dada a acidez presente no extrato.

- b) P orgânico determinado por ignição a 240°C e tratamento com HCl concentrado segundo LEGG & BLACK (1955). A concentração de P no extrato foi determinada conforme descrito no item a.
- c) P inorgânico calculado por diferença entre P total (item a) menos P orgânico (item b).
- d) Fracionamento do P inorgânico segundo CHANG & JACKSON (1957) modificado. Os fosfatos hidrossolúveis extraídos com NH_4Cl 1N foram descartados por apresentarem uma concentração de fósforo muito baixa. A extração de fosfato de alumínio foi realizada com NH_4F ajustado a pH 8,5 com NH_4OH . A determinação de fósforo nos extratos de NH_4F 0,5 N a pH 8,5 (PAI), NaOH 0,1N (PFe) e H_2SO_4 0,5 N (PCa), foi realizada por colorimetria, empregando-se o ácido ascórbico como redutor, segundo ALEXANDER & ROBERTSON (1970).

O ajuste do pH dos extratos de NH_4F para 5,0 foi realizado mediante adição de H_2SO_4 puro. Nos extratos de NaOH e H_2SO_4 o ajuste ao pH 5,0 foi realizado com NaOH 2N. Pelo fato de não se dispor do indicador p-Nitrofenol, e pela necessidade de se processar um grande volume de amostras, determinou-se potenciométricamente o volume de ácido ou base a se adicionar a algumas amostras e passou-se a adicionar idênticas quantidades aos extratos similares.

O P ocluso foi calculado pela diferença entre o P total e a soma de PAI + PFe + PCa + P orgânico (ROCHE *et alii*, 1980).

- e) P disponível - Bray I determinado segundo BRAY & KURTZ (1945) modificado (o tempo de agitação foi aumentado para 5 minutos). A determinação do P no extrato foi feita segundo MURPHY & RILEY (1962).
- f) P disponível determinado pelo método de resinas de intercâmbio catiônico de ZAMUZ & CASTRO (1974) modificado. Colocam-se 5 g de solo moído e passado em peneira de 1 mm, em vasilhame plástico com tampa, de 100 ml de capacidade, onde se adiciona uma medida volumétrica (aproximadamente equivalente a 2 g) de resinas Dowex 50 W X 8 na forma H^+ e 50 ml de água destilada. Agita-se durante 3 horas e deixa-se decantar toda a noite. Depois, adicionam-se 10 gotas de H_2SO_4 5N deixando repousar até que o extrato se torne límpido (não mais de 1 hora e 30 minutos). Em seguida, extrai-se uma alíquota de 5 ml, adiciona-se 8 ml do reativo preparado segundo MURPHY & RILEY (1962) e completa-se a 50 ml. A leitura é feita em espectrofotômetro a 882 nm de comprimento de onda.

3.6. Determinação da Retenção de Fósforo com Base nas Iso- termas de adsorção

Para elaborar as isotermas de adsorção de fósforo seguiu-se o procedimento utilizado por ESCUDERO & MORÓN (1978) com modificações. De cada parcela dos sistemas 1, 2 e 5, para os anos 1986 e 1987 tomaram-se 6 amostras de 3 g cada uma. A cada amostra de 3 g de solo seco e tamizado a 1 mm adicionou-se 30 ml de CaCl_2 0,01 M em tubos de vidro de 100 ml. O cloreto de cálcio adicionado continha concentrações variáveis de P (KH_2PO_4) para obter concentrações de 0, 25, 100, 250 e 500 $\mu\text{g P/g}$ de solo. As suspensões eram agitadas durante 18 horas, sendo depois centrifugadas a 2000 rpm durante 15 minutos. Do sobrenadante tomaram-se alíquotas que foram convenientemente diluídas e submetidas à determinação do fósforo. Esta foi feita por colorimetria, adicionando-se 8 ml do reativo proposto por MURPHY & RILEY (1962) e completando-se o volume a 50 ml. A temperatura ambiente no laboratório oscilava entre 18 e 21°C. O P retido pelo solo foi calculado como a diferença entre o P inicialmente adicionado na solução e a parte adicionada que ficou na solução após o equilíbrio. Com os valores de P retido em $\mu\text{g P/g}$ de solo e a concentração de P na solução ($\mu\text{g P/ml}$), construíram-se as isotermas de adsorção. Para os dois anos considerados em cada sistema determinou-se a média da concentração de P na solução e a média de P retido na fase sólida para uma mesma dose de P adicionado. Obteve-se, assim, a isoterma

de adsorção média de blocos e anos 1986-87. Portanto, cada valor é uma média de 6 análises (3 blocos x 2 anos).

3.7. Determinação do Fósforo na Biomassa Microbiana do Solo

O P presente na biomassa microbiana do solo foi analisado segundo BROOKES *et alii* (1982), partindo-se de amostras frescas de cada parcela dos três sistemas, coletadas em 28 de junho de 1989. As amostras, com umidade natural, foram passadas em peneira de 2 mm e incubadas por 10 dias em recipientes fechados que continham frasco com 5-10 g de uma mistura (40 g CaO + 10 g NaOH + 10 ml H₂O) que retém o CO₂ produzido pela respiração microbiana. Além disso, incluiu-se um recipiente com água para manter a umidade do solo. A temperatura ambiente no laboratório oscilou entre 18 e 21°C. Acabado o período de incubação, tomaram-se 6 amostras de solo, cada uma equivalente a 10 g de solo seco, procedentes de cada parcela dos três sistemas. As 6 amostras foram divididas em 3 grupos de 2 amostras cada. O primeiro grupo foi fumigado com clorofórmio (CHCl₃) durante 24 horas. A fumigação consistiu em colocar as amostras de solo em dessecador contendo papel absorvente umedecido nas paredes internas e um copo com 10-15 ml de CHCl₃. Durante a fumigação ligava-se a bomba de vácuo quatro vezes durante dez minutos cada vez para se conseguir maior efeito biocida. O segundo e terceiro grupos foram incubados aerobicamente

durante 24 horas nas mesmas condições de temperatura ambiente. Em seguida, três grupos foram submetidos à extração com NaHCO_3 0,5 M (pH 8,5). O terceiro grupo, antes da extração recebeu adição de P inorgânico (KH_2PO_4) equivalente a 25 μg P/g de solo seco para correção da quantidade de P inorgânico liberada pela biomassa e que foi retida pelo solo. A quantidade equivalente a 10 g de solo seco foi agitada por 30 minutos com 200 ml de NaHCO_3 0,5 M e 2 g de carbono ativado, filtrando-se a suspensão em seguida com papel de filtro Whatman nº 42. Uma alíquota de 10 ml do extrato era tomada e sua acidez ajustada ao pH 5,0 com H_2SO_4 . Após, adicionava-se na alíquota 8 ml de reativo (MURPHY & RILEY, 1962) e completava-se o volume a 50 ml. A leitura colorimétrica era realizada em espectrofotômetro a um comprimento de onda de 882 nm.

Considera-se que 40% do P presente na biomassa seja extraído como P inorgânico pelo clorofórmio ($K_p=0,40$), de acordo com BROOKES *et alii* (1982). A fórmula de cálculo é:

$$\mu\text{g P na biomassa microbiana/g de solo seco} = \frac{25 (b-a)}{0,4 (c-a)}$$

onde:

a = μg P/g de solo seco não fumigado.

b = μg P/g de solo seco fumigado.

c = μg P/g de solo seco não fumigado e tratado com KH_2PO_4 .

3.8. Métodos Estatísticos

Com o objetivo de conhecer a tendência da evolução das diferentes formas de fósforo estudadas ao longo de todo o período de 1964 a 1987, ajustaram-se regressões lineares (métodos dos quadrados mínimos) com seus respectivos coeficientes de correlação para as diversas variáveis (Pt, P org, P inor, PAI, PFe, PCa, P Ocl, P Bray I, P resinas, $\frac{(PAI+PFe) \cdot 100}{P_{ocl}}$, $\frac{P_{ocl} \cdot 100}{P_{inor}}$, C org: P org, N total: P org, em função do tempo. Em cada sistemas tomaram-se os valores médios de cada ano. Verificou-se se os coeficientes angulares (b) foram significativamente diferentes de zero, em cujo caso calculavam-se os intervalos de confiança de 95% de probabilidade.

A partir de 1974, como os blocos de cada sistema deixaram de ser repetições, procurou-se verificar se as mudanças introduzidas em 1974 não afetavam as tendências médias das seguintes variáveis: Pt, P org, P inor, PAI, PFe, PCa, P Ocl, P Bray I, P resinas, % Carbono e % Nitrogênio total. Tomando-se as médias de cada uma dessas variáveis foi feita uma regressão linear com variável ano para cada período de tempo, 1964-73 e 1974-87. Havendo semelhança estatística entre os coeficientes angulares das retas obtidas para cada período, pode-se concluir que não houve alteração da tendência das variáveis estudadas. Para comparar esses coeficientes utilizou-se uma rotina do pacote estatístico MSTAT.

Com o objetivo de conhecer quais as frações ou relações entre frações do fósforo que melhor explicam a variação no P disponível (Bray I e resinas) realizou-se uma análise de correlação e regressão múltipla. Consideraram-se os resultados analíticos médios nos três sistemas em cada ano do período 1964-87. O programa utilizado pertence ao pacote estatístico STATPAK, programa "step wise", método Forward. O programa esteve ordenado para que as distintas variáveis fossem incorporadas uma a uma, em ordem de importância segundo sua contribuição na variação do P disponível. A contribuição mínima exigida para entrar na equação foi um F de entrada significativo a 1%.

Para as isotermas de adsorção de cada Sistema ajustou-se uma função polinomial de 4^o grau a partir da qual calculou-se o P retido na fase sólida para 0,1; 0,2 e 1,0 $\mu\text{g P/ml}$ na solução.

Para as diferentes análises estatísticas usaram-se três níveis de probabilidade: 10% (*); 5% (**); e 1% (***).

3.9. Balanço do Fósforo na Área do Experimento

A inexistência de dados que permitissem quantificar a saída de fósforo da área de estudo pelas duas vias principais - remoção pelas colheitas e erosão - dificultava a realização de um balanço do nutriente no solo daquele local. Porém, considerando-se o grande esforço e o número de

anos dedicados à manutenção do experimento, decidiu-se fazer uma estimativa aproximada dos dados faltantes para que o desejado balanço pudesse ser conseguido, e assim, fornecer mais uma contribuição ao estudo que há muito vem sendo desenvolvido na "La Estanzuela".

Os fluxos de entrada e saída de P foram expressos como taxas anuais em $\text{kg P}_{25}\text{O}_{10}/\text{ha}$ referidos ao horizonte superficial (0-20 cm). Consideraram-se as seguintes vias de saída:

1) Extração pelas culturas (CP). Foi calculada a partir dos rendimentos das colheitas e da concentração de P nos grãos colhidos, esta estimativa com base em tabelas publicadas pelo NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1982) e em informações contidas no Projeto "Solos" da Estação experimental "La Estanzuela" (não publicado). As concentrações de P utilizadas para o Sistema 1 foram as seguintes: Cevada 0,25%; Trigo 0,26%; Sorgo 0,20%; Girassol 0,44%; e Linho 0,38%. Para os sistemas 2 e 5 utilizaram-se as seguintes concentrações: Cevada 0,33%; Trigo 0,35%; Sorgo 0,27%; Girassol 0,59% e Linho 0,50%.

2) Erosão (EP). Aqui foram consideradas as perdas por escorrimento superficial tanto do P em solução como do P nos sedimentos. Seu valor foi calculado da equação (1) de balanço de P total - para a profundidade 0-20 cm - para cada sistema.

3) Movimento dos adubos fosfatados até a camada inferior do solo (20-40 cm), abreviada FCI. Amostras foram coletadas na profundidade de 20-40 cm em cada parcela dos três sistemas em Agosto de 1989, para análise do P total segundo metodologia anteriormente descrita (item 3.5). A diferença entre a média dos sistemas 2 e 5 e o resultado do sistema 1 foi considerada como produto do trabalho mecânico do solo e/ou do movimento descendente causado pelas raízes das plantas (READ & CAMPBELL, 1981). Considerou-se que essa diferença foi resultado do movimento anual de idênticas quantidades de P no período 1963-1989. Para a conversão de concentrações a quantidades absolutas utilizaram-se os valores de densidades do solo $1,26 \text{ g/cm}^3$, $1,22 \text{ g/cm}^3$ e $1,06 \text{ g/cm}^3$ para os sistemas 1, 2 e 5 respectivamente.

As entradas de fósforo no horizonte 0-20 cm consideradas foram as seguintes:

- 1) Fósforo proveniente das adubações, denominado FP.
- 2) Fósforo existente nas camadas inferiores e que passou a pertencer à camada de 0-20 cm devido à remoção de terra superficial pela erosão, abreviado por SP. GARCIA (1983), utilizando a Equação Universal de Perdas de Solo de WISCHMEIER & SMITH (1978) estimou as perdas anuais dos sistemas 1, 2 e 5 em 27,18; 23,72 e 9,39 toneladas por hectare. Considerando que as cama-

das do solo tenham a mesma densidade aparente, essas mesmas quantidades de terra estariam ingressando na camada superior de 0-20 cm. A quantidade, de P ingressada, para os sistemas 1, 2 e 5, foi calculada considerando-se o teor de P total existente na camada 20-40 cm do sistema 1 em 1989 porque este sistema não recebeu adubo fosfatado.

As mudanças na concentração de P total na profundidade 0-20 cm seria o balanço entre os fluxos de entrada e saída, refletindo-se nos valores dos coeficientes das regressões ajustadas para P total nos sistemas 1, 2 e 5. Para transformar as concentrações em quantidades absolutas (AP) utilizaram-se os valores de densidade do solo de 1,255; 1,221 e 1,064 g/cm³ para os sistemas 1, 2 e 5 respectivamente (GARCIA *et alii*, 1979).

Com base no anteriormente discutido, estabeleceu-se a seguinte equação geral:

$$AP = FP + SP - CP - EP - FCI \quad (1)$$

O resultado dessa equação informa se houve perdas ou ganhos de fósforo do solo, porém, trata-se de um balanço aparente porque o balanço real deveria envolver as entradas e saídas de P das camadas inferiores (20-40 cm).

O balanço real (BR), contudo, foi calculado segundo a seguinte equação:

$$BR = AP - SP + FCI \quad (2)$$

Dentro dos fluxos de saída, as perdas de P por lixiviação, presumivelmente desprezíveis, estariam dentro do termo EP.

A possível absorção de P do horizonte 20-40 cm pelas plantas, e sua transferência até o horizonte 0-20 cm - especialmente no sistema 1 - não foi considerada por não se ter informações a respeito.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Sistema 1: Agricultura Contínua Sem Adubação

O sistema 1, constituído por agricultura contínua sem adubação e sem tratamento algum de conservação de solo, pode ser considerado como a condição de utilização com máxima degradação.

A Tabela 6 apresenta resumidamente o Teste estatístico para verificar se a diferença entre os coeficientes de regressão obtidos para os períodos 1964-73 e 1974-87, para cada variável, é significativa. Verifica-se que, ao nível de 5% de probabilidade, as diferenças entre os coeficientes não foram significativas em nenhuma das variáveis, indicando que a evolução das formas de fósforo estudadas, bem como do N total e do C orgânico, não sofreu alteração de um período para o outro. Esse fato permitiu fazer um estudo de regressão linear com todos os dados, isto é, juntando-se ambos os períodos, para se ter a tendência geral das variáveis de 1964 a 1987.

Tabela 6. Teste estatístico para diferença entre coeficientes de regressões lineares no Sistema 1. Período 1964-73, b1. Período 1974-87, b2.

Variável	Graus de liberdade		Quadrado medio		F	Probabilidade
Pt	1	19	9,43	42,88	0,22	-----
Porg	1	20	14,14	37,31	0,38	-----
Pinor	1	19	1,88	23,37	0,08	-----
PAI	1	19	7,10	1,65	4,31	6,1
PFe	1	19	5,48	3,26	1,68	21,0
PCa	1	19	0,74	0,58	1,28	27,2
POcl	1	19	20,48	29,88	0,68	-----
P Resinas	1	19	0,34	0,66	0,62	-----
P Bray I	1	19	0,26	0,69	0,44	-----
N total	1	19	0,00	0,00	3,22	8,8
C org	1	20	0,02	0,00	3,65	7,4

4.1.1. Balanço do fósforo na área do experimento

Na Figura 2 observa-se que houve perda consistente de P total ao longo do período estudado. A regressão obtida mostra uma perda anual de $2,25 \mu\text{g P/g}$, com um intervalo de confiança de 95% de probabilidade oscilando entre um mínimo de $1,94$ e um máximo de $3,71 \mu\text{g P/g}$. Admitindo-se uma densidade do solo de $1,26$ (GARCIA *et alii*, 1979) as perdas anuais aparentes (AP) seriam de $12,93 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha/ano}$.

A estimativa da perda média anual de P devido à extração pelas colheitas (CP) foi de $7,04 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha/ano}$, com um desvio padrão de $2,74$.

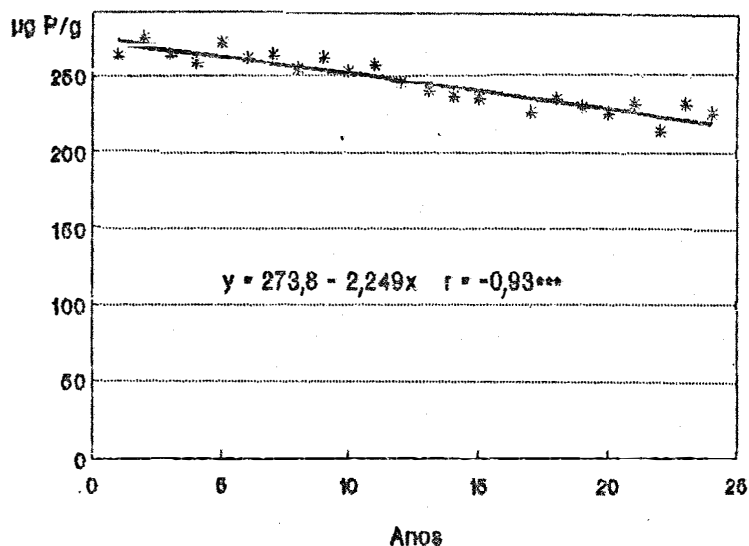


Figura 2. Evolução da concentração de fósforo total no Sistema 1 durante o período 1954-67.

As análises de P total na profundidade 20-40 cm do sistema 1, realizadas em agosto de 1989, deram um valor médio de 203 µg P/g (Tabela 7). Em consequência, estimou-se que ingressaram 12,64 kg P_2O_5 /ha/ano pela incorporação de camadas de solo inferiores à profundidade originalmente considerada de 0-20 cm (SP).

Tabela 7. Fósforo total (µg P/g) na profundidade 20-40 cm.

	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 5
Bloco 1	196,3	209,7	223,1
Bloco 2	196,3	215,4	236,6
Bloco 3	216,4	203,0	216,4
Média	203,0	209,7	225,3

As perdas anuais pela erosão (EP), calculadas com base na equação (1), ascenderiam a $18,52 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}/\text{ano}$.

A Tabela 8 resume o balanço do P obtido na área experimental para o sistema 1.

Tabela 8. Aproximação a um balanço de fósforo total (kg P₂O₅/Ha/ano) no Sistema 1.

← 0-20 cm →					← 0-40 cm →	
Entradas		Saídas			Balanço	Balanço
FP	SP	CP	EP	FCI	AP	BR
0	12,64	7,04	18,52	0	-12,93	-26,57

A erosão foi a principal via de saída de fósforo do sistema 1, com perda 2,6 vezes superior à quantidade extraída pelas colheitas. Para este sistema de produção, segundo a revisão de SHARPLEY & MENZEL (1987) é de se supor que o fósforo perdido pela erosão encontra-se principalmente nos sedimentos, sendo mínima a proporção na solução. Segundo esses autores, a biodisponibilidade do P presente nos sedimentos é muito variável. Provavelmente o valor da unidade de P perdido pela erosão seja de menor disponibilidade para as plantas que aquele que se encontra no adubo ou que é extraído pelas colheitas. Apesar disso, de acordo com os resultados de SHARPLEY (1985b) é de se esperar que o P perdido nas partículas de solo pelo escoamento superficial seja de maior valor para a nutrição das plantas que o encontrado no solo do qual se originou.

GARCIA (1983) chamou a atenção sobre o fato de que as perdas de solo neste experimento poderiam ser diminuídas em 50% somente realizando cultivos que respeitassem as curvas de nível. Considerando-se que as perdas de P pela erosão são seletivas tanto mais quanto menor quantidade de solo perdida (MENZEL, 1980; SHARPLEY, 1980; SHARPLEY, 1985b; McDOWELL *et alii*, 1989) igual é de se esperar uma redução significativa das perdas de fósforo quando se reduzem as perdas de solo. Importantes reduções nas perdas de P total pelos processos erosivos foram obtidas por McDOWELL & MCGREGOR (1984) e O'HALLORAN *et alii* (1987) com aplicação de práticas de conservação de solos.

Com base na função ajustada na Figura 2, o conteúdo de P total diminuiu no período 1964-87 em 19%. Este fato, conjuntamente com um balanço real (BR = -25,27 kg P_2O_5 /ha/ano) claramente negativo, constituem indicadores primários de rápida degradação do fósforo do solo quando este é submetido à agricultura contínua sem adubação.

4.1.2. Mudanças no estágio interno do fósforo no sistema 1

A figura 3 representa a evolução do P orgânico no período 1964-87, onde se observa que a perda anual dessa fração foi de 1,5 $\mu\text{g P/g}$. Esse valor, para um intervalo de confiança de 95% de probabilidade, oscila entre 1,88 e 1,13 $\mu\text{g P/g/ano}$. Esta perda é notoriamente superior à apresentada pela fração inorgânica na Figura 4.

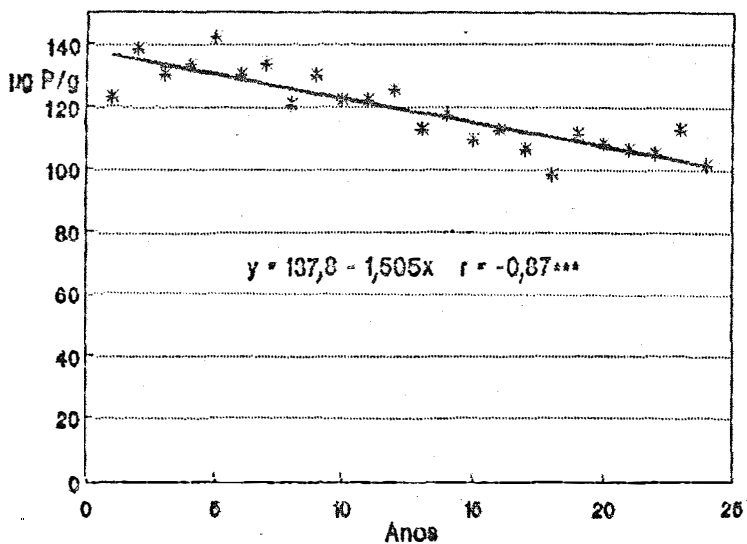


Figura 3. Evolução da concentração de fósforo orgânico no Sistema 1 durante o período 1964-87.

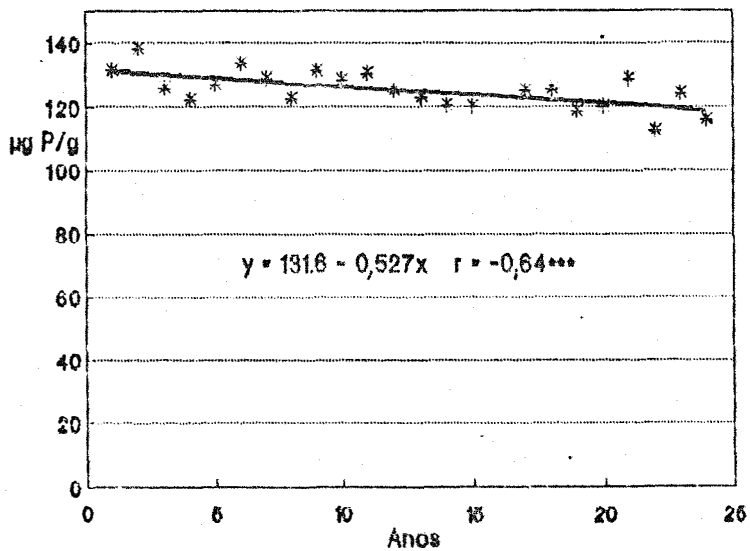


Figura 4. Evolução da concentração de fósforo inorgânico no Sistema 1 durante o período 1964-87.

Segundo as funções ajustadas, enquanto o P orgânico diminuiu 25,4% no período 1964-87, o P inorgânico baixou apenas 9,2%, mostrando que a fração inorgânica tende a predominar com o tempo.

O fato da fração orgânica ter sido mais afetada que a inorgânica em rotações agrícolas não adubadas ou adubadas com quantidades muito baixas de nutrientes, foram relatadas por diversos autores (CHASS *et alii*, 1961; TIESSEN *et alii*, 1982; DALAL & MEYER, 1986; PARTON *et alii*, 1988).

Não obstante não se conheça quanto da diminuição do P orgânico é explicada pela erosão e pela mineralização, a magnitude em que é afetada mereceria atribuir-lhe um papel de reservatório.

As relações C orgânico/ P orgânico e N total/ P orgânico, apresentadas nas figuras 5 e 6, mostram haver uma tendência para perder relativamente mais C orgânico e nitrogênio que P orgânico. TIESSEN *et alii* (1982) e DALAL & MEYER (1986) relataram tendências semelhantes para solos agrícolas não adubados ou adubados com quantidades muito baixas de fertilizantes. Esta diferença entre as perdas poderia ser explicada pelo fato da mineralização do fósforo ser independente do processo de mineralização do carbono (McGIL & COLE, 1981). SHARPLEY (1985b), estudando a seletividade do processo erosivo em diversos solos, encontrou razões de enriquecimento maiores para C e N que para P orgânico. Fatos como esse poderiam explicar parte das tendências observadas.

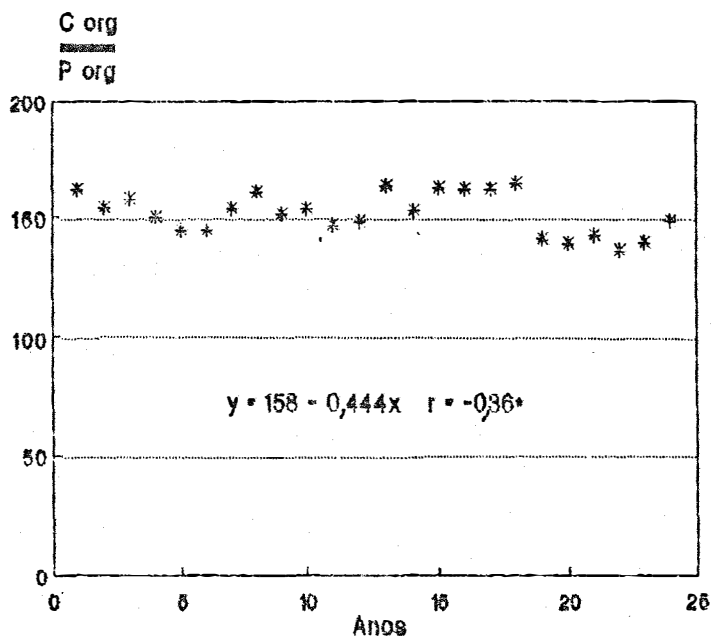


Figura 5. Evolução da relação entre conteúdos de C orgânico e P orgânico no Sistema 1 durante o período 1964-87.

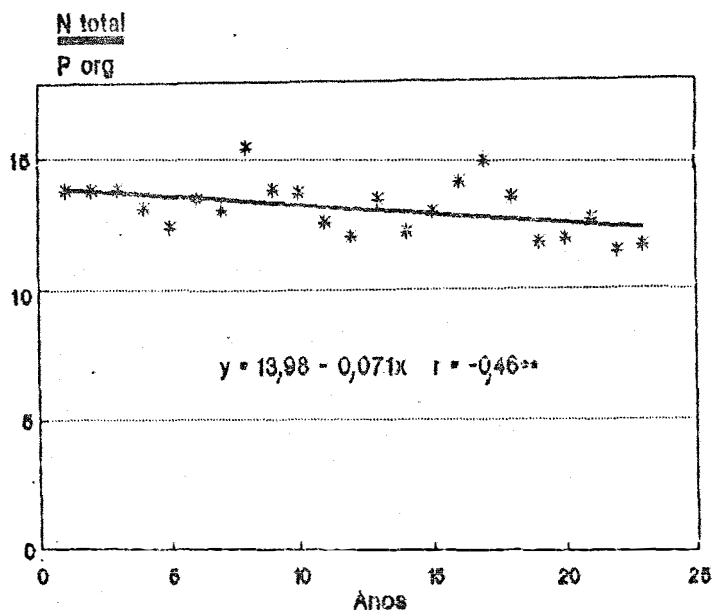


Figura 6. Evolução da relação entre conteúdos de N total e P orgânico no Sistema 1 durante o período 1964-86.

No tocante ao fracionamento do fósforo inorgânico (Figuras 7, 8 e 9) observa-se que as perdas anuais das frações PAI e PFe são superiores às registradas para PCa. A ação combinada da extração pelas plantas e a erosão — os dois processos seletivos — explicariam esta tendência. O estudo realizado por Scheffer *et alii*¹, citado por BLACK (1975), mostrou que as frações PAI e PFe diferem da fração PCa porque aquelas se concentram nas frações mais finas. Isso faria com que as frações PAI e PFe se tornassem susceptíveis às perdas em sedimentos do escoamento superficial. Por outro lado, KAMPRATH & WATSON (1980) afirmam — em termos gerais — que a fração PAI é a fonte primária de fósforo para as plantas.

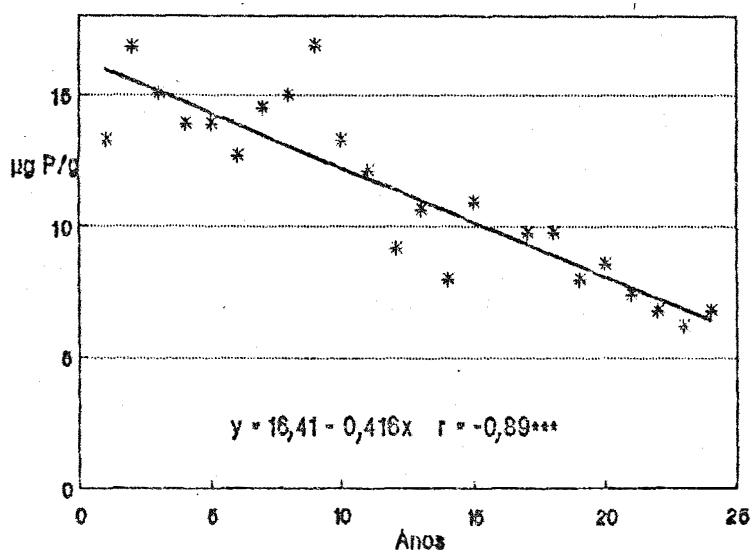


Figura 7. Evolução da concentração de fosfato de alumínio no Sistema 1 durante o período 1964-87.

¹ SCHEFFER, F.; KLOKE, A.; HEMPLER, K. Die Phosphatformen im Boden und ihre Verteilung auf die Korngrößenfraktionen Zeitschr. Pflanzenernähr., Düng, Bodenk, 91:240-252. 1960.

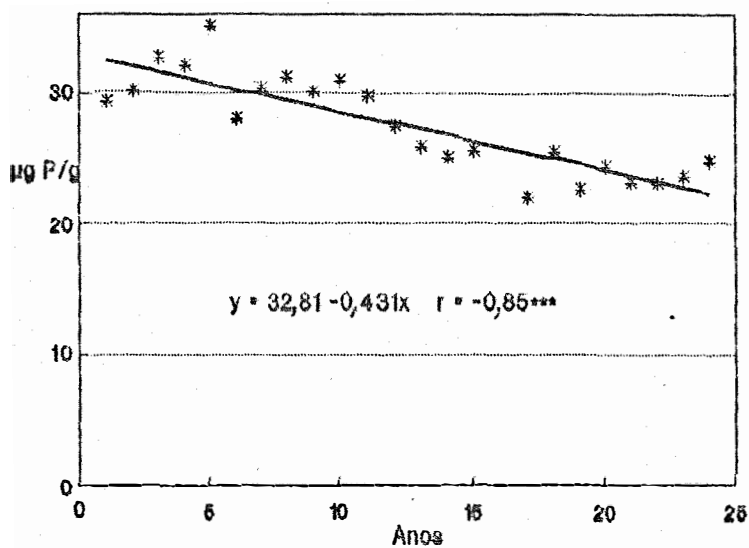


Figura 8. Evolução da concentração de fosfato de ferro no Sistema 1 durante o período 1964-87.

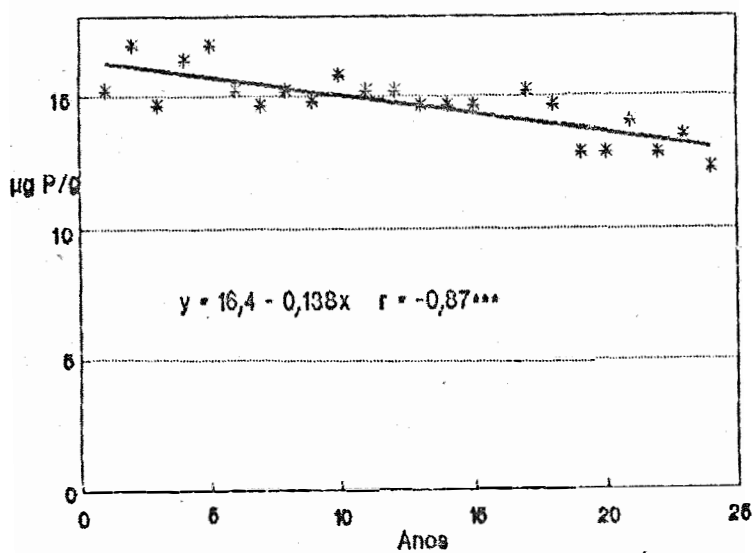


Figura 9. Evolução da concentração de fosfato de cálcio no Sistema 1 durante o período 1964-87.

MENDEZ (1975), trabalhando em um solo da Estação Experimental "La Estanzuela", semelhante ao utilizado neste trabalho, encontrou que o P disponível (Bray I e resinas de intercâmbio catiônico) estava mais correlacionado com a fração PAI, vindo em segundo lugar a fração PFe e por último a fração PCa. Sintetizando, parece lógico que a fração PCa seja mais estável.

Em termos porcentuais para o período 1964-87, a perda de PCa foi de 19,6%, valor praticamente igual ao da perda total de P total (19,0%). Ao contrário, a quantidade de PAI caiu em 60% no mesmo período o que mostra ser essa uma fração altamente susceptível a perder-se com o manejo adotado no Sistema 1. As perdas da fração PFe foram intermediárias às frações PCa e PAI, ou sejam, de 30,6%.

Na Figura 10 pode se observar que a regressão do teor de P ocluso com o tempo não foi significativa, indicando que sua concentração é estável no solo através do tempo e que não é afetada por processos seletivos. Sua presença na fração areia foi relatada por SYERS *et alii* (1969) para um solo aluvial, o que daria àquela fração maior estabilidade frente ao processo erosivo. Não se possui informação sobre a relação entre o P ocluso e as frações granulométricas nos solos estudados, mas presume-se que o P ocluso encontrasse em maior concentração nas frações grossas.

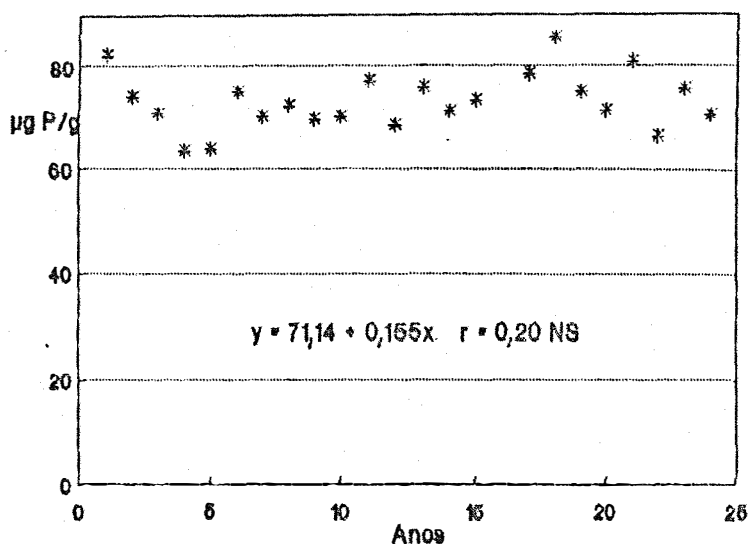


Figura 10. Evolução da concentração do fosfato ocluso no Sistema 1 durante o período 1964-87.

SHARPLEY & SMITH (1985), utilizando o fracionamento de CHANG & JACKSON (1957) modificado, encontraram tendências semelhantes para o P ocluso de um solo não calcáreo franco siltoso, cultivado durante 60 anos sem receber nenhuma adubação fosfatada. Nesse estudo, a concentração do P ocluso permanecia estável, enquanto a de P total e de P orgânico diminuíam. A diferença entre os resultados desses autores e os obtidos no Sistema 1 está no fato da fração P não ocluso (PAI + PFe) encontrada por eles ter aumentado devido, segundo os mesmos, à incorporação de resíduos orgânicos e à adsorção do P mineralizado.

No início do período em estudo, a quantidade de P ocluso era aproximadamente 54% da de P inorgânico total, e esse valor aumentou no transcurso do tempo (Figura 11). Assim, a qualidade da fração inorgânica tendeu a dimi-

nuir com o tempo. O valor inicial de 54% é superior às tendências gerais sugeridas por SMECK (1985) para solos da Ordem Molissol. É possível que, assim como seu valor aumentou no período de agricultura de 1964 a 1987, os 50 ou 60 anos de agricultura prévia devem ter agido no mesmo sentido que o observado no período 1964-87.

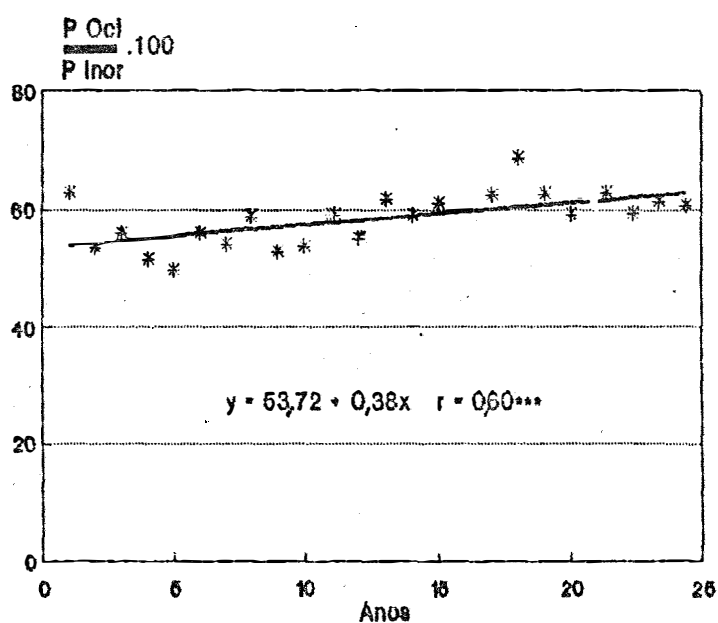


Figura 11. Evolução do conteúdo das formas oclusas dentro do P Inorgânico no Sistema 1 durante o período 1964-87.

A deterioração da qualidade da fração inorgânica com o tempo, expressa por outra relação, também é observada na Figura 12.

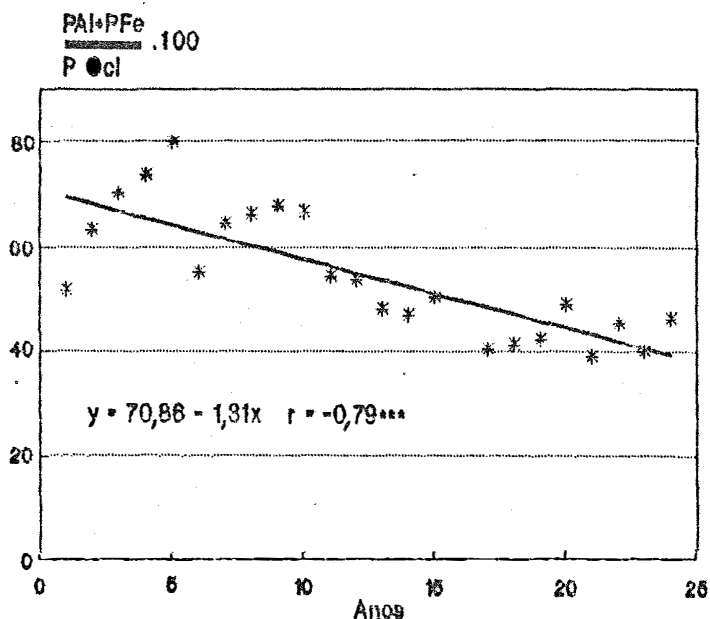


Figura 12. Evolução da relação entre frações do P inorgânico no Sistema 1 durante o período 1964-87.

O teor de P disponível extrído com Bray I (Figura 13), da mesma forma que o obtido por resina (Figura 14), apresentaram acentuada diminuição ao longo do período de cultivo do solo. Os valores iniciais de P-resina foram maiores que os teores normalmente descritos para solos desse tipo não adubados (CASTRO *et alii*, 1981b). Não existem registros, mas é possível que a área tenha recebido adubação fosfatada antes deste experimento. Considerando-se as reações entre o fosfato aplicado e o solo, era de se esperar uma curva de extinção como as apresentadas por diversos autores (BARROW, 1974; CASTRO *et alii*, 1981a; MORÓN & PEREZ, 1981). A ação da erosão, conjuntamente com a extração das culturas, provavelmente tenham contribuído para que a diminuição do teor de P disponível fosse linear.

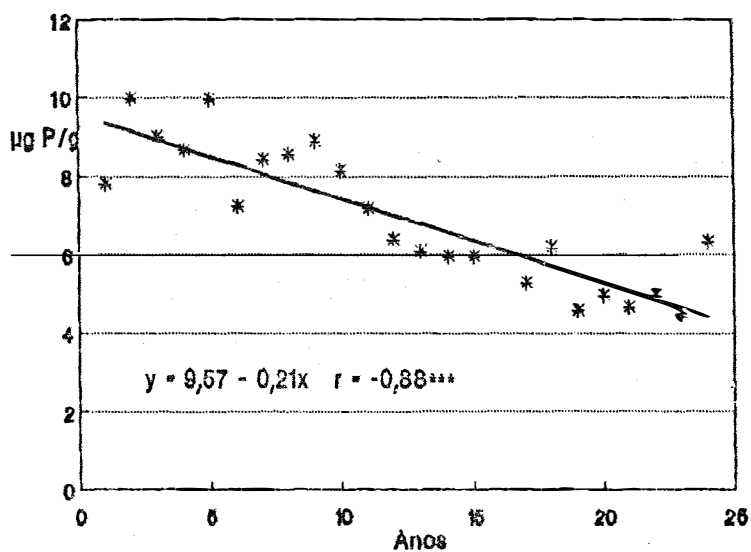


Figura 13. Evolução da concentração do P disponível-Bray I no Sistema 1 durante o período 1954-87.

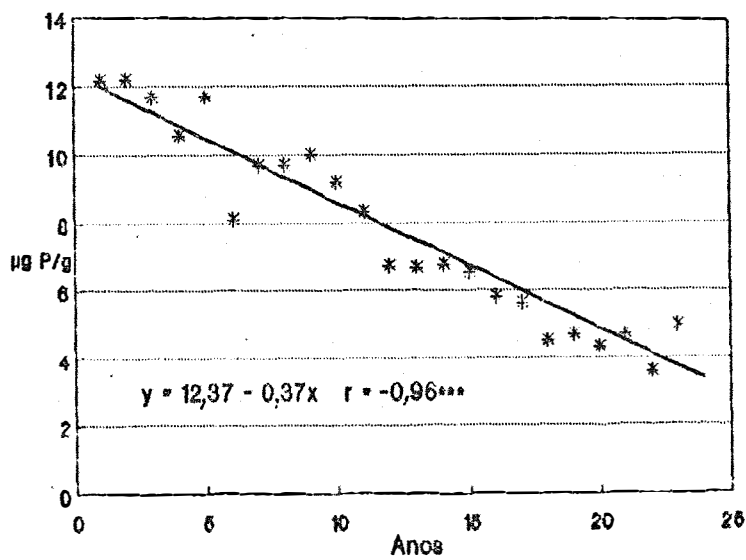


Figura 14. Evolução da concentração do P disponível-resinas no Sistema 1 durante o período 1964-87.

Na Tabela 9 foram resumidas as mudanças anuais verificadas nas distintas variáveis anteriormente discutidas, assim como seus respectivos intervalos de confiança. As porcentagens de variação no período 1964-87 foram calculadas com base nas respectivas equações de regressão.

Tabela 9. Sistema 1, coeficientes de regressões (b) e intervalos de confiança. Percentagem de variação no período 1964-87.

Variável dependente		b	Intervalo de confiança 95%		% Variação 87-64
			Min	Max	
Pt	µg P/g	-2,249***	-2,65	-1,85	-19,06
Porg	"	-1,506***	-1,88	-1,13	-25,39
Pinor	"	-0,527***	-0,81	-0,24	-9,23
PAL	"	-0,416***	-0,51	-0,32	-60,00
PFe	"	-0,431***	-0,55	-0,31	-30,56
PCa	"	-0,138***	-0,18	-0,09	-18,63
POcl	"	0,155ns	----	----	----
P Resinas	"	-0,376***	-0,42	-0,33	-71,77
P Bray I	"	-0,213***	-0,27	-0,16	-62,41
<u>(PAL+PFe).100</u>		-1,312***	-1,78	-0,85	-43,39
POcl					
<u>POcl.100</u>		0,380***	0,15	0,61	18,08
Pinor					
Corg/Porg		-0,444*	-0,85	-0,07	-6,46
Ntotal/Porg		-0,071**	-0,13	-0,01	-11,21

Em resumo, a agricultura contínua sem adubação nem conservação do solo conduz a uma significativa perda de P total, principalmente pela erosão, e de P ligado à fração orgânica, ocorrendo ainda uma acentuada perda daquelas frações inorgânicas de maior significação para a nutrição das plantas (PAI e PFe). Esses fatos indicam que o Sistema 1 - para o fósforo - não é sustentável a médio prazo.

Como foi comentado ao se tratar do balanço de P total, medidas simples de conservação do solo tornariam mais lentas as perdas pela erosão, especialmente daquelas frações mais relacionadas com o fornecimento do nutriente para as plantas como o PAI e o PFe.

4.2. Sistema 2: Agricultura contínua com adubação

O Sistema 2, constituído por agricultura contínua com adubação e sem tratamento algum de conservação do solo, teoricamente constitui uma condição de utilização que provoca menor degradação que o Sistema 1.

Na Tabela 10 encontra-se resumido o resultado do teste estatístico para verificar se a diferença entre os coeficientes angulares de uma mesma variável para os períodos 1964-73 e 1974-87 é significativa ou não. Utilizando o mesmo critério adotado no Sistema 1, nota-se que as diferenças não foram significativas, exceto para o PFe e o N total. Não se possui uma explicação para essas exceções.

Tabela 10. Teste estatístico para diferença entre coeficientes de regressões lineares no Sistema 2 . Período 1964-73 , b1 . Período 1974-87 , b2 .

Variável	Graus de liberdade		Quadrado médio		F	Probabilidade
Pt	1	20	112,69	65,49	1,72	20,4
Porg	1	20	36,34	65,71	0,65	-----
PInor	1	20	274,79	110,76	2,48	13,0
PAI	1	20	12,91	12,67	1,02	32,4
PFe	1	20	41,42	8,11	6,10	3,5
PCa	1	20	3,14	2,28	1,38	25,4
POcl	1	20	68,58	47,98	1,43	24,5
P Resinas	1	20	6,78	7,54	0,77	-----
P Bray 1	1	20	0,02	6,58	0,00	-----
N total	1	20	0,00	0,00	5,32	3,2
C org	1	20	0,00	0,01	0,05	-----

4.2.1. Balanço do fósforo na área do experimento

A figura 15 apresenta a evolução do conteúdo de P total para o período 1964-87. A regressão linear ajustada mostra uma aumento anual de $1,56 \mu\text{g P/g}$, com um intervalo de confiança de 95% de probabilidade variando entre $1,07$ e $2,06 \mu\text{g P/g}$. Considerando-se a densidade do solo igual a $1,221$ (GARCIA *et alii*, 1979) o ganho anual aparente (AP) seria de $8,73 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha/ano}$.

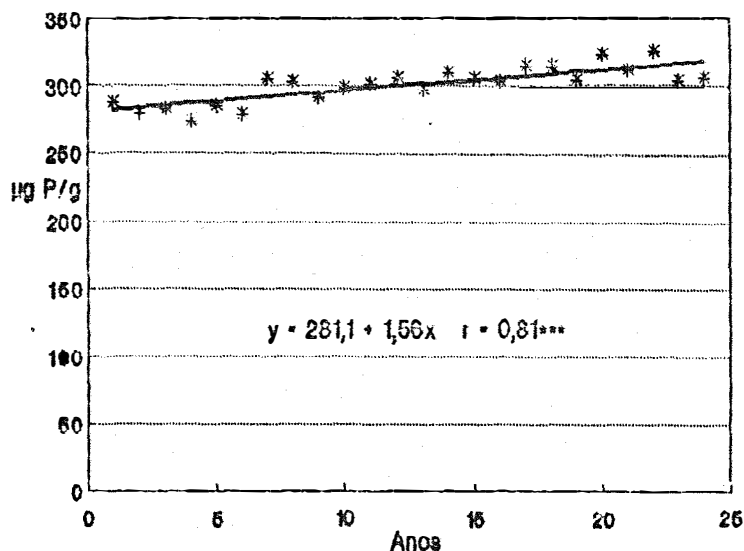


Figura 15. Evolução da concentração de fósforo total no Sistema 2 durante o período 1964-87.

A adubação nitrogenada e fosfatada aplicada ao Sistema 2 no período 1964-1987 provocou um rendimento médio em grãos 44% superior ao registrado no Sistema 1. Esse fato, conjuntamente com a maior concentração de fósforo estimada para as plantas neste Sistema, determinou uma extração pelas culturas de $13,94 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}/\text{ano}$, com um desvio padrão de 6,17. A extração de P pelas culturas neste sistema foi praticamente o dobro da estimada para o Sistema 1.

O ingresso de fósforo pela incorporação de camadas de solo inferiores à profundidade originalmente considerada (0-20 cm), foi calculado em $11,03 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}/\text{ano}$.

A análise de P total para a profundidade 20-40 cm deu um valor médio de $209,7 \text{ µg P/g}$ (Tabela 7), o qual é superior ao valor médio no Sistema 1. Assim, o movimento anual de fósforo até a camada inferior (20-40 cm) foi de $1,44 \text{ kg}$

P_2O_5 /ha/ano. Como no Sistema 1, a erosão foi a principal via de saída de P. A quantidade perdida pela erosão foi praticamente o dobro da removida pelas culturas (13,94 kg P_2O_5 /ha).

As perdas de solo estimadas para o Sistema 2 foram inferiores às do Sistema 1 (GARCIA, 1983), porém, as perdas de P total pela erosão apresentaram uma situação inversa. SHARPLEY (1980) demonstrou, para distintos solos, que a adubação fosfatada provoca acentuados aumentos na razão de enriquecimento. Provavelmente a menor perda de solo por erosão no Sistema 2, em relação ao Sistema 1, seja mais que compensada pelo aumento da razão de enriquecimento em P total.

Na Tabela 11 pode-se observar que o balanço real do fósforo para o Sistema 2 foi de $-0,86$ kg P_2O_5 /ha/ano o que indica uma condição próxima ao equilíbrio neste sistema. Conforme foi visto, o balanço real do Sistema 1 (BR = $-25,57$ kg P_2O_5 /ha/ano) foi fortemente negativo. Poderia prever-se que uma adição de 40 kg P_2O_5 /ha/ano invertesse o balanço, porém, comparativamente, os fluxos de saída do Sistema 2 apresentam claros aumentos na extração pelas colheitas e nas perdas pela erosão. Isso conduz a um balanço real perto do equilíbrio.

Tabela 11. Aproximação a um balanço de fósforo total(kg P_2O_5 /Ha/ano) no Sistema 2.

←----- 0-20 cm -----→					←----- 0-10 cm -----→	
Entradas		Saídas			Balanço	Balanço
FP	SP	CP	EP	FCI	AP	BR
39,83	11,03	13,94	26,74	1,44	+8,73	-0,86

Embora supondo-se um balanço real perto de zero, as perdas pela erosão são muito elevadas. Os comentários sobre o impacto de medidas simples de conservação do solo feitos para o Sistema 1 também são válidos para este Sistema.

4.2.2. Mudanças no estágio interno do fósforo no Sistema 2.

Na Figura 16 observa-se a evolução do P orgânico ao longo do período estudado. A queda anual do teor dessa fração entre 1964 e 1987 foi de 1,41 $\mu\text{g P/g}$, com uma variação de 0,97 a 1,85 $\mu\text{g P/g}$ para um intervalo de confiança de 95% de probabilidade. Esse decréscimo foi praticamente igual ao registrado no Sistema 1, donde se deduz que a adubação não deteve a queda do P orgânico. Esse fato coincide com o observado por HAAS *et alii* (1961) e SHARPLEY & SMITH (1983). Segundo a teoria de MCGILL & COLE (1981), a mineralização do P orgânico no Sistema 2 deveria ser menor que no Sistema 1 devido à repressão exercida sobre as fosforilases, pela presença de P disponível proveniente da adubação.

As Figuras 17 e 18 representam a evolução das relações C orgânico/P orgânico e N Total/P orgânico. Nos dois casos o coeficiente de correlação não foi significativo, indicando que essas relações se mostraram estáveis em função do tempo. Corroborando esses resultados, SHARPLEY & SMITH (1983) verificaram que as relações N total/P orgânico

da maioria dos 8 solos agrícolas estudados eram semelhantes às dos respectivos solos virgens.

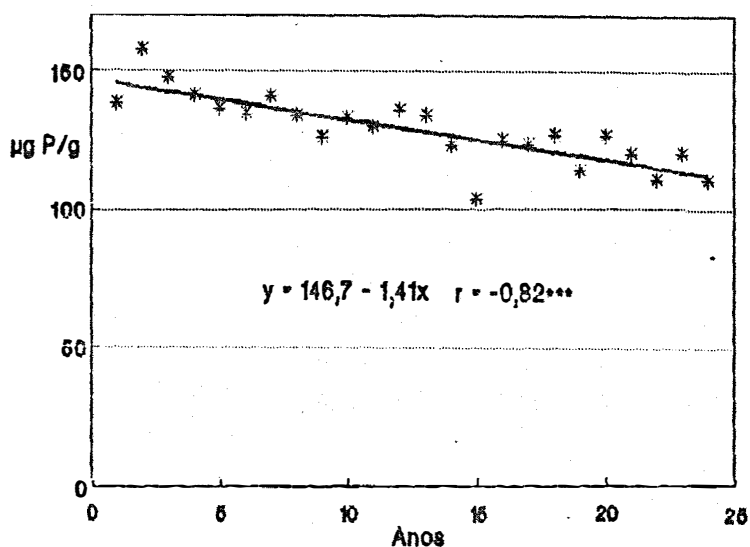


Figura 16. Evolução da concentração do fósforo orgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87.

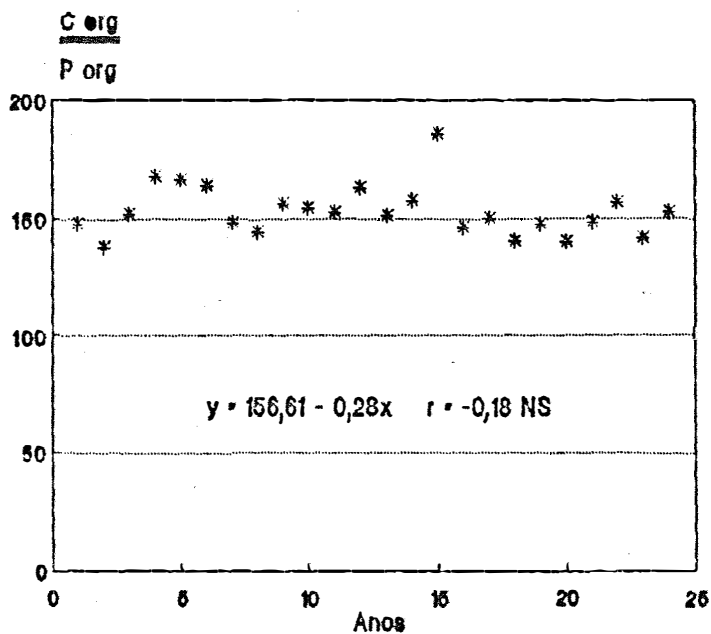


Figura 17. Evolução da relação entre conteúdos de C orgânico e P orgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87.

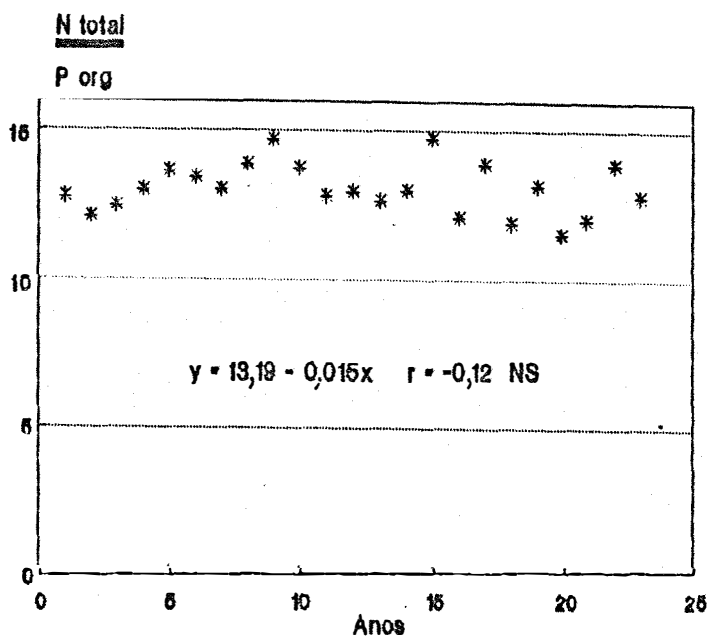


Figura 18. Evolução da relação entre conteúdos de N total e P orgânico no Sistema 2 durante o período 1964-86.

O P inorgânico - com uma tendência inversa à do Sistema 1 - apresentou acentuado aumento em sua concentração no período estudado (Figura 19). Tendências semelhantes também foram relatadas por HAAS *et alii* (1961) e SHARPLEY & SMITH (1983) para solos agrícolas adubados.

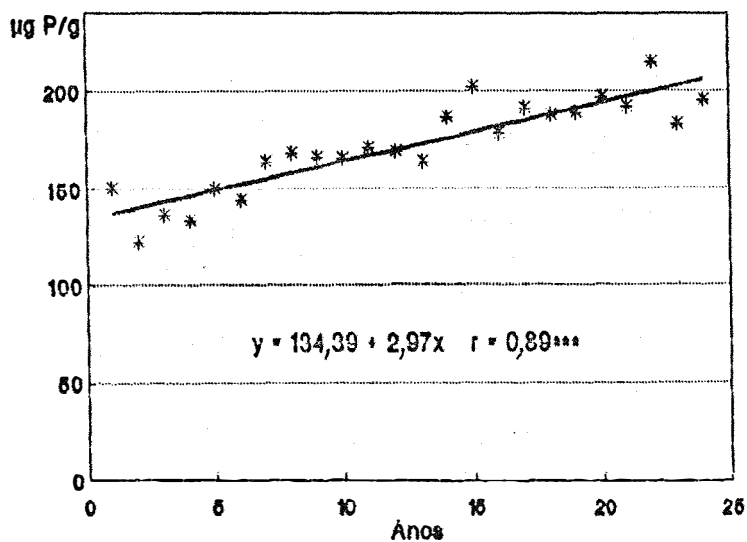


Figura 19. Evolução da concentração de fósforo inorgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87.

Com base nas regressões lineares ajustadas para P total e P inorgânico, pôde-se calcular que a porcentagem de P inorgânico em relação ao P total variou de 48,6 em 1964 para 64,6 em 1987. A tendência para o predomínio da fração inorgânica neste Sistema foi mais acentuada que no Sistema 1. HAAS *et alii* (1961) também encontraram que nas rotações agrícolas contínuas, a adição de esterco fazia com que o P inorgânico ocupasse uma porcentagem mais elevada do P total. Portanto, o aumento na concentração de P total é explicado pelo incremento do P inorgânico, o qual supera os decréscimos da fração orgânica.

As três frações inorgânicas não oclusas (PAI, PFe e PCa) aumentaram sua concentração de 1964 a 1987 (Figuras 20, 21 e 22). O incremento porcentual no conteúdo de cada uma das três frações oscilou entre 41 e 52%, sendo os fosfatos de ferro a fração que apresentou os maiores incrementos absolutos.

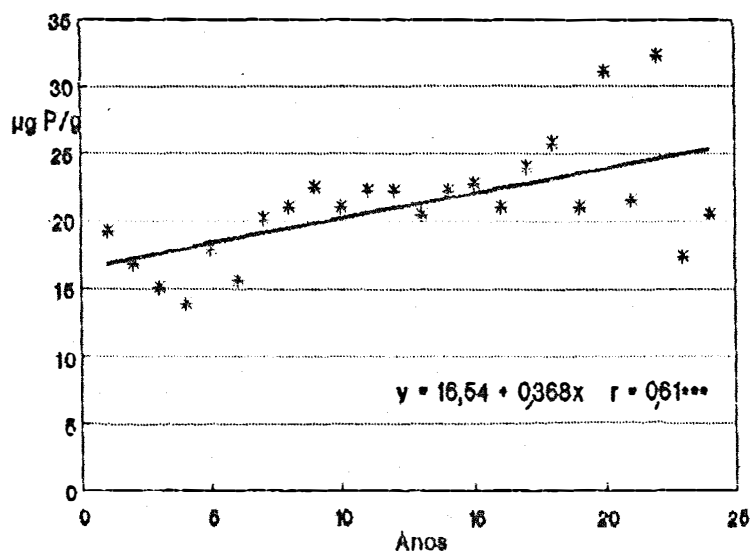


Figura 20. Evolução da concentração de fosfato de alumínio no Sistema 2 durante o período 1964-87.

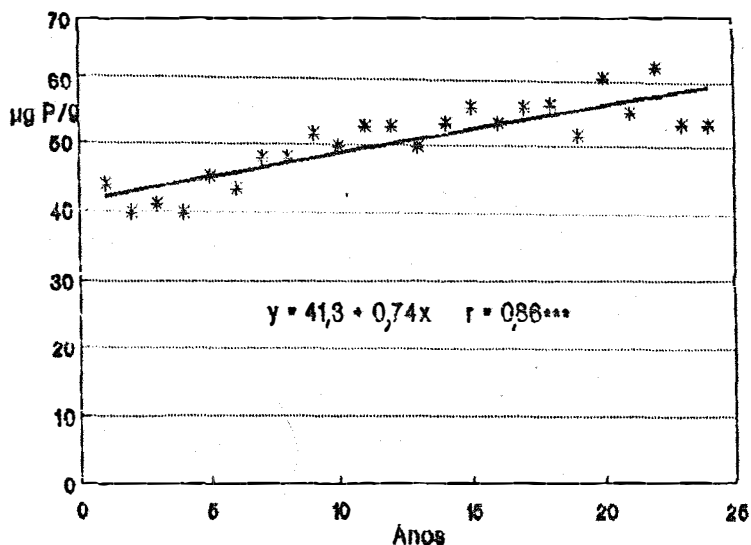


Figura 21. Evolução da concentração de fosfato de ferro no Sistema 2 durante o período 1964-87.

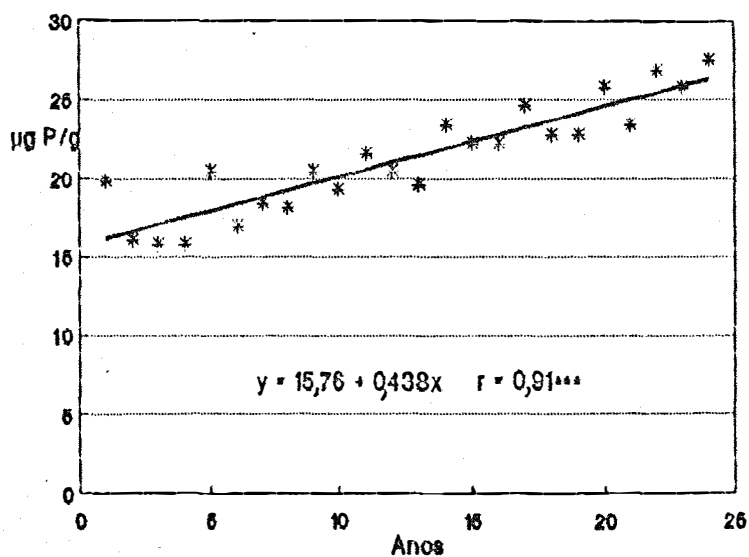


Figura 22. Evolução da concentração de fosfato de cálcio no Sistema 2 durante o período 1964-87.

MENDEZ (1975), trabalhando com um solo semelhante pelo período de um ano, determinou que dentro das frações inorgânicas não oclusas o maior incremento absoluto produzido pela adubação era para a fração PAI, em segundo lugar para PFe e em último para PCa.

O PAI seria a principal forma de retenção a curto prazo, pois logo essa fração sofreria decréscimo por dois mecanismos: a) utilização pelas plantas e b) solubilização e retenção como PFe (SHELTON & COLEMAN, 1968). Este último mecanismo explicaria o predomínio da retenção de P como PFe no período 1964-87.

A fração PCa apresentou ligeira queda no solo conduzido sob o Sistema 1, enquanto no Sistema 2 mostrou elevação relativamente acentuada, superando a formação da fração PAI. Em termos porcentuais, a PCa foi a fração que apresentou maior incremento durante o período 1964-87.

O P ocluso aumentou sua concentração a níveis de $1,42 \mu\text{g P/g}$ por ano (Figura 23), com um intervalo de confiança variando entre $1,01$ e $1,84 \mu\text{g P/g}$ a 95% de probabilidade. Esses valores mostram a grandeza da retenção de P em uma das formas mais desfavoráveis para a nutrição das plantas. O contraste entre o comportamento do P ocluso no Sistema 1 e o do Sistema 2 poderia ser comparado a um depósito no qual o fluxo de ingresso é amplamente dominante sobre o de liberação. O efeito da extração contínua e sistemática de fósforo pelas plantas durante 23 anos, em um solo com nível já baixo desse elemento como o do Sistema 1,

não produziu mudanças na sua concentração de P ocluso (Figura 10).

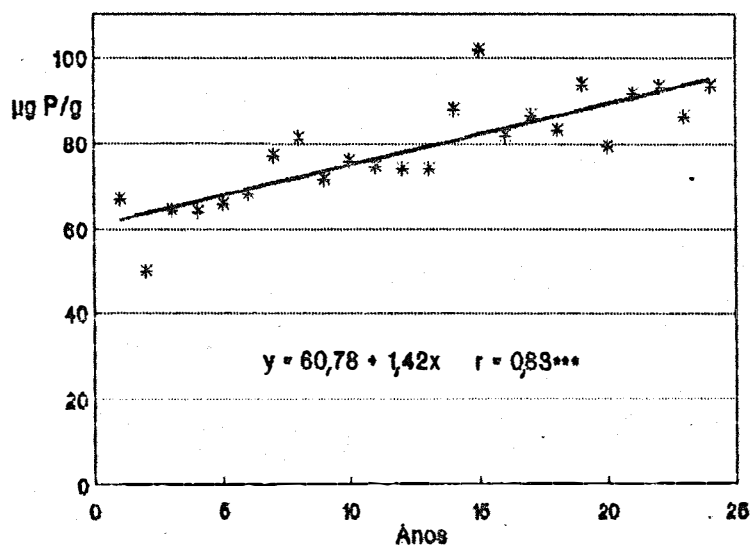


Figura 23. Evolução da concentração do fosfato ocluso no Sistema 2 durante o período 1964-87.

O fato de que uma parte do P aplicado como adubo seja convertida em P ocluso foi relatado por SHELTON & COLEMAN (1968) em um solo com alta capacidade de fixação de P. Também SHARPLEY & SMITH (1985) constataram, em dois solos agrícolas não calcários, adubados e cultivados por períodos entre 30 e 50 anos, aumentos no teor de P ocluso. Os mesmos autores registraram que a fração oclusa foi praticamente inexistente e não alterada com os anos de cultivo e adubação, para a maioria dos solos agrícolas calcários estudados.

A liberação de P a partir da fração oclusa pareceria só ser possível submetendo-se o solo a inundações que conduzam, durante determinados períodos de tempo, a con-

dição de redução (PATRICK & MAHAPATRA, 1968; SAH & MIKKELSEN, 1986).

O aumento anual na concentração de P ocluso (Figura 23) é levemente inferior à soma dos três coeficientes angulares das frações não oclusas (Figuras 20, 21 e 22). Segundo se observa nas Figuras 24 e 25, o destino do P aplicado como adubo parece distribuir-se proporcionalmente à massa de cada fração. Assim, a qualidade da fração inorgânica permaneceria relativamente estável. Os resultados de SHARPLEY & SMITH (1985) diferem: em dois solos não calcários, o cultivo e a adubação durante períodos que variavam entre 30 e 50 anos, produziam diminuições relativas da concentração de P ocluso.

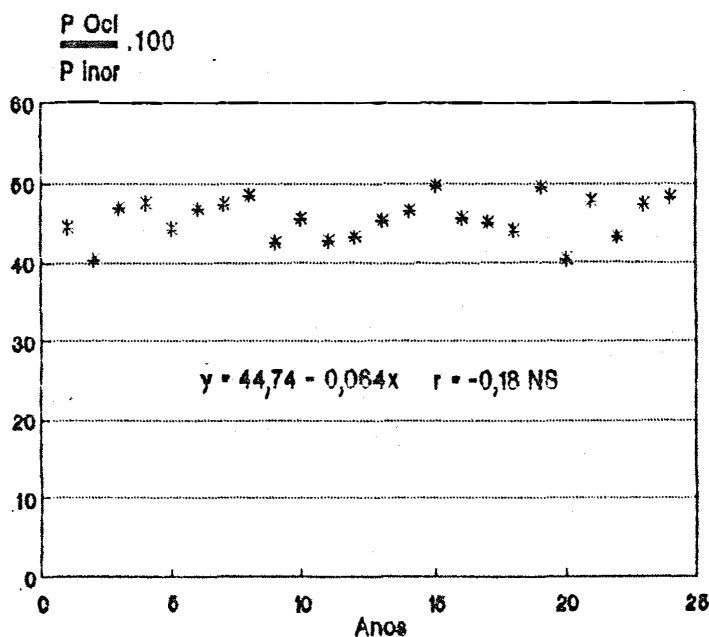


Figura 24. Evolução do conteúdo das formas oclusas dentro do P Inorgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87.

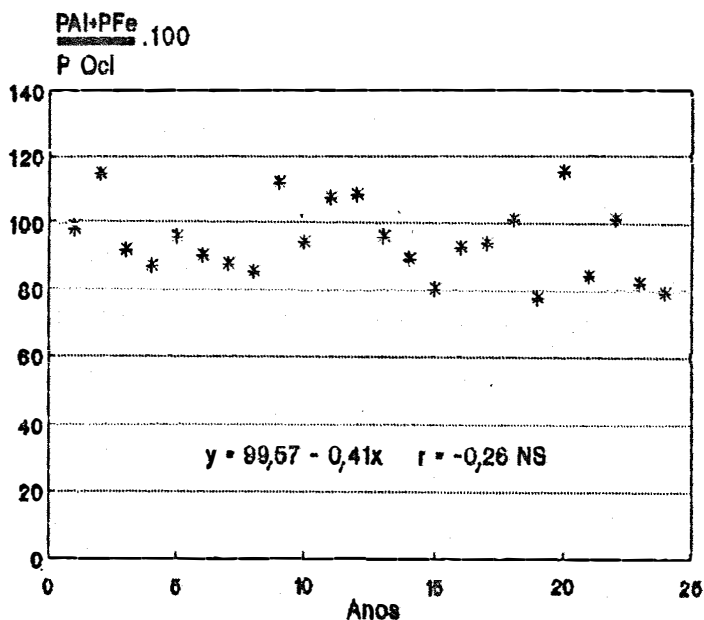


Figura 25. Evolução da relação entre frações do P inorgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87.

Como era de se esperar, a concentração de P disponível - Bray I aumentou com o tempo (Figura 26), acompanhando a tendência geral da fração inorgânica. Para o P disponível - resina (Figura 27), ao contrário, o coeficiente de correlação linear não foi significativo.

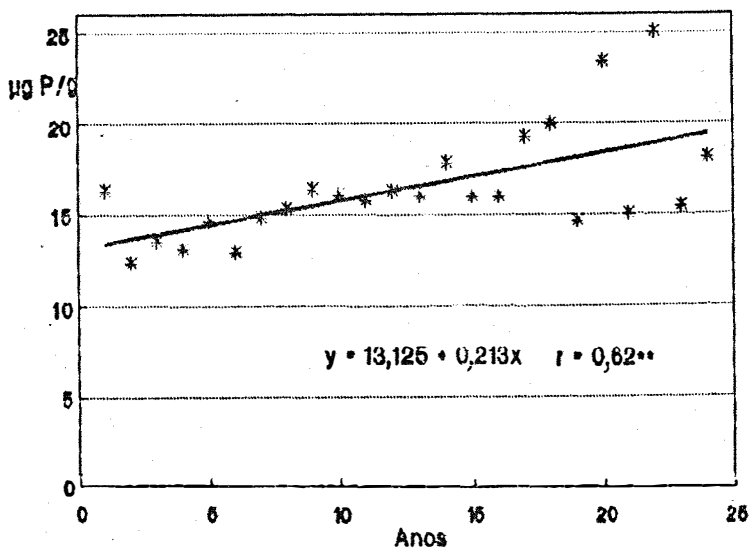


Figura 26. Evolução da concentração do P disponível-Bray I no Sistema 2 durante o período 1964-87.

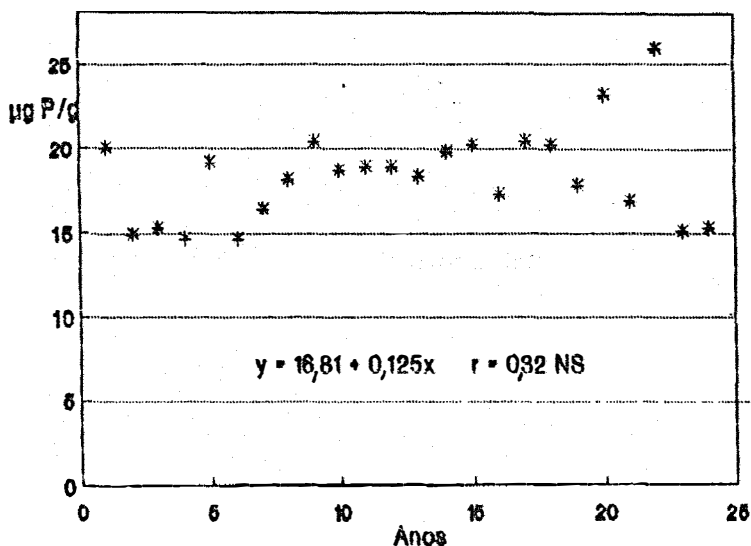


Figura 27. Evolução da concentração do P disponível-resinas no Sistema 2 durante o período 1964-87.

Para os dois métodos de análise pode-se constatar que o Sistema 2 apresentou valores relativamente aceitáveis para as calibrações apresentadas por CASTRO *et alii* (1981b) e PEREZ *et alii* (1981). Nas Figuras 26 e 27 observa-se que nos últimos 5 anos houve maior dispersão dos dados, sendo interessante salientar que a fração PAI (Figura 20) apresentou o mesmo padrão de comportamento.

A Tabela 12 resume as mudanças anuais nas variáveis anteriormente discutidas, assim como seus respectivos intervalos de confiança. Como no Sistema 1, as porcentagens de variação no período 1964-87 foram calculadas pelas respectivas equações de regressão.

Tabela 12. Sistema 2, coeficientes de regressões (b) e Intervalos de confiança. Percentagem de variação no período 1964-87.

Variável dependente		b	Intervalo de confiança 95%		% Variação 87-64
			Min	Max	
Pt	µg P/g	1,561***	1,07	2,06	12,70
Porg	"	-1,411***	-1,85	-0,97	-22,34
Pinor	"	2,973***	2,32	3,63	49,78
PAL	"	0,368***	0,15	0,58	50,04
PFe	"	0,743***	0,55	0,94	40,65
PCa	"	0,438***	0,35	0,53	62,21
POcl	"	1,423***	1,01	1,84	52,63
P Resinas	"	0,125ns	----	----	----
P Bray1	"	0,263**	0,11	0,41	45,18
$\frac{(PAI+PFe).100}{POcl}$		-0,412ns	----	----	----
$\frac{POcl.100}{Pinor}$		0,064ns	----	----	----
Corp/Porg		-0,282ns	----	----	----
Ntotal/Porg		-0,015ns	----	----	----

Resumindo, a agricultura contínua com adubação e sem conservação de solo logra aproximar-se de uma situação de equilíbrio real em termos de P total. As saídas de P por extração das culturas e erosão aumentaram em relação ao Sistema 1. A adubação aumentou as frações inorgânicas aproximadamente na mesma proporção do seu peso relativo, ficando perto de 48% na fração oclusa. A adubação não deteve a queda do teor de P orgânico.

Os níveis relativamente aceitáveis de P disponível, assim como um balanço real próximo de zero, fazem com que o Sistema 2 possa ser considerado sustentável a médio e longo prazo, com respeito ao conteúdo de fósforo do solo. A dose média de $40 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha/ano}$ provavelmente possa ser reduzida com a adoção de medidas simples de conservação do solo.

4.3. Sistema 5: Agricultura em rotação com pastagens com adubação

O Sistema 5, com a inclusão de uma fase de pastagens convencionais de gramíneas e leguminosas, determina uma utilização do solo substancialmente mais conservacionista que o Sistema 2 (GARCIA, 1983).

A Tabela 13 apresenta o resultado do teste estatístico para verificar se a diferença entre os coeficientes angulares de uma mesma variável para os períodos 1964-73 e 1974-87 é significativa ou não. Pode-se observar que não houve diferença significativa a 5% de probabilidade para nenhuma das variáveis estudadas.

Tabela 13. Teste estatístico para diferença entre coeficientes de regressões lineares no Sistema 5. Período 1964-73, b1. Período 1974-87, b2.

Variável	Graus de liberdade		Quadrado medio		F	Probabilidade
Pt	1	18	13,17	202,45	0,07	-----
Porg	1	18	81,61	163,40	0,50	-----
Plinor	1	18	161,96	181,32	0,89	-----
PAI	1	18	16,64	12,72	1,23	28,2
PFe	1	18	0,00	16,27	0,00	-----
PCa	1	18	0,84	2,55	0,33	-----
POcl	1	18	309,07	166,05	1,98	-----
P Realnae	1	18	0,33	11,78	0,03	-----
P Bray 1	1	18	7,65	8,00	0,96	-----
N total	1	18	0,00	0,00	1,71	20,7
C org	1	18	0,00	0,01	0,30	-----

4.3.1. Balanço do fósforo na área do experimento

Na figura 28 constata-se um aumento anual de 2,83 $\mu\text{g P/g}$ no P total. O intervalo de confiança a 95% de probabilidade para o aumento anual em P total variou entre um mínimo de 1,94 $\mu\text{g P/g}$ e um máximo de 3,71 $\mu\text{g P/g}$. O Sistema 5, apesar de contar com uma adubação fosfatada anual levemente superior à do Sistema 2, apresentou um incremento anual na concentração de P total apreciavelmente superior ao do Sistema 2.

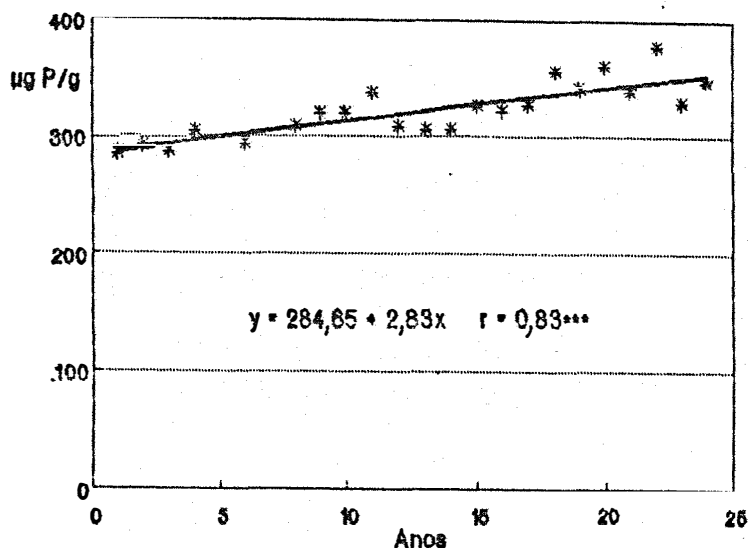


Figura 28. Evolução da concentração do fósforo total no Sistema 5 durante o período 1964-87.

Tamando por base a densidade do solo relatada por GARCIA *et alii* (1979), o balanço anual aparente (AP) seria + 15,05 kg P_2O_5 /ha/ano.

A extração de P pelas culturas apresentou um valor médio anual de 9,45 kg P_2O_5 /ha/ano, inferior, portanto, ao registrado no Sistema 2. Deve-se recordar que aproximadamente 50% do tempo de cultivo no Sistema 5 (período 1964-87) foi dedicado à produção de pastagens, sendo a forragem produzida devolvida ao solo na maioria das vezes.

O ingresso de P na profundidade 0-20 cm pela incorporação de camadas inferiores de solo foi estimada em 4,37 kg P_2O_5 /ha/ano.

De acordo com o teor médio de P total encontrado na profundidade 20-40 cm (Tabela 7), o movimento anual de P até a camada inferior foi calculado em 4,18 kg P_2O_5 /ha/ano.

Assim, utilizando a equação (1), as perdas pela erosão foram calculadas em $17,50 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}/\text{ano}$.

A Tabela 14 resume o balanço do P no solo para o Sistema 5.

Tabela 14. Aproximação a um balanço de fósforo total (kg P₂O₅/Ha/ano) no Sistema 5.

0-20 cm					0-40 cm	
Entradas		Saídas			Balanço	Balanço
FP	SP	CP	EP	FCI	AP	BR
41,81	4,37	9,45	17,5	4,18	+15,05	+14,86

Segundo estimativas de GARCIA (1983), o Sistema 5 tem uma perda anual de solo ($9,39 \text{ t}/\text{ha}/\text{ano}$), substancialmente inferior à do Sistema 2 ($23,72 \text{ t}/\text{ha}/\text{ano}$). Neste estudo, as perdas de P por erosão no Sistema 5 ($17,50 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}/\text{ano}$) também foram inferiores às do Sistema 2 ($26,74 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}/\text{ano}$), porém, em grau menos acentuado.

É de se esperar que a razão de enriquecimento de P no Sistema 5 durante período sob pastagens readubadas em cobertura tenha valores mais elevados que no Sistema 2 no mesmo período. WILLIAMS (1974) advertiu sobre a acumulação de P nos primeiros centímetros de solo nas pastagens adubadas em cobertura e o perigo de perdas desse elemento por erosão.

Um denominador comum observado nos três sistemas estudados é o de que a erosão foi a principal via de saída de P do ecossistema.

A saída de P em produtos agrícolas foi baixa pela não extração de produtos animais na etapa de pastagem. A soma da quantidade de P extraída através de produtos animais com a extraída pelas culturas provavelmente seria uma cifra próxima à das perdas por erosão. Por sua vez, a inclusão de perdas de P pelos excrementos animais fora da área produtiva, como consideraram MIDDLETON & SMITH (1978) e CORNFORTH & SINCLAIR (1982), somada à extração em grãos e produtos animais, seguramente superaria a extração em grãos do Sistema 2.

Apesar de contar com um nível de adubação similar ao do Sistema 2, o balanço real do Sistema 5 (BR = +14,86 kg P_2O_5 /ha/ano) foi positivo e definitivamente superior ao do Sistema 2. A principal diferença é que neste Sistema 5 houve menor extração do P pelas culturas. A inclusão de medidas simples de conservação do solo determinariam menores perdas de P pela erosão. Provavelmente essa diminuição seria contrabalançada pela extração em produtos animais, determinando cifras de balanço real próximas às relatadas na Tabela 14. Portanto, com base no balanço real encontrado, seria possível reduzir as doses anuais adicionadas como adubo fosfatado.

Finalizado o último balanço de P total, caberia uma reflexão. Entende-se que o balanço de P é complexo.

Não foi possível medir diretamente determinados parâmetros, os quais necessitaram ser estimados. Portanto, admite-se a possibilidade de erro em alguma das estimativas; porém, devido aos fortes contrastes observados entre os sistemas, esses erros deveriam ser muito acentuados para alterar sensivelmente os balanços.

4.3.2. Mudanças no estágio interno do fósforo no Sistema 5

A Figura 29 representa a evolução do P orgânico no Sistema 5 ao longo do período de 1964 a 1987, podendo-se observar que a correlação não foi significativa. Isso mostra que, enquanto nos Sistemas 1 e 2 o teor de P orgânico apresentou clara diminuição anual, no Sistema 5, devido à inclusão de pastagens, essa fração manteve-se estável durante mais de 20 anos. Por outro lado, diversos autores (CRUSSELL, 1960b); JACKMAN, 1964; SIMPSON *et alii*, 1974; BATTEN *et alii*, 1979; LEWIS *et alii*, 1987a; CONDRON & GOH, 1989) têm relatado incrementos (imobilização líquida) no nível de P orgânico em solos sob pastagens. Talvez a presença de pastagens durante um período de tempo maior na área estudada e a adoção de medidas de conservação do solo resultassem uma imobilização líquida. Assim, o nível de equilíbrio para o P orgânico seria superior ao apresentado na Figura 28.

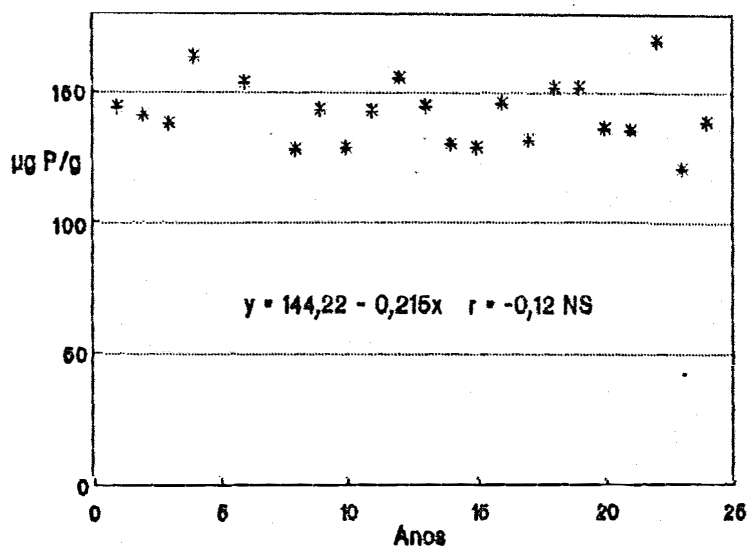


Figura 29. Evolução da concentração do fósforo orgânico no Sistema 5 durante o período 1964-87.

As Figuras 30 e 31 mostram a evolução das relações C orgânico/P orgânico e N Total/P orgânico. Como no Sistema 2, essas relações não evidenciaram tendência significativa para variar durante o período estudado.

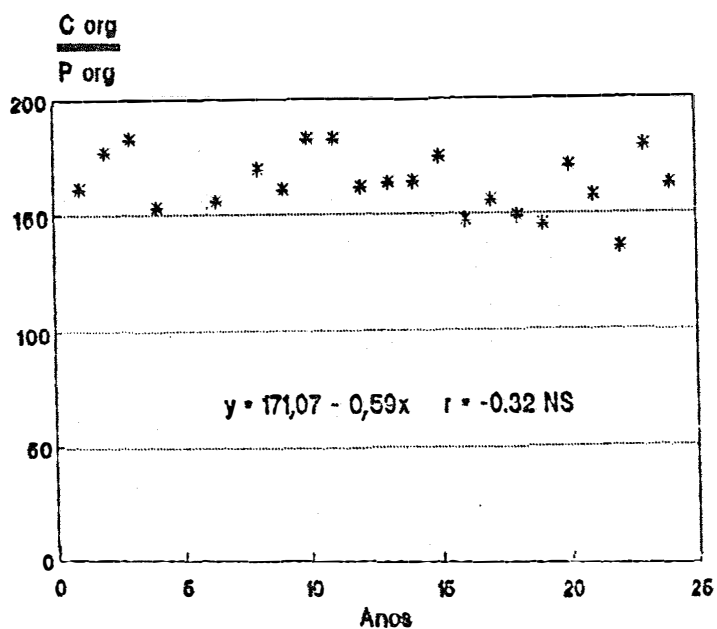


Figura 30. Evolução da relação entre conteúdos de C orgânico e P orgânico no Sistema 2 durante o período 1964-87.

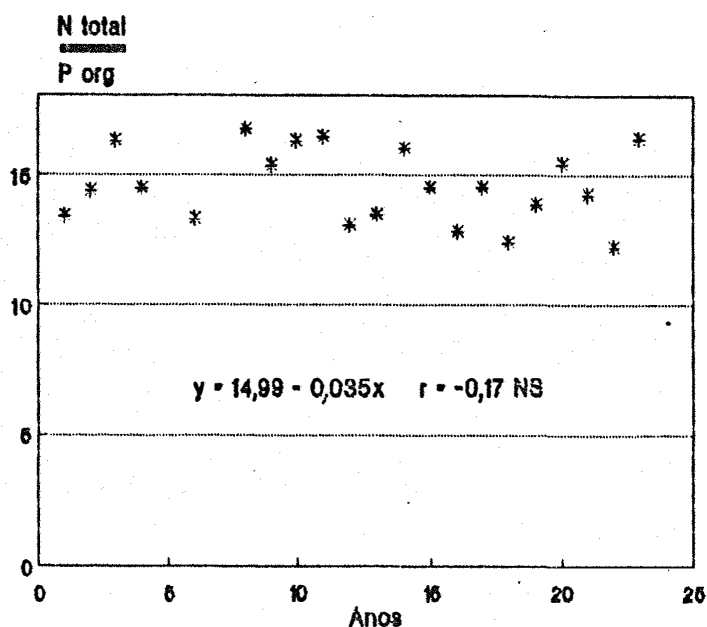


Figura 31. Evolução da relação entre conteúdos de N total e P orgânico no Sistema 5 durante o período 1964-86.

O P inorgânico (Figura 32) apresentou aumentos anuais muito semelhantes aos registrados no Sistema 2. Como o teor de P orgânico (Figura 29) não mostrou tendência de variação no período, a evolução do P total (Figura 28) fica explicada quase em sua totalidade pela evolução do P inorgânico. Por sua vez, o P inorgânico pode ser considerado como o destino do adubo fosfatado que fica no solo.

Os três Sistemas estudados apresentaram tendências ao predomínio da fração inorgânica. No Sistema 5, segundo a equação de regressão, 49,82% do P total estava na forma inorgânica em 1964, aumentando para 60,46% em 1987. Por outro lado, nesse mesmo ano a citada proporção era de 54% no Sistema 1 e de 64,6% no Sistema 2, o que coloca o Sistema 5 em posição intermediária ao 1 e ao 2.

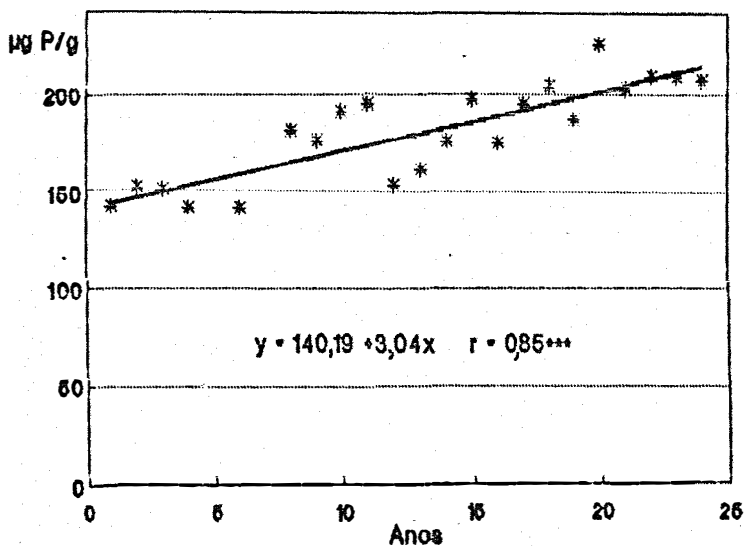


Figura 32. Evolução da concentração de fósforo inorgânico no Sistema 5 durante o período 1964-87.

As frações inorgânicas não oclusas (Figuras 33, 34 e 35), como no Sistema 2, tiveram a concentração aumentada durante os 23 anos estudados. Os coeficientes angulares das frações PFe e PCa deste Sistema 5 foram inferiores aos registrados no Sistema 2 (Figuras 21 e 22). Em compensação, o P ocluso (Figura 36) apresentou um aumento anual de $1,85 \mu\text{g P/g}$ com um intervalo de confiança de 95% de probabilidade variando entre $1,03$ e $2,67 \mu\text{g P/g}$. Assim, o aumento anual de P ocluso no Sistema 5 é superior ao registrado no Sistema 2 ($1,42 \mu\text{g P/g}$). Caberia mencionar que, do total de P acumulado na fração inorgânica, segundo os respectivos coeficientes angulares 61% ficaram na forma de P ocluso.

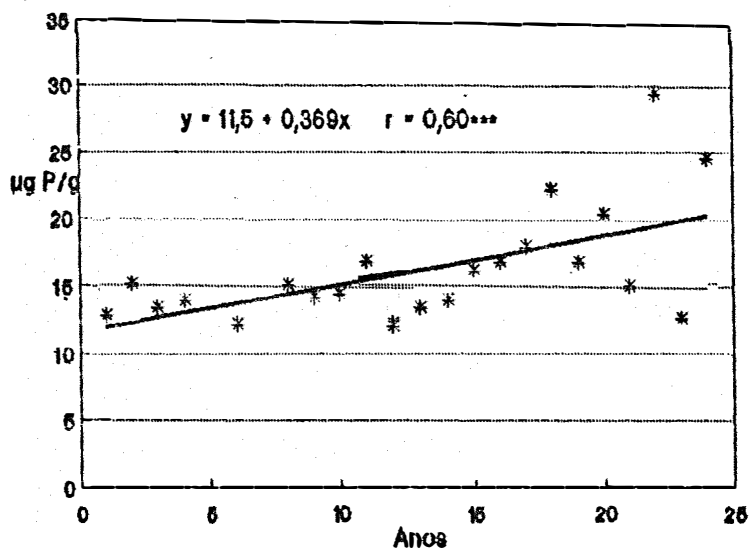


Figura 33. Evolução da concentração do fosfato de alumínio no Sistema 5 durante o período 1964-87.

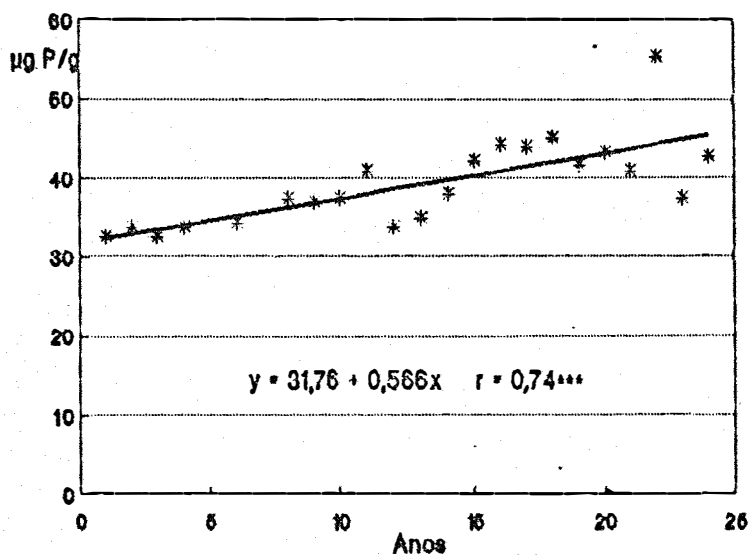


Figura 34. Evolução da concentração do fosfato de ferro no Sistema 5 durante o período 1964-87.

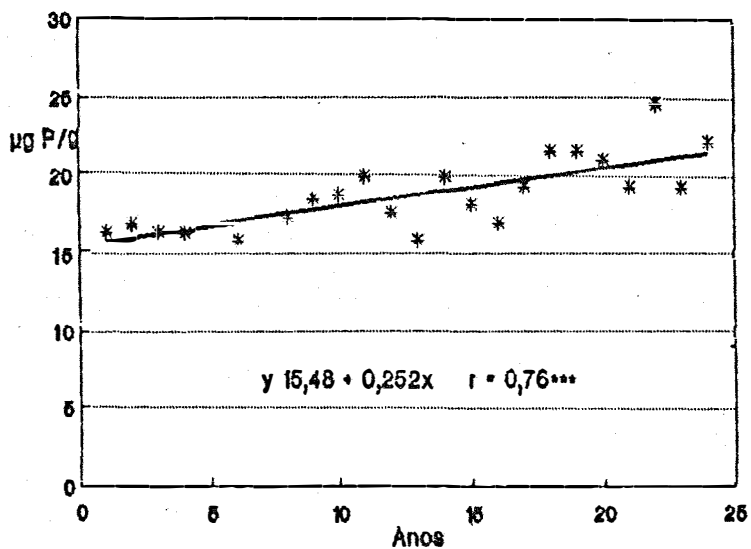


Figura 35. Evolução da concentração de fosfato de cálcio no Sistema 5 durante o período 1964-87.

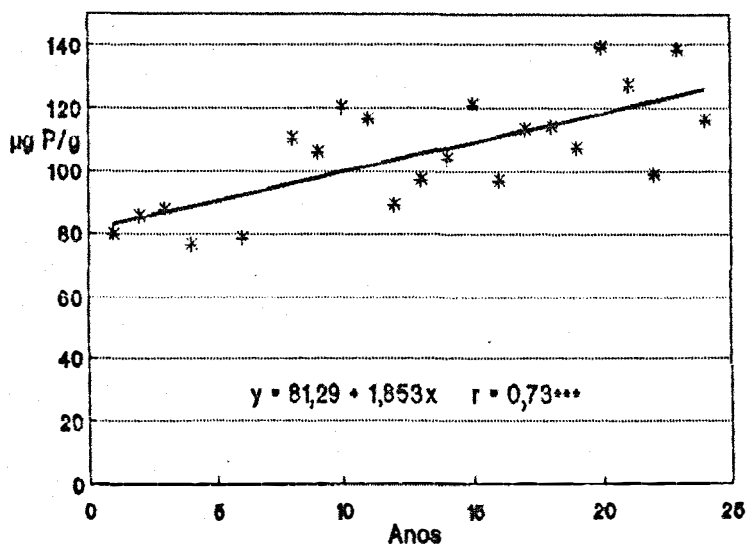


Figura 36. Evolução da concentração do fosfato ocluso no Sistema 5 durante o período 1964-87.

A proporção de P ocluso na fração inorgânica do Sistema 5, assim como a proporção de PAI + PFe em relação à fração P ocluso, não apresentaram variação significativa com o tempo (Figuras 37 e 38). Assim, a qualidade da fração inorgânica permaneceu relativamente estável com o tempo. Comparando com a distribuição interna da fração inorgânica no Sistema 2 (Figuras 24 e 25) pode-se observar que o Sistema 5 estabilizou-se em valores que podem ser considerados mais desfavoráveis para a nutrição das plantas. Não foi encontrada explicação para essa tendência na bibliografia consultada.

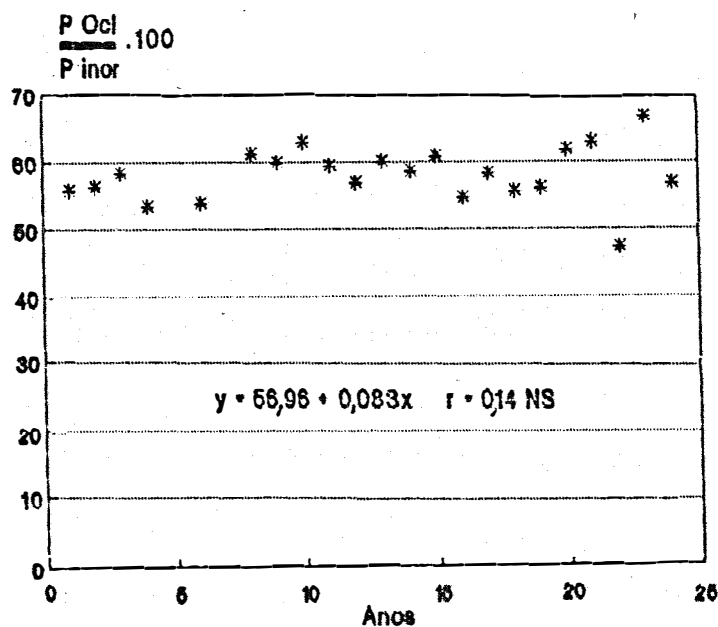


Figura 37. Evolução do conteúdo das formas oclusas dentro do P Inorgânico no Sistema 5 durante o período 1964-87.

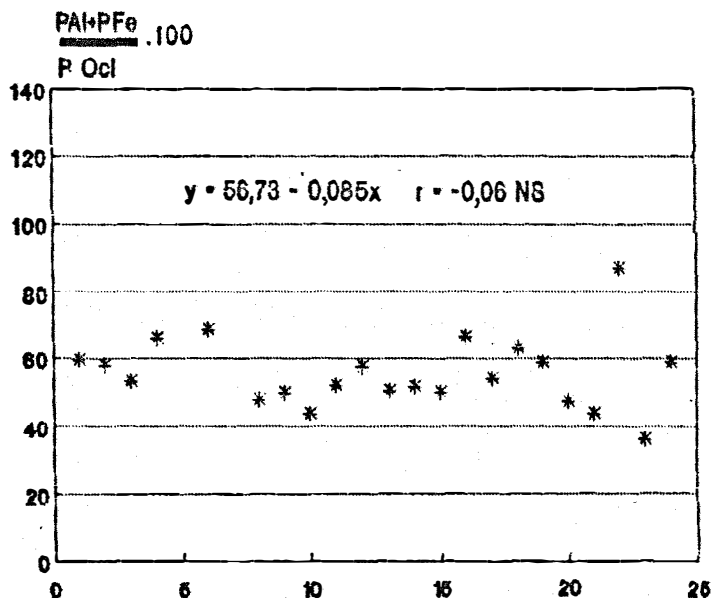


Figura 38. Evolução da relação entre frações do P Inorgânico no Sistema 5 durante o período 1964-87.

O P disponível - Bray I (Figura 39), apresentou uma evolução crescente, e para a maioria dos anos os teores foram inferiores aos registrados no Sistema 2 (Figura 26). Os teores de P disponível - resina (Figura 40), apresentaram alta dispersão, resultando um coeficiente de regressão não significativo.

Os menores valores de P disponível - Bray I no Sistema 5 em relação ao Sistema 2, são concordantes com as tendências observadas nas frações inorgânicas anteriormente discutidas. Em termos gerais, pode-se dizer que os valores de P disponível durante a maior parte do período 1964-1987 estavam acima do nível considerado como deficiente (CASTRO *et alii*, 1981b; PEREZ *et alii*, 1981).

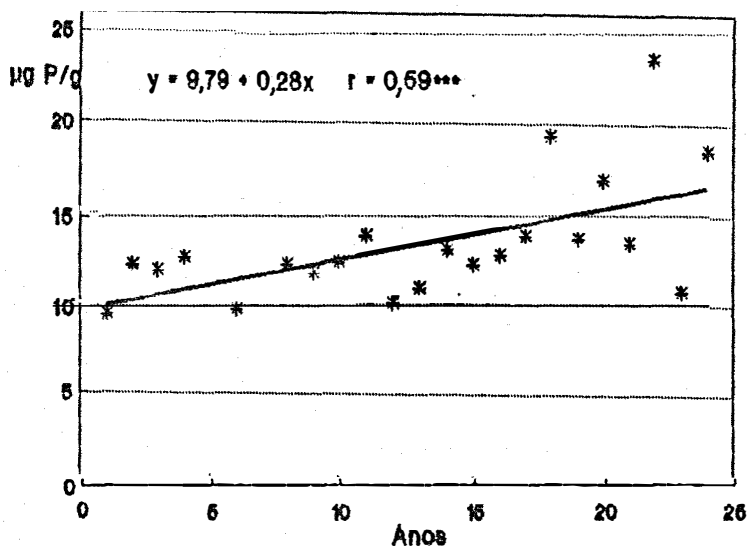


Figura 39. Evolução da concentração do P disponível-Bray I no Sistema 5 durante o período 1964-87.

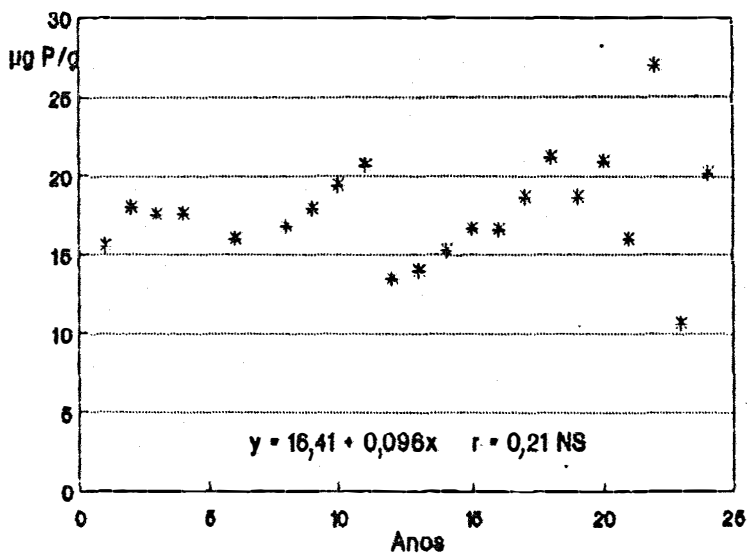


Figura 40. Evolução da concentração de P disponível-resinas no Sistema 5 durante o período 1964-87.

A consideração do P disponível (Bray I ou resinas) como indicador que sintetiza ou resume a evolução dos sistemas deve ser encarado de uma forma relativa, pois a fração de fósforo orgânico também pode contribuir para a disponibilidade desse elemento, principalmente em solos de pastagem (BOWMAN & COLE, 1978b). Neste sentido, a modificação do método de Olsen, desenvolvida por BOWMAN & COLE (1978a), permite medir compostos lábeis e P orgânico (BOWMAN & COLE, 1978b).

Os coeficientes angulares, os intervalos de confiança e as porcentagens de variação no período 1964-87, para as diferentes variáveis do Sistema 5, encontram-se agrupados na Tabela 15.

Para SMECK (1985), na fase final do desenvolvimento do solo o P solúvel é submetido a uma concorrência entre passar para formas orgânicas ou transformar-se em formas inorgânicas oclusas. Se o sistema de rotação de culturas apresentasse um período de pastagens mais longo e produtivo que o desenvolvido no Sistema 5, poderia mostrar uma concorrência da via orgânica pelo fósforo solúvel. O incremento do P orgânico (imobilização líquida) poderia não ser desfavorável para as plantas, na medida que uma parte fica na fração orgânica lábil (NaHCO_3), com relataram CONDRON & GOH (1989). Fica a dúvida se o aumento do período com pastagem também não causaria um aumento na proporção de P ocluso, o que seria negativo sob o ponto de vista das plantas.

Tabela 15. Sistema 5 , coeficientes de regressões (b) e intervalos de confiança. Percentagem de variação no período 1964-87.

Variável dependente		b	Intervalo de confiança 95%		% Variação 87-84
			Min	Max	
Pt	µg P/g	2,825***	1,94	3,71	22,61
Porg	"	-0,215ns	----	----	----
P _{inor}	"	3,040***	2,17	3,91	48,50
PAL	"	0,369***	0,14	0,60	71,55
PFe	"	0,566***	0,33	0,80	40,29
PCa	"	0,252***	0,15	0,49	36,85
POcl	"	1,853***	1,03	2,67	51,25
P Resinas	"	-0,096ns	----	----	----
P Brayl	"	0,279***	0,10	0,46	63,75
<u>(PAI+PFe).100</u>		-0,085ns	----	----	----
POcl					
<u>POcl.100</u>		-0,083ns	----	----	----
P _{inor}					
Corg/Porg		-0,594ns	----	----	----
Ntotal/Porg		-0,035ns	----	----	----

Resumindo, a agricultura em rotação com pastagens, ambas adubadas, apresenta um balanço real de P total claramente positivo. Mantêm-se elevadas as perdas de P pela erosão mas são de menor magnitude que as calculadas no Sistema 2. A extração de P em produtos foi menor que a do Sistema 2, mas se for considerada a extração em produtos animais, seria igual ou superior à desse sistema. A inclusão de pastagens evita a queda no conteúdo do P orgânico. A aduba-

ção incrementa as frações inorgânicas, sendo o principal destino o P ocluso. O P disponível apresentou valores médios. O controle da erosão permitiria diminuir a dose anual média de P adicionado, estando isto limitado pelo destino desfavorável da maior parte do P inorgânico acumulado.

4.4. Relação Entre o P Disponível e Outras Frações Segundo Análises de correlação e regressão Múltipla

A Tabela 16 apresenta a matriz de correlação linear entre as diferentes frações do fósforo do solo, obtidas com os dados dos Sistemas 1, 2 e 5 em conjunto. O P disponível - Bray I, correlacionou-se mais fortemente com as frações PAI e PFe, seguindo-se a fração PCa. Tendências semelhantes foram registradas para o P disponível - resina.

O P ocluso apresentou correlação positiva com os dois métodos de avaliação do P disponível porque seu efeito real foi mascarado pela sua associação positiva com as frações não oclusas. O verdadeiro caráter do P ocluso é observado quando o P disponível correlaciona-se negativa e significativamente com a porcentagem de P ocluso dentro do P inorgânico (tabela 16 e Figuras 41 e 42). Conceitos similares sobre o caráter do P ocluso podem ser deduzidos da correlação positiva entre o P disponível e a relação $\frac{PAI + PFe}{P\ ocl.} \cdot 100$ (Tabela 16).

Tabela 16. Matriz de correlação linear entre as diferentes frações do fósforo do solo. Análise conjunta dos Sistemas 1, 2 e 5. Período 1964-87.

	Porg	PInor	PAI	PFe	PCa	POcl	$\frac{(PAI+PFe).100}{POcl}$	$\frac{POcl.100}{PInor}$	PBrayl
PResinas	0,52	0,80	0,87	0,86	0,80	0,41	0,59	-0,57	0,93
Porg		0,20	0,26	0,21	0,13	0,09	0,26	-0,28	0,35
PInor			0,74	0,78	0,85	0,79	0,23	-0,22	0,81
PAI				0,92	0,86	0,23	0,74	-0,71	0,95
PFe					0,91	0,25	0,76	-0,75	0,94
PCa						0,41	0,56	-0,57	0,90
POcl							-0,39	0,41	0,33
$\frac{(PAI+PFe).100}{POcl}$								-0,98	0,69
$\frac{POcl.100}{PInor}$									-0,68
n = 69						r >	0,20	significancia	10%
						r >	0,24	significancia	5%
						r >	0,31	significancia	1%

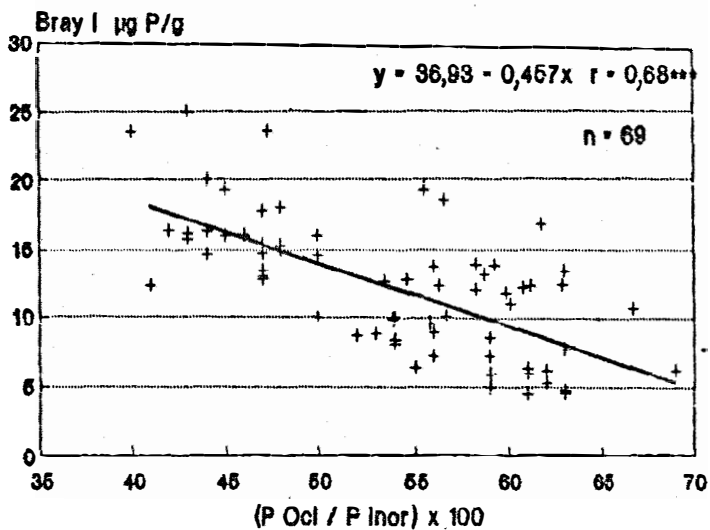


Figura 41. Relação entre a qualidade do P inorgânico e o P disponível-Bray I nos tres Sistemas durante o periodo 1964-87.

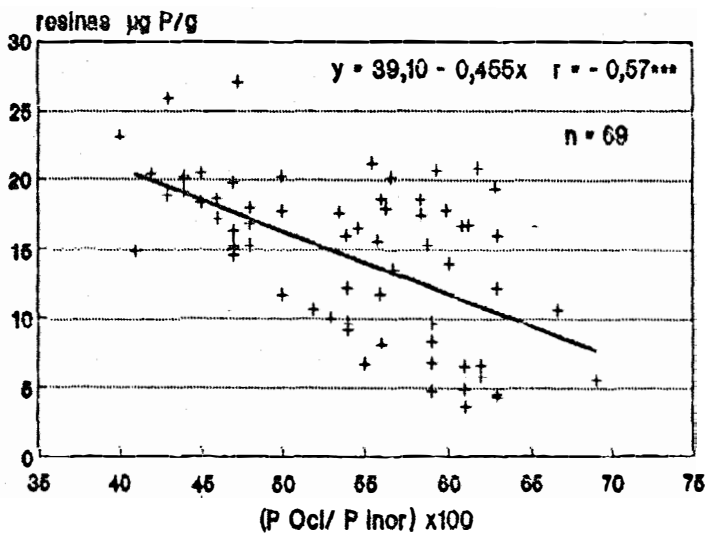


Figura 42. Relação entre a qualidade do P inorgânico e o P disponível-resinas nos tres Sistemas durante o periodo 1964-87

O P orgânico apresentou uma correlação baixa mas significativa com o P-resina, e ainda mais baixa com o P disponível - Bray I. É provável que a fração P orgânico lábil, se tivesse sido determinada (BOWMAN & COLE, 1978a) apresentasse uma correlação mais elevada com o P disponível Bray I e P-resina.

SHARPLEY (1985b) também encontrou correlação entre a P orgânico e o P disponível - Bray I, mas em solos não adubados.

Em síntese, para um período de 23 anos, e sob diferentes sistemas de manejo, o PAI foi a fração individual que melhor explicou a variação do P disponível, seja extraído com resina ou por Bray I. Nas figuras 43 e 44 observam-se essas associações. Estes resultados são concordantes com os relatados por MENDEZ (1975) em um solo similar. A fração PAI tem sido considerada como a mais importante para a nutrição das plantas em solos ácidos ou próximos da neutralidade (KAMPRATH & WATSON, 1980).

A Tabela 17 apresenta as regressões múltiplas para o P disponível pelos dois métodos. É interessante salientar que em ambos os casos a variável P orgânico ingressa na correlação múltipla. No caso da resina, ingressa em segundo lugar, contribuindo com um aumento de 9,3% na variação já explicada pelo PAI. Por sua vez, o P disponível - Bray I, parece estar mais estreitamente associado com a variação das frações inorgânicas, dado que a inclusão das duas primeiras variáveis (PAI e PFe) chega a explicar 93% da variação.

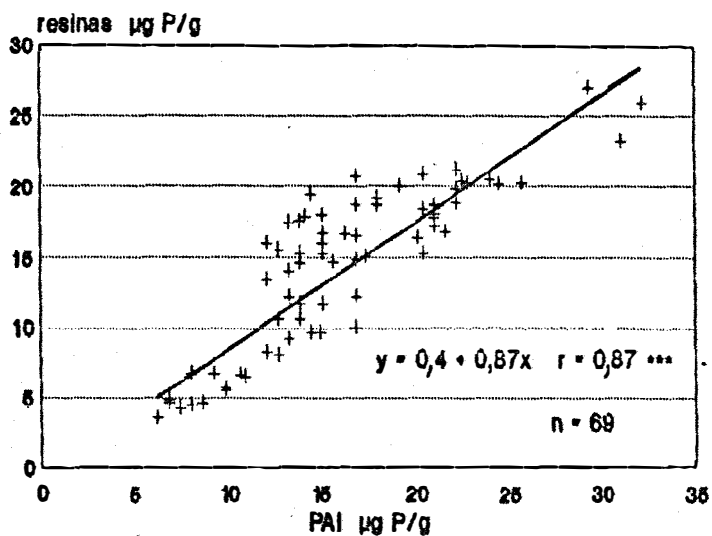


Figura 43. Relação entre o PAI e o P disponível-resinas nos tres Sistemas durante o período 1964-87 .

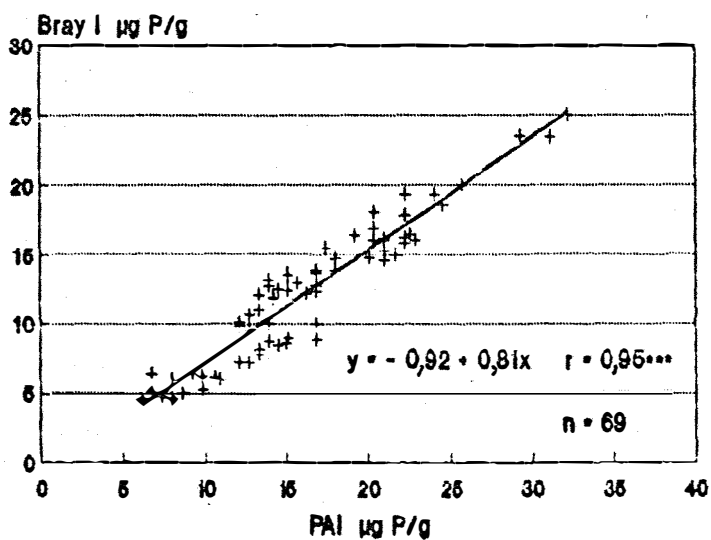


Figura 44. Relação entre o PAI e o P disponível-Bray I nos tres Sistemas durante o período 1964-87 .

Tabela 17. Correlação e regressões múltiplas. Análise conjunta dos Sistemas 1, 2 e 5. Período 1964-87.

$y_1 = \text{PResinas } \mu\text{g P/g}$	$x_3 = \text{PAI } \mu\text{g P/g}$	$x_7 = \frac{(\text{PAI} + \text{PFe}) \cdot 100}{\text{POcl}}$
$y_2 = \text{PBray 1 } \mu\text{g P/g}$	$x_4 = \text{PFe } \mu\text{g P/g}$	
$x_1 = \text{Porg } \mu\text{g P/g}$	$x_5 = \text{PCa } \mu\text{g P/g}$	$x_8 = \frac{\text{POcl} \cdot 100}{\text{Pinor}}$
$x_2 = \text{Pinor } \mu\text{g P/g}$	$x_6 = \text{POcl } \mu\text{g P/g}$	

<u>Varíavel</u>	<u>Equação</u>	<u>r²</u>
PAI	$y_1 = 0,4 + 0,87x_3$	0,754***
Porg	$y_1 = -13,688 + 0,119x_1 + 0,787x_3$	0,847***
Pinor	$y_1 = -19,555 + 0,119x_1 + 0,064x_2 + 0,527x_3$	0,803***
PAI	$y_2 = -0,92 + 0,811x_3$	0,901***
PFe	$y_2 = -2,925 + 0,48x_3 + 0,188x_4$	0,929***
Porg	$y_2 = -7,762 + 0,04x_1 + 0,434x_3 + 0,199x_4$	0,943***
PCa	$y_2 = -10,812 + 0,047x_1 + 0,387x_3 + 0,113x_4 + 0,344x_5$	0,954***

4.5. Efeitos dos Sistemas na Capacidade do Solo em Reter Fósforo

As Figuras 45, 46 e 47 apresentam as isotermas de adsorção em escala semi-logarítmica para os Sistemas 1, 2 e 5 respectivamente. As figuras mostram as tendências gerais esperadas. Em uma observação simples pode-se ver que as doses mais baixas resultam maior concentração de P na solução do solo nos Sistemas 2 e 5 que no Sistema 1.

Na Tabela 18 observa-se que para manter uma mesma concentração de P na solução do solo, especialmente nas concentrações mais baixas, o Sistema 1 requer mais P na fase sólida que os Sistemas 2 e 5. Verifica-se que o Sistema 1 requer 48% mais P retido na fase sólida para manter 0,1 μg P/ml em solução do que a média dos demais sistemas.

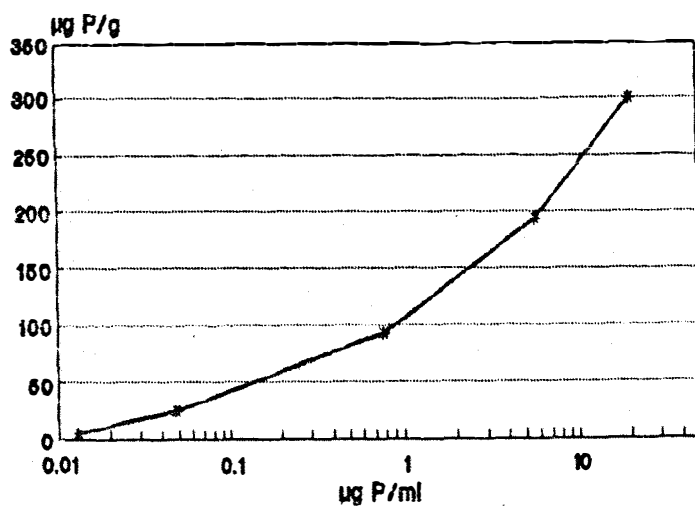


Figura 45. Isoterma de adsorção de P no Sistema 1. Média de blocos e anos 1986-87.

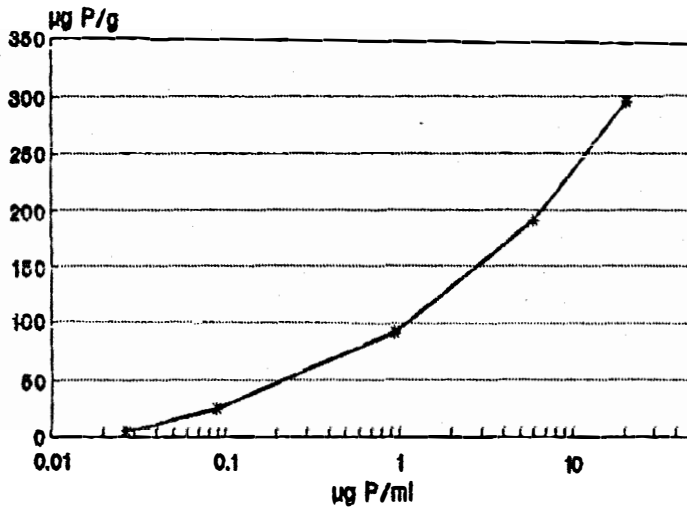


Figura 46. Isoterma de adsorção de P no Sistema 2. Media de blocos e anos 1986-87.

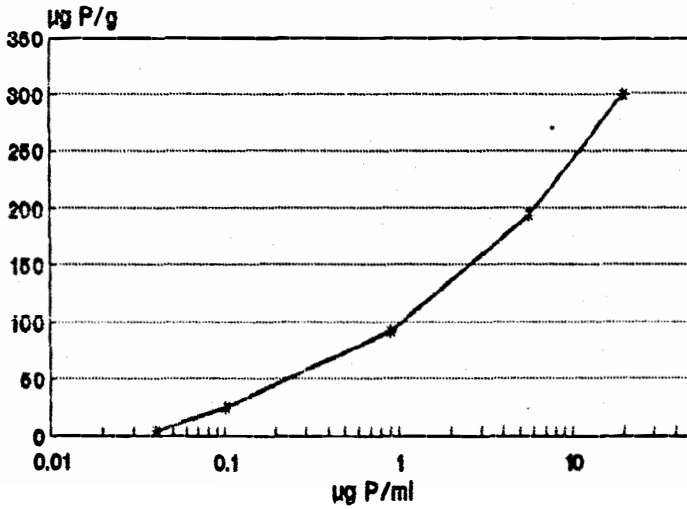


Figura 47. Isoterma de adsorção do P no Sistema 5. Media de blocos e anos 1986-87.

Tabela 18. Retenção de fósforo na fase sólida do solo para distintas concentrações na solução. Média de blocos e anos 1986-87 para os Sistemas 1, 2 e 5.

----- µg P/g -----			
µg P/ml	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 5
0.1	37,6	26,8	24,0
0.2	52,6	42,2	40,9
1.0	102,2	93,8	95,9

A principal explicação para esse comportamento seria a adubação fosfatada previamente recebida pelos Sistemas 2 e 5, a qual tende a aumentar o grau de saturação do solo e diminuir a retenção. Essa diminuição da capacidade de retenção devido à adubação fosfatada prévia foi relatada por BECKWITH (1964) e FOX & KAMPRATH (1970). OZANNE & SHAW (1967) e BARROW (1975) encontraram relações negativas entre a capacidade de reter P e a eficiência do adubo fosfatado adicionado.

Na prática, pode-se dizer que uma unidade de fósforo adicionada aos Sistemas 2 ou 5 seria mais eficientemente utilizada pelas plantas do que se fosse adicionada ao Sistema 1.

4.6. Efeito dos Sistemas no Nível de Fósforo Presente na Biomassa Microbiana do Solo

Como era de se esperar, os Sistemas apresentaram diferentes níveis de P na biomassa microbiana do solo (Tabela 19). O Sistema 5, cujos blocos 2 e 3 no momento da amostragem estavam com pastagem, apresentou os valores mais altos. As tendências observadas na Tabela 19 são coincidentes com as relatadas por BROOKES *et alii* (1984), os quais compararam o teor de P presente na biomassa microbiana em solos sob culturas com o de solos sob pastagens.

Tabela 19. Fósforo ($\mu\text{g P/g}$) na biomassa microbiana do solo.

	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 5
Bloco 1	6,21	8,59	19,57
Bloco 2	9,28	13,23	20,72
Bloco 3	6,87	14,80	28,04
Media	7,45	12,21	22,78

A interpretação do teor de fósforo da biomassa microbiana, segundo a bibliografia consultada, é contraditória. Enquanto STEWART & SHARPLEY (1987) interpretam a biomassa microbiana como uma fonte adicional de fornecimento de P para a solução do solo, PARFITT *et alii* (1989) sugerem que os microrganismos são eficazes competidores das plantas para o P inorgânico.

Por outro lado, segundo trabalhos de SPARLING *et alii* (1985, 1987), o P presente na biomassa microbiana pode exercer significativa interferência na determinação do P disponível, superestimando a grandeza real dessa fração.

Se por um lado os dados da Tabela 19 refletem apenas os teores encontrados no momento da coleta da amostra, carecendo de resultados para outras épocas do ano, por outro expressam um efeito acumulado de muitos anos de cultura com sistemas de manejo contrastantes.

Serão necessários outros estudos para conhecer até que ponto o P presente na biomassa microbiana é disponível e como agem as diferentes variáveis climáticas e os diferentes sistemas de manejos em sua liberação ou imobilização.

5. CONCLUSÕES

- a) Em termos gerais confirmou-se a hipótese segundo a qual a dinâmica do fósforo no solo é influenciada por diferentes sistemas agrícolas.
- b) No sistema de agricultura contínua sem adubação observou-se o seguinte:
- 1) O balanço de P total no solo foi negativo, indicando uma perda anual do elemento igual a 25,57 kg P_2O_5 /ha/ano. As principais vias de saída foram a erosão (18,52 kg P_2O_5 /ha/ano) e a remoção pelas colheitas (7,04 kg P_2O_5 /ha/ano).
 - 2) O P orgânico foi a fração que mais se perdeu em quantidades absolutas (1,5 μ g P/g/ano), sendo seguida das frações PFe (0,43 μ g P/g/ano) e PAI (0,42 μ g P/g/ano).
 - 3) As principais perdas percentuais ocorridas em todo o período com a cultura foram das frações PAI (60,0%), PFe (30,6%) e P orgânico (25,4%).
 - 4) O teor de P disponível determinado por Bray I diminuiu de 9,4 para 4,7 μ g P/g no período 1964-87, enquanto o determinado pela resina reduziu de 12,0 para 3,9 μ g P/g no mesmo período.

c) Para o sistema de agricultura contínua com adubação as principais conclusões foram:

1) O balanço de P total indicou uma condição muito próxima do equilíbrio, havendo uma perda anual de somente 0,86 kg P_2O_5 /ha/ano. As principais perdas de P do sistema foram 26,74 kg P_2O_5 /ha/ano pela erosão e 13,94 kg P_2O_5 /ha/ano pela remoção através das colheitas.

2) A adubação utilizada neste sistema não deteve a queda do teor de P orgânico, cuja taxa (1,41 μ g P/g/ano) foi levemente menor que a do sistema sem adubação. Em todo o período houve uma diminuição de 22,3% do P orgânico do solo.

3) Houve aumento em todas as frações inorgânicas de fósforo, em proporção aproximadamente igual à do seu peso relativo. Quase a metade (48%) do ganho ficou com P ocluso.

4) Os teores de P disponível foram maiores que 12 μ g P/g em todos os anos do período estudado e para ambos os métodos de extração (Bray I e resina).

d) Para a rotação de culturas com pastagens e com adubação pôde-se concluir que:

1) O balanço de P total no solo foi positivo, com um ganho anual do elemento de 14,86 kg P_2O_5 /ha. A erosão continuou sendo a principal via de saída (17,50 kg P_2O_5 /ha/ano), seguindo-se a remoção pelas colheitas (9,45 kg/ha/ano).

- 2) Não se registrou imobilização líquida, mas evitou-se a queda no conteúdo de P orgânico.
- 3) Houve aumento do teor de todas as frações inorgânicas de fósforo, sendo o P ocluso o principal destino do fósforo aplicado. Aproximadamente 61% do incremento anual de P inorgânico ocorreram na forma de P ocluso. Portanto, a distribuição interna do P inorgânico do sistema 5 foi mais desfavorável que a do sistema 2.
- 4) O P disponível Bray I na maioria dos anos apresentou valores inferiores aos do sistema 2.
- e) As relações C orgânico: P orgânico e N total: P orgânico diminuíram ao longo do período experimental somente no sistema 1.
- f) A fração PA1 foi a fração que individualmente melhor se correlacionou com o P disponível para os métodos de Bray I e resina.
- g) O P orgânico apresentou uma correlação positiva e significativa com o P disponível resina.
- h) Para manter $0,1 \mu\text{g P/ml}$ em solução no sistema 1 foram necessários 48% mais fósforo retido na fase sólida que nos sistemas 2 e 5.

- i) A inclusão de pastagens provocou um aumento no conteúdo de P presente na biomassa microbiana em relação aos sistemas de agricultura contínua adubadas ou não.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, T.G. & ROBERTSON, J.A. Ascorbic acid as a reductant for inorganic phosphorus determination in Chang and Jackson fractionation procedure. *Soil Science*, Baltimore, 110(5): 361-362, 1970.
- ANDERSON, G. Assessing organic phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E., ed. *The role of phosphorus in agriculture; proceedings*. Madison, American Society of Agronomy, 1980. cap 15. p.411-37.
- ASHER, C.J. & LONERAGAN, J.F. Response of plants to phosphate concentration in solution culture: I-Growth and phosphorus content. *Soil Science*, Baltimore, 103(4): 225-233, 1967.
- BARBER, S.A. Soil phosphorus after 25 years of cropping with five rates of phosphorus application. *Commun in soil Science and Plant Analysis*, New York, 19(11): 1459-1467, 1979.
- BARBER, S.A. *Soil nutrient bioavailability*. New York, J. Willey & Sons, 1984. 397p.
- BARBOSA FILHO, M.P.; KINJO, T; MURAOKA, T. Relações entre fósforo "extraível", frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 11: 147-155, 1987.

- BARROW, N.J. The Slow reactions between soil and anions: 1. Effects of time, temperature and water content of a soil on the decrease in effectiveness of phosphate for plant growth. *Soil Science*, Baltimore, 118: 380-386, 1974.
- BARROW, N.J. The response to phosphate of two Annual Pasture Species. I Effect of the Soil's ability to Adsorb Phosphate on Comparative Phosphate requirement. *Aust. J. Agric. Res.*, Melbourne, 26: 137-143, 1975.
- BARROW, N.J. The efficiency of utilization of P in superphosphate, New Zealand of *Experimental Agriculture*, Wellington, 8: 211-214, 1980a.
- BARROW, N.J. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soil. In: KHASAWNEH, F.E., ed. *The role of phosphorus in agriculture; proceeding*. Madison, American Society of Agronomy, 1980b. cap 13. p.333-359.
- BATTEN, G.D.; BLAIR, G.J.; LILL, W.J. Changes in soil phosphorus and pH in a red earth soil during build-up and residual phases or wheatchlover ley farming system. *Aust. J. Soil. Res*, Melbourne, 17: 163-175, 1979.
- BECKWITH, R.S. Soberd phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soil. *Aust. J. Exp. Agr. and An. Hus*, Melbourne, 5: 52-58, 1965.
- BLACK, C.A. *Relaciones suelo-planta*. Buenos Aires, Hemisfério Sur, 1975. V. 2. p.445-866.
- BLAIR, G.J.; TILL, A.R.; SMITH, R.C.G. The phosphorus cycle- what are the sensitive areas?. In: BLAIR, G.J., ed. *Prospects for improving efficiency of phosphorus utilization; proceedings*. Armidale, University of New England, 1977. p.9-19.

- BOWDEN, J.M. & BENNETT, D. The "Decide" model for predicting superphosphate requirements. In: AUSTRALIAN INSTITUTE OF AGRICULTURAL SCIENCE, ed. Phosphorus in agriculture; papers. Victoria Branch, 1974. cap 6. p.1-36.
- BOWMAN, R.A. & COLE, C.V. Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO_3 extraction. *Soil Science*, Baltimore, 125(1): 49-54, 1978a.
- BOWMAN, R.A. & COLE, C.V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. *Soil Science*, Baltimore, 125(2): 95-101, 1978b.
- BRAY, R.H. & KURTZ, L.T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, Baltimore, 59: 39-45, 1945.
- BREMNER, J.M. Inorganic forms of nitrogen. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, 1965. p.1179-1237. (Agronomy, 9).
- BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S.; JENKINSON, D.S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biol.Biochem*, Oxford, 14: 319-329, 1982.
- BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S.; JENKINSON, D.S. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biol.Biochem*, Oxford, 16(2): 169-175, 1984.
- CAMPBELL, C.A.; READ, D.W.L.; WINKLEMAN, G.E.; McANDREW, D.W. First 12 year of a long-term crop rotation study in south western Saskatchewan-Bicarbonate-P distribution in soil and P uptake by the plant. *Can.J.Soil Sci*, Ottawa, 64: 125-137, 1984.

- CASTRO, J.L.; ZAMUZ, E.M.de; BARBOZA, S. Fertilización de pasturas en el litoral oeste de Uruguay. *Investigaciones Agronomicas*, Montevideo, 1: 56-67, 1981a.
- CASTRO, J.L.; ZAMUZ, E.M.de; OUDRI, N. Guia para fertilización de pasturas. In: CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRICOLAS "ALBERTO BOERGER". Fertilizacion de pasturas. La Estanzuela, Estación Experimental Agropecuária. 1981b. cap 7. (Miscelanea 37).
- CHANG, S.C. & JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci*, Baltimore, 84(2): 133-144, 1957.
- CHATER, M. & MATTINGLY, G.E.G. Changes in organic phosphorus contents of soils from long-continued experiments at Rothamsted and Saxmundham. *Institute of arable crops research Rothamsted report*, Rothamsted, 1: 41-61, 1980.
- CONDRON, L.M. & GOH, K.M. Effects of a long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zeland. *Journal of Soil Science*, Oxford, 40: 383-395, 1989.
- CORNFORTH, I.S. & SINCLAIR, A.G. Model for calculating maintenance phosphate requirements for graze pastures. *New Zeland Journal of Experimental agriculture*, Wellington, 10: 53-61, 1982.
- CORNFORTH, I.S. & SINCLAIR, A.G. Pasture maintenance phosphorus. In: MINISTRY OF AGRICULTURE & FISHERIES, ed. Fertilizer and lime recomendations for pastures and crops in New Zealand, 2^a ed. Wellington, 1984. p.10-13.
- DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. *Advances in Agronomy*, New York, 29: 83-117, 1977.

- DALAL, R.C. & MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. I-Overall changes in soil properties and trends in winter cereal yields. *Aust.J.Soil res*, Melbourne, 24: 265-279, 1986.
- DIAZ, R. Propuesta de modificaciones a un experimento de rotaciones agrícola-ganaderas. *Investigaciones Agronómicas*, Montevideo, 4: 76-78, 1983.
- ESCUADERO, J. & MORÓN, A. Caracterización de la capacidad de fijación de fósforo de distintos suelos del Uruguay. Montevideo, 1978, 100p. (Tesis Grado Ing. Agr., Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay).
- FOX, R.L. & KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc*, Madison, 34: 902-907, 1970.
- FRERE, M.H.; ROSS, J.D.; LANE, L.J. The nutrient submodel. In: KNISEL, W., ed. *CREAMS. A field scale model for chemical, runoff, and erosion from agricultural management systems*. Washington, Department of agriculture, 1980. cap. 4. p.65-87.
- GARCIA, F. Predicción de pérdidas de suelo por erosión hídrica. Montevideo, Universidad de la República, 1983. 59p.
- GARCIA, F.; BELOQUI, C.; LABELLA, S. Propiedades físicas del suelo en rotaciones de 16 años. In: Reunión técnica de la Facultad de Agronomía.2. Montevideo, 1979. p.54.
- GILBERT, M. Improving the efficiency of phosphorus fertilizer use in Northern Australia. In: *INTERNATIONAL GRASS-*

LAND CONGRESS. 16. Nice, 1989. Nice, Association Française por la production fourragère, 1989. p.95-96.

- GILLINGHAM, A.G. Phosphorus cycling in managed grassland. In: SNAYDON, R.W., ed. *Managed Grasslands, B. Analytical studies*. Amsterdam, Elsevier, 1987. cap 18, p.173-180.
- GONÇALVES, J.A.; BRAGA, J.M.; CASTRO BAHIA, A.F. Influência de doses de fósforo e de cultivos sucessivos nos níveis de frações de fósforo inorgânico, na presença ou ausência de vegetal. *Revista Ceres, Viçosa*, 33(190): 479-495, 1986.
- HAAS, H.J.; GRUNES, D.L.; REICHMAN, G.A. Phosphorus changes in great plains soils as influenced by cropping and manure applications. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, 25(3): 214-18, 1961.
- HALM, B.J.; STEWART, J.W.B.; HALSTEAD, R.L. The phosphorus cycle in a native grassland ecosystem. In: IAEA, ed. *Isotopes and radiation in soil plant relationships including forestry*. Viena, IAEA, 1972. p. 571-586.
- HANWAY, J.J. & OLSON, R.A. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans and small grains. In: KHASAWNEH, ed. *The role of phosphorus in agriculture; proceedings*. Madison, American Society of Agronomy, 1980. cap 24. p.681-92.
- HARRISON, A.F. Labile organic phosphorus mineralization in relationship to soil properties. *Soil.Biol.Biochem.*, Oxford, 14: 343-351, 1982.
- HARRISON, A.F. Effects of environment and management on phosphorus cycling in terrestrial ecosystems. *Journal of Environmental Management*, London, 20: 163-179, 1985.

- HEDLEY, M.J. & STEWART, J.W.B. Method to measure microbial phosphate in soils. *Soil.Biol.Biochem.*, Oxford, 14: 377-385, 1982.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, Madison, 46: 970-976, 1982.
- JACKMAN, R.H. Accumulation of organic matter in some New Zealand soils under permanent pasture. I-Patterns of organic carbon, Nitrogen, sulphur, and phosphorus. *N. Z. J. Agric. Res.*, Wellington, 7(4): 445-471, 1964.
- JACKSON, M.L. *Análisis químico de suelos*. Barcelona, OMEGA, 1964. 662p.
- KAMPRATH, E.J. & WATSON, M.E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils: In: KHASAWNEH, F.E., ed. *The role of phosphorus in agriculture; proceedings*. Madison, American Society of Agronomy, 1980, cap 16. p.433-69.
- KARLOVSKY, J. Phosphorus utilization in Grassland. In: SMITH, J.A. & HAYS, V.W., ed. *Soil Fertility Proceedings*. Kentucky. Westview Press, 1981. p.279-82.
- KOHN, G.D.; OSGORNE, G.J.; BATTEN, G.D.; SMITH, A.N.; LILL, W.J. The effect of topdressed superphosphate on changes in nitrogen: carbon: sulphur: phosphorus and pH on a red earth soil during a long term grazing experiment. *Aust.J.Soil.Res.*, Melbourne, 15: 147-158, 1977.
- LARSEN, S. Evaluation of native and residual phosphorus in soil as a source of phosphorus for plants. In: BLAIR, G.J., ed. *Prospects for improving efficiency of phospho-*

rus utilization; proceedings. Armidale, University of New England, 1977. p.31-33.

LEGG, J.O. & BLACK, C.A. Determination of organic phosphorus in soils: II-Ignition method. Soil Science Society of American Proceedings, Madison, 19(2): 139-143, 1955.

LEWIS, D.C.; CLARKE, A.L.; HALL, W.B. Accumulation of plant nutrients and changes in soil properties of sandy soils under fertilized pasture in South-eastern South Australia.I-Phosphorus. Aust.J.Soil.Res., Melbourne, 25: 193-202, 1987a.

LEWIS, D.C.; CLARKE, A.L.; HALL, W.B. Accumulation of plant nutrients and changes in soil properties of sandy soils under fertilized pasture in Sout-heastern South Australia.II-Total sulfur and nitrogen, organic carbon an pH. Aust. J. Soil. Res., Melbourne, 25: 203-210, 1987b.

LINDSAY, W.L. Chemical equilibria in soils. New York, J.Wiley & Sons, 1979, 449p.

MASSEY, H.F. & JACKSON, M.L. Selective erosion of soil fertility constituents. Soil Science Society Proceedings, Madison, 16: 353-356, 1952.

McDOWELL, L.L. & McGREGOR, K.C. Plant nutrient losses in runoff from conservation tillage corn. Soil & Tillage Research, Amsterdam, 4: 79-91, 1984.

McDOWELL, L.L.; WILLIS, G.H.; MURPHREE, C.E. Nitrogen and phosphorus yields in runoff from silty soils in the Mississippi. Agriculture, ecosystems and environment, Amsterdam, 25: 119-137, 1989.

- McGILL, W.B. & COLE, C.V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, Amsterdam, 26: 267-286, 1981.
- McLACHLAN, K.D. Stocking rate and the superphosphate requirements of sown pasture on an acid soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, Melbourne, 8: 33-39, 1968.
- McLAUGHLIN, M.J.; ALISON, A.M.; MARTIN, J.K. Phosphorus cycling in wheat pasture rotation III—Organic phosphorus turnover and phosphorus cycling. *Aust.J.Soil.Res.*, Melbourne, 26: 343-353, 1988.
- MEHTA, N.C.; LEGG, J.O.; GORING, C.A.I.; BLAKC, C.A. Determination of organic phosphorus in soils: I. Extraction method. *Soil Sci.Soc.Amer. Proc.*, Madison, 18: 443-449, 1954.
- MENDEZ, J.A. Estudio de formas de fósforo en el suelo en un ensayo de fertilización. Montevideo, 1975. 85p. (Tesis de grado-Ing.Agr. Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay).
- MENZEL, R.G. Enrichment ratios for water quality modeling. In: KNISEL, W. ed. *CREAMS. A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems*. Washington, Department of agriculture, 1980. cap 12. p.486-93.
- MIDDLETON, K.R. & SMITH, G.S. The concept of a climax in relation to the fertilizer input of a pastoral ecosystem. *Plant and Soil*. Dordrecht, 50: 595-614, 1978.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. Dirección de suelos y fertilizantes; carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo, 1976. t. 1. 96p.

- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. Direccion de suelos y fertilizantes; carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo, 1979. t. 3. 452p.
- MORÓN, A. E. & PEREZ, J. M. Dinámica del fósforo en la Productividad de una pastura convencional. In: CENTRO DE INVERSIONES AGRICOLAS "ALBERTO BOERGER". Fertilización de pasturas. La Estanzuela, Estacion Experimental Agropecuaria "La Estanzuela", 1981. cap 3 (Miscelanea 37).
- MURPHY, J. & RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, Washington, 27: 31-36, 1962.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. United States-Canadian Tables of feed Composition. Washington, USDA, 1982. 148p.
- O'HALLORAN, I. P.; STEWART, J. W. B.; DE JOG, E. Changes in P forms and availability as influenced by management practices. *Plant and Soil*, Dordrecht, 100: 113-126, 1987a.
- O'HALLORAN, I. P.; STEWART, J. W. B.; KALHANOSKI, R. G. Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. *Can. J. Soil. Sci.*, Ottawa, 67: 147-163, 1987b.
- OLSEN, S. R. & KHASAWNEH, F. E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F. E., ed. *The role of phosphorus in agriculture; proceedings*. Madison, American Society of Agronomy, 1980. cap 14. p. 361-410.
- OZANNE, P. G. & SHAW, T. C. Phosphore sorption by soils as a measure of the phosphate requirement for pasture growth. *Aust. J. Agric. Res.*, Melbourne, 18: 601-12, 1967.

- PARFITT, R.L. A note on the losses from a phosphate cycle under grazed pasture. *N. Z. Journal of experimental Agriculture*, Wellington, 8: 215-217, 1980.
- PARFITT, R.L.; HUME, L.J.; SPARLING, G.P. Loss of a availability of phosphate in New Zealand soils. *Journal of soil Science*, Oxford, 40: 371-382, 1989.
- PARTON, W.J.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*, Dordrecht, 5: 109-131, 1988.
- PATRICK, Vm.H. & MAHAPATRA, I.C. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Advances in Agronomy*, New York, 20: 323-359, 1968.
- PEREZ, J.; CASTRO, J.L.; ZAMUZ, E.M.de. Calibración de métodos de análisis de suelos para determinar la fertilización fosfatada del trigo. *Investigaciones Agronómicas*, Montevideo, 1: 74-79, 1981.
- PETERSON, G.W. & COREY, R.B. A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. *Soil Sci.Soc.Am.Proc.*, Madison, 30: 563-565, 1966.
- QUIN, B.F. & RICKARD, D.S. Pasture production and changes in soil fertility on a long-term irrigated superphosphate trial at Winchmore, New Zealand. In: SMITH, J.A. & HAYS, V.W., ed. *Soil Fertility*, proceedings. Kentucky. Westview Press, 1981. p.323-26.
- READ, D.L. & CAMPBELL, C.A. Bio-cicling or phosphorus in soil by plant roots. *Can.J.Soil.Sci.*, Ottawa, 61: 587-589, 1981.

ROCHE, P.; GRIERE, L.; BABRE, D.; CALBA, H.; FALLAVIER, P. El fósforo en los suelos tropicales: evaluación de los grados de deficiencia y de las necesidades de fósforo, Paris, Institut Mondial du Phosphate, 1980. 48p. (Publicación científica, 2).

RUSSELL, J.S. Soil fertility changes in the long-term experimental plots at Kybybolite, South Australia. I-Changes in pH, total nitrogen, organic carbon and bulk density. *Aust. J. Agric. Research*, Melbourne, 11: 902-926, 1960a.

RUSSELL, J.S. Soil fertility changes in the long term experimental plots at Kybybolite, South Australia. II-Changes in phosphorus. *Aust. J. Agric. Research*, Melbourne, 11: 927-947, 1960b.

RYDEN, J.C.; McLAUGHLIN, J.R.; SYERS, J.K. Mechanisms of phosphate sorption by soils and hydrous ferric oxide gel. *Journal of Soil Science*, Oxford, 28: 72-92, 1977.

SAH, R.N. & MIKKELSEN, D.S. Transformation of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. *Soil. Sci. Am. J.*, Madison, 50: 62-67, 1986.

SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F.E., ed. *The role of phosphorus in agriculture; proceedings*. Madison, American Society of Agronomy, 1980, cap 11. p.263-310.

SANCHEZ, P.A. *Suelos del tropico. Características y manejo*. San José de Costa Rica, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1981. 634p.

SHARPLEY, A.N. The enrichment of soil phosphorus in runoff sediments. *J. Environ. Anal.*, London, 9(3): 521-526, 1980.

- SHARPLEY, A.N. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 49(4): 905-911, 1985a.
- SHARPLEY, A.N. The selective erosion of plant nutrient in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 49 :1527-1534, 1985b.
- SHARPLEY, A.N. & SMITH, S.J. Distribution of phosphorus forms in virgin and cultivated soils and potential erosion losses. *Soil.Sci. Am. J.*, Madison, 47: 581-586, 1983.
- SHARPLEY, A.N. & SMITH, S.J. Fractionation of inorganic phosphorus in virgin and cultivated soils. *Soil Sci. Am. J.* Madison, 49: 127-130, 1985.
- SHARPLEY, A.N. & MENZEL, R.G. The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment. *Advances in Agronomy*, New York, 41: 297-324, 1987.
- SHARPLEY, A.N.; TIESSEN, H.; COLE, C.V. Soil phosphorus forms extracted by soil test as a function of pedogenesis. *Soil Science Society of American J.*, Madison, 51:(2): 362-365, 1987.
- SHARPLEY, A.N.; SMITH, S.J.; WILLIAMS, J.R. Nonpoint source pollution impacts of agricultural land use. *Lake and reservoir management* 4(1): 41-49, 1988.
- SHELTON, J.E. & COLEMAN, N.T. Inorganic phosphorus fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high fixing soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proceedings*, Madison, 32: 91-94, 1968.
- SIQUEIRA, J.O. & FRANCO, A.A. *Biotechnology do solo; fundamentos e perspectivas*. Brasília, Ministério de Educação, 1988. 235p.

- SIMPSON, J.R.; BROMFIELD, S.M.; JONES, O.L. Effects of management on soil fertility under pasture.3. Changes in total soil nitrogen, carbon, phosphorus and exchangeable cations. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, Melbourne, 14: 487-494, 1974.
- SMECK, N.E. Phosphorus dynamic in soils and landscapes. *Geoderma*, Amsterdam, 36: 185-199, 1985.
- SPARLING, G.P.; WHALE, K.N.; RAMSAY, A.J. Quantifying the contribution from the soil microbial biomass to the extractable p levels of fresh and air-dried soils. *Aust.J. Soil.Res.*, Melbourne, 23: 613-621, 1985.
- SPARLING, G.P.; MILNE, J.D.G.; VICENT, K.W. Effect of soil moisture regime on the microbial contribution to Olsen phosphorus values. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, Wellington, 30: 79-84, 1987.
- STEVENSON, F.J. *Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients*, New York, J. Wiley & Sons, 1986. 379p.
- STEWART, J.W.B. Agronomic significance of carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur interrelationships in soils. *Intercol.Bulletin* 15: 25-32, 1987.
- STEWART, J.W.B. & TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*, Dordrecht, 4: 41-60, 1987.
- STEWART, J.W.B. & SHARPLEY, A.N. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA*, ed. *Soil fertility and organic matter as critical components of production systems*; Spec. Pub. Madison, 1987. p.101-21.

- SYERS, J.K.; SHAH, R.; WALKER, T.W. Fractionation of phosphorus in two alluvial soils. and particle size separates. *Soil Science*, Baltimore, 104(4): 283-288, 1969.
- SYERS, J.K.; SMILLIE, G.W.; WILLIAMS, J.P.H. Calcium Fluoride Formation During Extraction os Calcareous Soils with fluoride: I. Implications to Inorganic P Fractionation Schems. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.*, Madison, 36: 20-25, 1972.
- TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. BETTANY, J.R. Cultivation effects on the amounts and concentration of carbon, nitrogen and phosphorus in grassland soils. *Agronomy Journal*, Madison, 74: 831-835, 1982.
- TIESSEN, H. & STEWART, J.W.B. The biogeochemistry of soil phosphorus. In: CALDWELL, D.E., ed. *Planetary ecology*. Saskatchewan, University of Saskatchewan, 1983. p.463-72.
- TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differeing pedogenesis. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, Madison, 48: 853-858, 1984.
- TILL, A.R. Cycling of plant nutrients in pastures. In: Morley, F.H.W., ed. *Grazing animals*. 1981. p.33-51.
- TINSLEY, J. *Soil Science manual of experiments*. Aberdeen, University of Aberdeen, Departament of Soil Science. 1967. 124p.
- VICTORA, C.D.; PIÑEYRUA, J.; PUENTES, R. Relevamiento semi-detallado de suelos de la Estación Experimental "La Estanzuela". Colonia, CIAAB/MAP. 1985. 20p.
- WALKER, T.W. & SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, Amsterdam, 15: 1-19, 1976.

- WILLIAMS, C.H. The phosphorus cycle in the soil-plant-animal system. In: AUSTRALIAN INSTITUTE OF AGRICULTURAL SCIENCE, ed. Phosphorus in agriculture; papers. Victoria Branch, 1974. cap 1. p.1-26.
- WICHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. USDA, 58 p. (Handbook, 537).
- ZAMALVIDE,, J.; MALLARINO, A.; CASANOVA, O.; GENTA, H. Evaluación del comportamiento de cinco métodos para estimar fósforo disponible en suelos del Uruguay. Montevideo, Universidad de la República Oriental del Uruguay. 1975. 55p.
- ZAMUZ, E.M.de & CASTRO, J.L. Evaluación de métodos de análisis de suelo para determinar fósforo asimilable. La Estanzuela, Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Berger", 1974. 15p. (Boletín Técnico, 15).

A P Ê N D I C E

Apêndice 1. Sistema 1. Fósforo total, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	257	270	263	263
65	2	257	297	---	277
66	3	250	290	250	263
67	4	236	283	257	259
68	5	257	290	270	272
69	6	243	270	270	261
70	7	250	277	263	263
71	8	230	273	260	254
72	9	250	273	---	262
73	10	243	263	250	252
74	11	243	270	257	257
75	12	230	243	263	245
76	13	223	250	247	240
77	14	230	230	249	236
78	15	223	230	250	234
79	16	216	---	---	---
80	17	216	236	---	226
81	18	223	236	243	234
82	19	216	230	243	230
83	20	210	236	230	225
84	21	210	230	257	232
85	22	196	216	230	214
86	23	216	230	250	232
87	24	203	216	230	226

Apêndice 2. Sistema 1. Fósforo orgânico, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	127	132	112	123
65	2	122	155	---	139
66	3	122	141	127	130
67	4	127	155	118	133
68	5	146	150	132	143
69	6	113	150	127	130
70	7	127	155	120	134
71	8	122	134	106	121
72	9	125	136	---	130
73	10	108	122	136	122
74	11	108	132	127	122
75	12	118	118	141	125
76	13	101	120	118	113
77	14	118	122	113	118
78	15	113	94	122	110
79	16	99	108	127	112
80	17	94	108	118	107
81	18	89	103	103	99
82	19	103	132	99	111
83	20	80	122	122	108
84	21	80	108	132	107
85	22	89	108	118	105
86	23	94	113	132	113
87	24	85	118	103	102

Apêndice 3. Sistema 1. Fósforo inorgânico, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	130	138	125	131
65	2	134	142	---	138
66	3	128	149	101	126
67	4	110	128	128	122
68	5	111	140	130	127
69	6	130	119	150	133
70	7	123	121	142	129
71	8	108	139	120	122
72	9	125	137	---	131
73	10	135	141	109	128
74	11	135	138	118	131
75	12	112	126	138	125
76	13	122	130	117	123
77	14	112	108	142	120
78	15	110	136	114	120
79	16	118	---	---	---
80	17	122	128	---	125
81	18	134	133	110	126
82	19	113	98	145	119
83	20	130	114	116	120
84	21	130	122	135	129
85	22	107	108	122	112
86	23	122	117	133	124
87	24	118	99	131	116

Apêndice 4. Sistema 1. Fosfato de alumínio, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	15.1	13.3	11.5	13.3
65	2	16.9	16.9	---	16.9
66	3	20.4	13.3	11.5	15.1
67	4	16.9	13.3	11.5	13.9
68	5	13.3	15.1	13.3	13.9
69	6	15.1	13.3	9.8	12.7
70	7	16.9	14.2	12.4	14.5
71	8	17.4	15.1	12.4	15.0
72	9	16.9	16.9	---	16.9
73	10	13.3	16.9	9.8	13.3
74	11	13.3	13.3	9.8	12.1
75	12	6.2	13.3	8.0	9.2
76	13	11.5	12.4	8.0	10.6
77	14	8.0	9.8	6.2	8.0
78	15	13.3	11.5	8.0	10.9
79	16	13.3	---	---	---
80	17	9.8	9.8	---	9.8
81	18	9.8	11.5	8.0	9.8
82	19	9.8	8.0	6.2	8.0
83	20	9.8	9.8	6.2	8.6
84	21	8.0	8.0	6.2	7.4
85	22	8.0	6.2	6.2	6.8
86	23	9.8	4.4	4.4	6.2
87	24	6.2	6.2	8.0	6.8

Apêndice 5. Sistema 1. Fosfato de ferro, $\mu\text{g P/g}$.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	24.0	29.0	34.4	29.1
65	2	27.5	32.6	---	30.0
66	3	27.5	32.6	37.9	32.7
67	4	25.7	34.4	36.1	32.1
68	5	34.4	32.6	37.9	34.9
69	6	22.2	29.0	32.6	27.9
70	7	25.7	29.9	35.2	30.3
71	8	25.6	31.7	36.1	31.1
72	9	29.3	30.8	---	30.0
73	10	25.7	30.8	36.1	30.9
74	11	25.7	30.8	32.6	29.7
75	12	22.2	27.3	32.6	27.3
76	13	21.3	24.6	31.7	25.9
77	14	22.2	23.7	29.0	25.0
78	15	22.2	25.5	29.0	25.6
79	16	22.2	---	---	---
80	17	20.4	23.7	---	22.1
81	18	22.2	23.7	30.8	25.6
82	19	18.6	21.9	27.3	22.6
83	20	18.6	23.7	30.8	24.4
84	21	16.9	21.9	30.8	23.2
85	22	18.6	23.7	27.3	23.2
86	23	18.6	23.7	29.0	23.8
87	24	20.2	25.5	29.0	24.9

Apêndice 6. Sistema 1. Fosfato de cálcio, $\mu\text{g P/g}$.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	13.5	15.2	17.0	15.2
65	2	17.0	17.0	---	17.0
66	3	13.5	13.5	17.0	14.6
67	4	15.2	17.0	17.0	16.4
68	5	17.0	17.0	17.0	17.0
69	6	15.2	15.2	15.2	15.2
70	7	14.3	13.5	16.1	14.6
71	8	12.6	14.3	18.7	15.2
72	9	14.3	15.2	---	14.8
73	10	15.2	15.2	17.0	15.8
74	11	13.5	15.2	17.0	15.2
75	12	13.5	15.2	17.0	15.2
76	13	13.5	14.3	16.1	14.6
77	14	13.5	13.5	17.0	14.6
78	15	13.5	13.5	17.0	14.6
79	16	13.5	---	---	---
80	17	17.0	13.5	---	15.2
81	18	13.5	13.5	17.0	14.6
82	19	11.7	11.7	15.2	12.9
83	20	11.7	11.7	15.2	12.9
84	21	11.7	11.7	18.7	14.0
85	22	11.7	11.7	15.2	12.9
86	23	11.7	11.7	17.0	13.5
87	24	10.0	11.7	15.2	12.6

Apêndice 7. Sistema 1. Fósforo ocluso, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	77.1	80.8	88.6	82.2
65	2	73.0	75.2	---	74.1
66	3	66.3	89.6	56.5	70.8
67	4	51.8	63.6	74.4	63.3
68	5	46.2	75.0	70.1	63.3
69	6	77.9	62.0	85.5	75.1
70	7	66.0	63.9	79.6	69.8
71	8	51.9	78.2	86.7	72.3
72	9	64.8	74.1	---	69.4
73	10	80.8	78.2	50.7	69.9
74	11	82.6	79.0	70.3	77.3
75	12	70.4	69.9	64.7	68.3
76	13	75.7	78.6	73.2	75.9
77	14	68.6	60.6	84.1	71.1
78	15	61.3	85.3	73.7	73.4
79	16	68.7	---	---	---
80	17	75.3	81.4	---	73.3
81	18	83.4	84.4	84.0	85.6
82	19	72.9	56.5	95.8	75.1
83	20	89.7	69.1	55.3	71.4
84	21	93.2	80.0	69.2	80.8
85	22	68.7	66.7	63.6	66.3
86	23	82.3	77.1	67.8	75.7
87	24	82.1	55.5	74.1	70.6

Apêndice 8. Sistema 1. P disponível-resinas, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	10.8	14.9	10.8	12.2
65	2	10.8	13.5	---	12.2
66	3	11.5	12.8	10.8	11.7
67	4	9.4	11.5	10.8	10.6
68	5	12.2	12.2	10.8	11.7
69	6	8.8	8.1	7.4	8.1
70	7	10.2	10.1	8.8	9.7
71	8	9.8	9.8	9.5	9.7
72	9	8.8	11.2	---	10.0
73	10	8.8	9.4	9.4	9.2
74	11	8.1	8.8	8.1	8.3
75	12	5.4	6.7	8.1	6.7
76	13	5.1	7.8	7.1	6.6
77	14	8.1	6.1	6.1	6.8
78	15	6.1	6.7	6.8	6.5
79	16	5.4	---	---	---
80	17	5.4	6.1	---	5.8
81	18	5.4	6.1	5.4	5.6
82	19	4.7	4.7	4.1	4.5
83	20	4.0	4.7	5.4	4.7
84	21	3.4	4.1	5.4	4.3
85	22	5.4	4.1	4.7	4.7
86	23	4.0	3.7	4.1	3.6
87	24	4.0	5.4	5.4	4.6

Apêndice 9. Sistema 1. P disponível-Bray 1, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	7.3	7.6	8.5	7.8
65	2	9.2	10.7	---	10.0
66	3	8.8	8.3	9.9	9.0
67	4	8.5	8.5	9.0	8.7
68	5	11.4	9.5	9.0	10.0
69	6	6.6	7.1	8.0	7.2
70	7	8.1	8.4	8.8	8.4
71	8	7.6	8.8	9.4	8.6
72	9	8.1	9.7	---	8.9
73	10	7.6	8.3	8.5	8.1
74	11	6.6	7.3	7.6	7.2
75	12	5.9	6.1	7.1	6.4
76	13	5.8	6.0	6.5	6.1
77	14	6.6	5.2	6.1	6.0
78	15	5.9	5.9	6.1	6.0
79	16	5.9	---	---	---
80	17	5.4	5.2	---	5.3
81	18	6.1	6.1	6.4	6.2
82	19	4.7	4.3	4.7	4.6
83	20	4.7	4.5	5.7	5.0
84	21	4.0	4.3	5.7	4.7
85	22	5.7	4.0	5.2	5.0
86	23	5.4	3.8	4.3	4.5
87	24	5.2	6.4	7.3	6.3

Apêndice 10. Sistema 1. Relação ((PA1+PF_e)/POc1).100

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	51	52	52	52
65	2	61	66	---	63
66	3	72	51	87	70
67	4	82	75	64	74
68	5	103	64	73	80
69	6	48	68	50	55
70	7	65	69	60	64
71	8	83	60	56	66
72	9	71	64	---	68
73	10	48	61	90	67
74	11	47	56	60	54
75	12	40	58	63	54
76	13	43	47	54	48
77	14	44	55	42	47
78	15	58	43	50	51
79	16	52	---	---	---
80	17	40	41	---	41
81	18	36	42	46	41
82	19	39	53	35	42
83	20	32	48	67	49
84	21	37	37	53	39
85	22	39	45	53	45
86	23	34	36	49	40
87	24	32	37	50	46

Apêndice 11. Sistema 1. Relação (POcl/Pinor).100 .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	60	58	71	63
65	2	54	53	--	54
66	3	52	60	56	56
67	4	47	50	58	52
68	5	42	54	54	50
69	6	60	52	57	56
70	7	54	53	56	54
71	8	48	56	72	59
72	9	52	54	--	53
73	10	60	55	47	54
74	11	61	57	59	59
75	12	63	56	47	55
76	13	62	60	63	62
77	14	61	56	59	59
78	15	56	63	65	61
79	16	58	--	--	--
80	17	62	63	--	62
81	18	66	63	76	69
82	19	65	58	66	63
83	20	69	60	48	59
84	21	72	66	51	63
85	22	64	62	52	59
86	23	67	66	51	61
87	24	69	56	57	61

Apêndice 12. Sistema 1. Relação Corg/Porg .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	147	154	187	163
65	2	167	143	---	155
66	3	157	155	165	159
67	4	151	134	167	151
68	5	131	144	161	145
69	6	160	135	142	145
70	7	154	131	178	155
71	8	157	146	182	161
72	9	149	155	---	152
73	10	156	166	141	154
74	11	145	146	151	147
75	12	158	148	140	149
76	13	161	170	161	164
77	14	148	147	165	153
78	15	144	198	147	163
79	16	153	190	147	163
80	17	154	156	178	163
81	18	169	168	158	165
82	19	135	124	165	141
83	20	168	124	128	140
84	21	145	140	146	144
85	22	143	134	134	137
86	23	149	139	132	140
87	24	158	134	155	149

Apêndice 13. Sistema 1. Relação N total/Porg .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	12.6	13.7	15.2	13.8
65	2	14.7	12.9	---	13.8
66	3	13.9	13.5	14.2	13.9
67	4	13.4	11.6	14.5	13.2
68	5	11.7	12.6	12.9	12.4
69	6	14.2	12.0	14.2	13.4
70	7	13.4	11.3	14.6	13.1
71	8	14.7	14.6	17.0	15.4
72	9	14.0	13.6	---	13.8
73	10	13.9	14.7	12.5	13.7
74	11	12.9	12.9	11.8	12.6
75	12	11.9	13.6	10.6	12.1
76	13	13.9	12.9	13.6	13.5
77	14	11.9	11.5	13.3	12.2
78	15	11.5	16.0	11.5	13.0
79	16	14.2	14.8	13.4	14.1
80	17	14.9	14.8	15.3	15.0
81	18	13.4	13.5	13.5	13.5
82	19	11.6	10.6	13.2	11.8
83	20	13.8	10.6	11.5	12.0
84	21	13.8	12.9	11.4	12.7
85	22	11.2	12.0	11.1	11.4
86	23	12.8	12.4	9.9	11.7

Apêndice 14. Sistema 1. % N total

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	0.16	0.18	0.17	0.17
65	2	0.18	0.20	0.19	0.19
66	3	0.17	0.19	0.13	0.18
67	4	0.17	0.18	0.17	0.17
68	5	0.17	0.19	0.17	0.18
69	6	0.16	0.18	0.18	0.17
70	7	0.17	0.18	0.18	0.17
71	8	0.18	0.20	0.18	0.19
72	9	0.18	0.19	0.18	0.18
73	10	0.15	0.18	0.17	0.17
74	11	0.14	0.17	0.15	0.15
75	12	0.14	0.16	0.15	0.15
76	13	0.14	0.16	0.16	0.15
77	14	0.14	0.14	0.15	0.14
78	15	0.13	0.15	0.14	0.14
79	16	0.14	0.16	0.17	0.16
80	17	0.14	0.16	0.18	0.16
81	18	0.12	0.14	0.14	0.13
82	19	0.12	0.14	0.13	0.13
83	20	0.11	0.13	0.14	0.13
84	21	0.11	0.14	0.15	0.13
85	22	0.10	0.13	0.13	0.12
86	23	0.12	0.14	0.13	0.13

Apêndice 15. Sistema 1. % Carbono orgânico.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	1.86	2.03	2.09	1.99
65	2	2.04	2.22	2.11	2.13
66	3	1.92	2.18	2.09	2.06
67	4	1.92	2.08	1.96	1.99
68	5	1.91	2.17	2.12	2.07
69	6	1.80	2.03	1.80	1.88
70	7	1.96	2.04	2.13	2.04
71	8	1.92	1.95	1.92	1.93
72	9	1.86	2.12	1.95	1.98
73	10	1.69	2.03	1.92	1.88
74	11	1.57	1.92	1.92	1.80
75	12	1.86	1.74	1.98	1.86
76	13	1.63	2.04	1.89	1.85
77	14	1.74	1.80	1.86	1.80
78	15	1.63	1.86	1.80	1.76
79	16	1.51	2.05	1.86	1.81
80	17	1.45	1.69	2.09	1.74
81	18	1.51	1.74	1.63	1.63
82	19	1.40	1.63	1.63	1.55
83	20	1.34	1.51	1.57	1.47
84	21	1.16	1.51	1.92	1.53
85	22	1.28	1.45	1.57	1.43
86	23	1.40	1.57	1.74	1.57
87	24	1.34	1.57	1.60	1.50

Apêndice 16. Sistema 2. Fósforo total, µg P/g .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	283	303	277	288
65	2	257	303	277	280
66	3	277	310	263	283
67	4	243	310	270	274
68	5	263	323	270	286
69	6	257	310	270	279
70	7	301	317	297	305
71	8	290	330	287	302
72	9	297	323	257	292
73	10	303	324	270	299
74	11	297	310	297	301
75	12	303	330	283	306
76	13	290	323	280	298
77	14	310	310	310	310
78	15	297	297	323	306
79	16	303	310	297	303
80	17	297	323	323	315
81	18	317	310	317	315
82	19	310	303	297	303
83	20	324	337	310	323
84	21	317	330	290	312
85	22	330	337	310	326
86	23	290	310	310	303
87	24	270	323	323	306

Apêndice 17. sistema 2. Fósforo orgânico, µg P/g .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	127	169	118	138
65	2	155	160	---	157
66	3	150	179	113	147
67	4	132	174	118	141
68	5	127	165	118	136
69	6	136	165	103	135
70	7	150	157	115	141
71	8	139	148	115	134
72	9	129	136	113	126
73	10	155	160	85	133
74	11	141	160	89	130
75	12	127	179	103	136
76	13	143	160	99	134
77	14	118	155	98	124
78	15	118	118	75	103
79	16	141	141	94	125
80	17	122	160	89	124
81	18	141	127	113	127
82	19	122	118	103	114
83	20	132	160	89	127
84	21	132	146	85	121
85	22	99	146	89	111
86	23	113	146	103	121
87	24	113	141	79	111

Apêndice 18. Sistema 2. Fósforo inorgânico, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	156	134	159	150
65	2	101	144	---	123
66	3	126	131	150	136
67	4	112	136	152	133
68	5	136	159	152	149
69	6	120	146	167	144
70	7	150	159	182	164
71	8	151	182	171	168
72	9	167	187	144	166
73	10	148	164	185	166
74	11	156	150	207	171
75	12	176	152	180	169
76	13	147	164	181	164
77	14	193	155	212	187
78	15	179	179	248	202
79	16	163	169	203	178
80	17	174	164	234	191
81	18	176	183	204	188
82	19	188	186	193	189
83	20	192	177	221	197
84	21	185	184	205	192
85	22	231	191	221	214
86	23	177	164	207	183
87	24	157	182	244	195

Apêndice 19. Sistema 2. Fosfato de alumínio, $\mu\text{g P/g}$.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	16.9	20.4	20.4	19.2
65	2	13.3	20.4	---	16.9
66	3	13.3	18.6	13.3	15.1
67	4	11.5	16.9	13.3	13.9
68	5	13.3	22.2	18.6	18.0
69	6	13.3	16.9	16.9	15.7
70	7	16.9	20.4	23.1	20.1
71	8	15.1	24.0	24.0	21.0
72	9	19.5	25.7	22.2	22.5
73	10	16.9	22.2	24.0	21.0
74	11	20.4	22.2	24.0	22.2
75	12	18.6	24.0	24.0	22.2
76	13	18.6	17.7	24.8	20.4
77	14	24.0	22.2	20.4	22.2
78	15	20.4	24.0	24.0	22.8
79	16	20.4	18.6	24.0	21.0
80	17	24.0	20.4	27.5	24.0
81	18	27.5	22.2	27.5	25.5
82	19	20.4	22.2	20.4	21.0
83	20	31.1	29.3	32.8	31.1
84	21	20.4	24.0	20.4	21.6
85	22	39.9	29.3	27.5	32.2
86	23	18.6	13.3	20.4	17.4
87	24	16.9	18.6	25.7	20.4

Apêndice 20. Sistema 2. Fosfato de ferro. $\mu\text{g P/g}$.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	41.5	45.0	45.0	43.3
65	2	34.4	45.0	---	39.7
66	3	39.7	45.0	37.9	40.9
67	4	37.9	41.5	39.7	39.7
68	5	43.2	46.8	45.0	45.0
69	6	41.5	43.2	45.0	43.2
70	7	41.5	46.8	55.7	43.0
71	8	41.5	48.5	53.8	47.9
72	9	47.7	53.9	53.0	51.5
73	10	48.6	48.6	52.1	49.7
74	11	48.6	53.9	55.7	52.7
75	12	48.6	53.9	55.7	52.7
76	13	47.7	44.1	57.4	49.7
77	14	52.1	48.6	59.2	53.3
78	15	52.1	52.1	62.8	55.7
79	16	53.9	46.8	59.2	53.3
80	17	55.7	48.6	62.8	55.7
81	18	57.4	48.6	62.8	56.2
82	19	52.1	48.6	53.9	51.5
83	20	57.4	53.9	59.9	60.4
84	21	55.7	52.1	57.4	55.1
85	22	66.3	55.7	64.5	62.2
86	23	48.6	48.6	62.8	53.3
87	24	45.0	48.6	66.3	53.3

Apêndice 21. Sistema 2. Fosfato de cálcio, $\mu\text{g P/g}$.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	20.5	18.7	20.5	19.9
65	2	15.2	17.0	---	16.1
66	3	13.5	17.0	17.0	15.8
67	4	13.5	17.0	17.0	15.8
68	5	17.0	20.5	24.0	20.5
69	6	17.0	17.0	17.0	17.0
70	7	17.0	17.8	20.5	18.4
71	8	15.2	18.7	20.5	18.1
72	9	18.7	20.5	22.2	20.5
73	10	18.7	18.7	20.5	19.3
74	11	20.5	20.5	24.0	21.6
75	12	17.0	22.2	22.2	20.5
76	13	17.0	18.7	23.1	19.6
77	14	22.2	20.5	27.5	23.4
78	15	20.5	20.5	25.7	22.2
79	16	22.2	20.5	24.0	22.2
80	17	22.2	20.5	31.0	24.5
81	18	22.2	20.5	25.7	22.8
82	19	20.5	20.5	27.5	22.8
83	20	24.0	22.2	31.0	25.7
84	21	22.2	22.2	25.7	23.4
85	22	27.5	22.2	31.0	26.9
86	23	20.5	25.7	31.0	25.7
87	24	22.2	22.2	38.0	27.5

Apêndice 22. Sistema 2. Fósforo ocluso, $\mu\text{g P/g}$.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	77.6	50.0	73.3	67.0
65	2	38.6	61.4	---	50.0
66	3	59.8	50.9	82.3	64.3
67	4	48.7	60.9	82.5	64.0
68	5	62.8	69.5	64.8	65.7
69	6	48.5	68.5	87.7	68.2
70	7	74.8	74.3	82.3	77.2
71	8	79.6	90.9	73.3	81.3
72	9	81.5	87.1	46.3	71.6
73	10	64.2	74.2	88.8	75.7
74	11	66.3	53.7	103.9	74.6
75	12	92.3	51.5	78.5	74.1
76	13	63.4	83.1	75.9	74.1
77	14	94.3	63.8	104.9	87.7
78	15	86.2	82.7	135.9	101.6
79	16	66.1	83.2	95.6	81.6
80	17	72.7	74.2	112.9	86.6
81	18	63.6	92.0	88.0	82.9
82	19	94.7	94.7	91.5	93.6
83	20	79.5	71.7	87.1	79.4
84	21	86.9	86.2	101.9	91.6
85	22	97.8	84.0	97.7	93.2
86	23	89.6	76.8	92.6	86.3
87	24	73.1	93.1	114.1	93.4

Apêndice 23. Sistema 2. P disponível-resinas, $\mu\text{g P/g}$.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	20.3	20.9	18.9	20.0
65	2	10.8	18.9	---	14.9
66	3	14.9	17.6	13.5	15.3
67	4	14.2	16.2	13.5	14.6
68	5	17.6	20.3	19.6	19.2
69	6	14.9	14.9	14.2	14.7
70	7	16.2	18.3	14.6	16.4
71	8	14.5	18.6	21.3	18.1
72	9	18.3	22.0	21.0	20.4
73	10	17.6	16.9	21.6	18.7
74	11	17.6	17.6	21.6	18.9
75	12	16.2	20.3	20.3	18.9
76	13	17.6	14.2	23.3	18.4
77	14	20.9	18.2	20.3	19.8
78	15	18.2	20.3	22.3	20.3
79	16	18.2	12.8	20.9	17.3
80	17	22.3	14.2	25.0	20.5
81	18	25.7	12.2	23.0	20.3
82	19	17.6	15.5	20.3	17.8
83	20	23.6	18.9	27.0	23.2
84	21	16.2	16.2	18.2	16.9
85	22	35.1	20.3	22.3	25.9
86	23	15.5	12.2	17.6	15.1
87	24	14.9	14.9	16.2	15.3

Apêndice 24. Sistema 2. P disponível-Bray 1, $\mu\text{g P/g}$.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	15.1	16.6	17.3	16.3
65	2	10.4	14.2	---	12.3
66	3	13.5	14.2	12.8	13.5
67	4	13.5	13.0	12.8	13.1
68	5	13.7	14.7	15.6	14.7
69	6	13.3	11.1	14.2	12.9
70	7	13.8	13.4	17.3	14.8
71	8	13.1	14.5	18.5	15.3
72	9	15.9	16.3	16.5	16.4
73	10	16.1	14.2	18.0	16.1
74	11	15.6	14.2	17.5	15.8
75	12	15.6	15.6	17.5	16.2
76	13	15.8	12.6	19.8	16.0
77	14	21.8	14.7	17.0	17.8
78	15	16.1	15.1	16.8	16.0
79	16	16.6	14.0	17.5	16.0
80	17	19.4	14.2	24.2	19.3
81	18	24.4	13.3	22.2	20.0
82	19	16.6	12.6	14.7	14.6
83	20	23.7	18.9	27.5	23.4
84	21	15.6	13.7	15.6	15.0
85	22	32.6	18.9	23.4	25.0
86	23	16.1	12.3	17.8	15.4
87	24	14.2	17.0	23.2	18.1

Apêndice 25. Sistema 2. Relação $((PAI+PFe)/POCl).100$.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	75	131	89	98
65	2	124	106	---	115
66	3	89	125	62	92
67	4	102	96	64	87
68	5	90	99	98	96
69	6	113	88	71	90
70	7	78	90	96	88
71	8	71	80	106	86
72	9	82	91	162	112
73	10	102	95	86	94
74	11	104	142	77	107
75	12	73	151	101	108
76	13	105	74	108	96
77	14	81	111	76	89
78	15	84	92	64	80
79	16	112	79	87	93
80	17	110	93	80	94
81	18	124	77	103	101
82	19	77	75	81	77
83	20	111	116	118	115
84	21	88	88	76	84
85	22	109	101	94	101
86	23	75	81	90	82
87	24	85	72	81	79

Apêndice 26. Sistema 2. Relação $(POCl/Pinor).100$.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	50	37	46	44
65	2	38	43	---	41
66	3	47	39	55	47
67	4	44	45	54	47
68	5	46	44	43	44
69	6	40	47	53	47
70	7	50	47	45	47
71	8	53	50	43	48
72	9	49	47	32	42
73	10	43	45	48	46
74	11	43	36	50	43
75	12	52	34	44	43
76	13	43	51	42	45
77	14	49	41	49	47
78	15	48	46	55	50
79	16	41	49	47	46
80	17	42	45	48	45
81	18	39	50	43	44
82	19	50	51	47	50
83	20	41	40	39	40
84	21	47	47	50	48
85	22	42	44	44	43
86	23	51	47	45	47
87	24	46	51	47	48

Apêndice 27. Sistema 2. Relação Corg/Porg .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	151	134	158	148
65	2	128	148	---	138
66	3	140	130	185	152
67	4	171	132	202	168
68	5	198	139	163	167
69	6	149	142	202	164
70	7	132	144	169	148
71	8	149	132	152	144
72	9	151	152	168	157
73	10	120	138	206	155
74	11	123	127	208	153
75	12	165	133	192	163
76	13	128	142	183	151
77	14	153	142	177	158
78	15	148	168	239	185
79	16	124	148	167	146
80	17	138	116	195	150
81	18	120	156	144	140
82	19	138	153	152	148
83	20	124	127	169	140
84	21	128	124	193	148
85	22	165	124	182	157
86	23	139	128	158	141
87	24	139	132	186	

Apêndice 28. Sistema 2. Relação N total/ Porg .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	13.4	11.2	13.6	12.7
65	2	11.0	13.2	---	12.1
66	3	12.0	11.2	14.2	12.4
67	4	12.9	11.5	14.5	13.0
68	5	14.2	12.2	14.5	13.6
69	6	13.2	11.5	15.5	13.4
70	7	12.0	12.7	14.3	13.0
71	8	13.0	14.2	14.3	13.8
72	9	14.3	14.7	15.1	14.7
73	10	11.6	11.9	17.7	13.7
74	11	11.3	11.3	15.7	12.8
75	12	12.6	10.6	15.5	12.9
76	13	10.8	11.9	15.2	12.6
77	14	13.6	11.0	14.3	12.9
78		11.9	13.6	18.6	14.7
79		10.7	10.6	14.9	12.1
80	1	13.1	10.6	17.9	13.9
81		10.6	12.6	12.4	11.9
82	19	11.4	14.5	13.5	13.1
83	20	9.9	10.0	14.6	11.5
84	21	10.6	11.0	14.2	11.9
85	22	13.2	11.7	16.6	13.9
86	23	12.4	12.4	13.5	12.8

Apêndice 29. Sistema 2. % N total .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	0.17	0.19	0.16	0.17
65	2	0.17	0.21	---	0.19
66	3	0.18	0.20	0.16	0.18
67	4	0.17	0.20	0.17	0.18
68	5	0.18	0.20	0.17	0.18
69	6	0.18	0.19	0.16	0.18
70	7	0.18	0.20	0.17	0.18
71	8	0.18	0.21	0.17	0.19
72	9	0.19	0.20	0.17	0.19
73	10	0.18	0.19	0.15	0.17
74	11	0.16	0.18	0.14	0.16
75	12	0.16	0.19	0.16	0.17
76	13	0.16	0.19	0.15	0.17
77	14	0.16	0.17	0.14	0.16
78	15	0.14	0.16	0.14	0.15
79	16	0.15	0.15	0.14	0.15
80	17	0.16	0.17	0.16	0.16
81	18	0.15	0.16	0.14	0.15
82	19	0.14	0.17	0.14	0.15
83	20	0.13	0.16	0.13	0.14
84	21	0.14	0.16	0.12	0.14
85	22	0.13	0.17	0.15	0.15
86	23	0.14	0.18	0.14	0.15

Apêndice 30. Sistema 2. % Carbono orgânico .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	1.92	2.27	1.86	2.02
65	2	1.98	2.37	---	2.18
66	3	2.11	2.33	2.09	2.18
67	4	2.25	2.29	2.38	2.31
68	5	2.51	2.29	1.92	2.24
69	6	2.03	2.33	2.09	2.15
70	7	1.98	2.27	1.95	2.07
71	8	2.07	1.95	1.75	1.92
72	9	1.95	2.07	1.89	1.97
73	10	1.86	2.21	1.74	1.94
74	11	1.74	2.03	1.86	1.88
75	12	2.09	2.38	1.98	2.15
76	13	1.84	2.27	1.81	1.97
77	14	1.80	2.21	1.74	1.92
78	15	1.74	1.98	1.80	1.84
79	16	1.74	2.09	1.57	1.80
80	17	1.69	1.86	1.74	1.76
81	18	1.69	1.98	1.63	1.77
82	19	1.69	1.80	1.57	1.69
83	20	1.63	2.03	1.51	1.72
84	21	1.69	1.80	1.63	1.71
85	22	1.63	1.80	1.63	1.69
86	23	1.57	1.86	1.63	1.69
87	24	1.57	1.86	1.48	1.64

Apêndice 31. Sistema 5. Fósforo total, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	277	270	310	286
65	2	283	310	283	292
66	3	283	290	290	288
67	4	277	310	323	303
68	5	---	---	317	---
69	6	270	310	303	294
70	7	---	---	---	---
71	8	277	327	320	308
72	9	310	317	330	319
73	10	303	303	350	319
74	11	337	317	357	337
75	12	290	297	337	308
76	13	297	317	303	306
77	14	290	290	337	306
78	15	310	330	337	326
79	16	310	---	331	320
80	17	310	310	357	326
81	18	337	364	364	355
82	19	310	323	384	339
83	20	350	350	377	359
84	21	323	323	364	337
85	22	377	350	404	377
86	23	317	330	337	328
87	24	377	350	303	344

Apêndice 32. sistema 5. Fósforo orgânico, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	150.4	141.1	141.1	144.2
65	2	145.8	141.0	136.3	141.0
66	3	150.5	136.3	126.9	137.9
67	4	164.5	188.1	136.3	163.0
68	5	---	---	131.6	---
69	6	164.5	174.0	122.2	153.6
70	7	---	---	---	---
71	8	122.2	148.1	112.8	127.7
72	9	164.6	136.3	129.3	143.4
73	10	141.0	136.3	108.1	128.5
74	11	178.7	126.9	122.2	142.6
75	12	164.6	169.3	131.6	155.1
76	13	129.2	164.6	140.0	144.6
77	14	141.0	126.9	122.2	130.1
78	15	150.5	136.3	98.7	128.5
79	16	159.9	---	131.6	145.8
80	17	126.9	141.0	126.9	131.6
81	18	169.2	159.9	126.9	152.0
82	19	178.7	164.6	112.8	152.0
83	20	159.8	134.3	112.8	135.7
84	21	117.5	155.1	131.6	134.8
85	22	159.9	178.7	169.3	169.3
86	23	108.1	145.7	108.1	120.7
87	24	159.9	141.0	112.8	137.9

Apêndice 33. Sistema 5. Fósforo inorgânico, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	126.2	128.9	169.0	141.3
65	2	137.6	169.1	147.0	151.2
66	3	132.9	153.7	163.1	149.9
67	4	112.1	122.0	187.1	140.4
68	5	-----	-----	185.2	-----
69	6	105.4	136.2	181.2	140.9
70	7	-----	-----	-----	-----
71	8	154.4	178.7	207.3	180.2
72	9	145.6	180.5	200.9	175.6
73	10	162.4	167.1	242.1	190.5
74	11	158.2	189.9	234.7	194.3
75	12	125.5	127.5	205.2	152.7
76	13	167.5	152.5	163.4	161.1
77	14	149.0	163.1	214.6	175.6
78	15	159.7	193.8	238.2	197.2
79	16	150.3	-----	199.2	174.7
80	17	183.2	169.1	230.0	194.1
81	18	167.6	203.8	237.0	202.8
82	19	131.5	158.9	270.9	187.1
83	20	190.4	215.9	264.2	223.5
84	21	205.9	168.3	232.0	202.1
85	22	217.2	171.6	234.6	207.8
86	23	208.7	184.4	228.7	207.3
87	24	217.2	209.2	190.6	205.7

Apêndice 34. Sistema 5. Fosfato de alumínio, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	13.3	11.5	13.3	12.7
65	2	15.1	16.9	13.3	15.1
66	3	13.3	13.3	13.3	13.3
67	4	13.3	11.5	16.9	13.9
68	5	-----	-----	13.3	-----
69	6	11.5	13.3	11.5	12.1
70	7	-----	-----	-----	-----
71	8	14.2	15.1	16.0	15.1
72	9	13.3	13.3	16.0	14.2
73	10	13.3	13.3	16.9	14.5
74	11	16.9	15.1	18.6	16.9
75	12	11.5	11.5	13.3	12.1
76	13	13.3	16.0	10.6	13.3
77	14	13.3	13.3	15.1	13.9
78	15	16.9	13.3	18.6	16.3
79	16	16.9	-----	16.9	16.9
80	17	16.9	13.3	24.0	18.0
81	18	22.2	20.4	24.0	22.2
82	19	13.3	13.3	24.0	16.9
83	20	20.4	16.9	24.0	20.4
84	21	15.1	9.8	20.4	15.1
85	22	34.6	25.7	27.5	29.3
86	23	13.3	11.5	13.3	12.7
87	24	32.8	20.4	20.4	24.5

Apêndice 35. Sistema 5. Fosfato de ferro, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	34.4	30.8	32.6	32.6
65	2	32.6	34.4	34.4	33.8
66	3	32.6	30.8	34.4	32.6
67	4	30.8	30.8	39.7	33.8
68	5	---	---	36.1	---
69	6	34.4	34.4	34.4	34.4
70	7	---	---	---	---
71	8	34.4	35.2	42.3	37.3
72	9	36.1	33.5	41.5	37.0
73	10	32.6	34.4	45.0	37.3
74	11	39.7	37.9	45.0	40.9
75	12	34.4	32.6	34.4	33.8
76	13	36.1	36.1	32.6	34.9
77	14	37.9	34.4	41.5	37.9
78	15	39.7	34.4	52.1	42.0
79	16	43.2	---	45.0	44.1
80	17	41.5	36.1	53.9	43.8
81	18	45.0	37.9	52.1	45.0
82	19	37.9	30.8	55.7	41.5
83	20	45.0	36.1	48.6	43.2
84	21	41.5	32.6	48.6	40.9
85	22	59.2	46.8	59.2	55.1
86	23	34.4	32.6	45.0	37.3
87	24	48.6	37.9	41.5	42.6

Apêndice 36. Sistema 5. Fosfato de cálcio, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	13.5	17.0	18.7	16.4
65	2	15.2	17.0	18.7	17.0
66	3	15.2	15.2	18.7	16.4
67	4	13.5	15.2	20.5	16.4
68	5	---	---	17.0	---
69	6	13.5	17.0	17.0	15.8
70	7	---	---	---	---
71	8	16.1	15.2	20.5	17.2
72	9	17.0	19.6	18.7	18.4
73	10	13.5	17.0	25.7	18.7
74	11	20.5	17.0	22.2	19.9
75	12	17.0	15.2	20.5	17.5
76	13	14.3	17.0	16.1	15.8
77	14	18.7	17.0	24.0	19.9
78	15	17.0	17.0	20.5	18.1
79	16	17.0	---	17.0	17.0
80	17	20.5	17.0	20.5	19.3
81	18	24.0	18.7	22.2	21.6
82	19	17.0	20.5	27.5	21.6
83	20	20.5	17.0	25.7	21.0
84	21	18.7	17.0	22.2	19.3
85	22	24.0	22.2	27.5	24.5
86	23	17.0	17.0	24.0	19.3
87	24	27.5	18.7	20.5	22.2

Apêndice 37. Sistema 5. Fósforo ocluso, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	65.1	69.6	104.4	79.7
65	2	74.7	100.9	80.6	85.4
66	3	71.8	94.4	96.7	87.6
67	4	54.5	64.5	110.2	76.4
68	5	---	---	118.8	---
69	6	46.1	71.6	118.3	78.6
70	7	---	---	---	---
71	8	89.8	113.2	128.5	110.5
72	9	79.2	114.1	124.8	106.0
73	10	103.0	102.5	154.6	120.0
74	11	81.3	119.9	148.9	116.7
75	12	62.6	68.1	137.1	89.3
76	13	103.7	83.4	104.1	97.1
77	14	79.1	98.5	134.2	103.9
78	15	86.2	129.2	147.0	120.8
79	16	73.2	---	120.4	96.8
80	17	104.4	102.7	131.7	112.9
81	18	76.5	126.8	138.8	114.0
82	19	63.3	94.4	163.9	107.2
83	20	104.6	146.0	166.0	138.9
84	21	130.7	109.1	140.9	126.9
85	22	99.5	76.9	120.4	98.9
86	23	144.1	123.4	146.5	138.0
87	24	108.4	132.2	108.3	116.3

Apêndice 38. Sistema 5. P disponível-resinas, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	14.9	14.9	16.9	15.6
65	2	17.6	16.9	19.6	18.0
66	3	15.5	16.2	20.9	17.5
67	4	14.2	14.9	23.6	17.6
68	5	---	---	15.5	---
69	6	13.5	17.6	16.9	16.0
70	7	---	---	---	---
71	8	13.5	17.9	19.0	16.8
72	9	15.6	16.2	22.0	17.9
73	10	18.9	17.5	21.6	19.4
74	11	21.6	17.6	23.0	20.7
75	12	12.2	12.2	16.2	13.5
76	13	14.5	16.9	10.5	14.0
77	14	14.9	14.2	16.9	15.3
78	15	14.9	13.5	21.6	16.7
79	16	16.9	---	16.2	16.6
80	17	15.5	13.5	27.0	18.7
81	18	20.9	17.6	25.0	21.2
82	19	14.9	16.2	25.0	18.7
83	20	18.9	18.2	25.7	20.9
84	21	14.9	13.5	19.6	16.0
85	22	29.0	24.3	27.7	27.0
86	23	10.1	9.4	12.2	10.6
87	24	27.4	20.3	12.8	20.2

Apêndice 39. Sistema 5. P disponível-Bray 1, µg P/g.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	9.0	8.8	10.9	9.6
65	2	8.1	15.1	13.7	12.3
66	3	10.4	11.4	14.2	12.0
67	4	10.2	11.4	16.6	12.7
68	5	---	---	11.6	---
69	6	9.0	10.4	9.9	9.8
70	7	---	---	---	---
71	8	11.4	12.1	13.5	12.3
72	9	11.7	10.8	13.0	11.8
73	10	11.8	11.4	14.0	12.4
74	11	12.8	13.3	15.4	13.8
75	12	9.0	9.2	12.1	10.1
76	13	10.9	12.4	9.6	11.0
77	14	12.8	11.6	14.9	13.1
78	15	12.1	10.2	14.4	12.2
79	16	12.8	---	12.8	12.8
80	17	12.3	10.7	18.5	13.8
81	18	19.9	17.5	20.6	19.0
82	19	10.7	9.5	20.8	13.7
83	20	17.8	12.1	20.8	16.9
84	21	14.0	8.3	18.0	13.4
85	22	28.4	19.4	22.7	23.5
86	23	9.5	9.7	12.8	10.7
87	24	25.5	16.6	13.7	18.6

Apêndice 40. Sistema 5. Relação ((PAI+PFe)/POc1).100

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	73.2	60.8	44.0	59.3
65	2	63.8	50.7	59.1	57.9
66	3	63.9	46.7	49.3	53.3
67	4	80.9	65.6	51.3	65.9
68	5	---	---	41.6	---
69	6	99.6	66.6	38.8	68.3
70	7	---	---	---	---
71	8	54.1	44.4	45.4	48.0
72	9	62.4	41.0	46.0	49.8
73	10	44.5	46.5	40.0	43.7
74	11	69.6	44.2	42.7	52.2
75	12	73.3	64.7	34.7	57.6
76	13	47.7	62.5	41.5	50.6
77	14	64.8	48.4	42.1	51.8
78	15	65.6	36.9	48.1	50.2
79	16	82.1	---	51.4	66.1
80	17	55.8	48.1	59.1	54.4
81	18	87.8	46.0	54.8	62.9
82	19	80.9	46.7	48.6	58.7
83	20	62.5	36.3	43.7	47.5
84	21	43.2	38.8	48.9	43.7
85	22	94.3	94.3	72.0	66.9
86	23	33.1	35.8	39.8	36.2
87	24	75.1	44.1	57.1	58.8

Apêndice 41. Sistema 5. Relação (POc1/Pinor).100 .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	51.6	54.0	61.8	55.8
65	2	54.3	59.7	54.9	56.3
66	3	54.0	61.4	59.3	58.3
67	4	48.7	52.9	58.9	53.5
68	5	---	---	64.1	---
69	6	43.7	52.6	65.3	53.9
70	7	---	---	---	---
71	8	58.1	63.3	62.0	61.2
72	9	54.4	63.2	62.1	59.9
73	10	63.5	61.3	63.8	62.9
74	11	51.4	63.2	63.4	59.3
75	12	49.9	53.5	66.8	56.7
76	13	61.9	54.7	63.7	60.1
77	14	53.1	60.4	62.5	58.7
78	15	54.0	66.7	61.7	60.8
79	16	48.7	---	60.4	54.6
80	17	57.0	60.7	57.3	58.3
81	18	45.6	62.2	58.5	55.5
82	19	48.2	59.4	60.5	56.0
83	20	54.9	67.6	62.8	61.8
84	21	63.5	64.8	60.7	63.0
85	22	45.8	44.8	51.3	47.3
86	23	69.0	66.9	64.0	66.7
87	24	49.9	63.2	56.8	56.6

Apêndice 42. Sistema 5. Relação Corg/Porg .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	155	161	169	161
65	2	163	186	183	177
66	3	162	181	206	183
67	4	132	118	209	153
68	5	---	---	185	---
69	6	142	140	186	156
70	7	---	---	---	---
71	8	164	150	194	169
72	9	131	169	183	161
73	10	157	171	220	183
74	11	137	197	214	183
75	12	148	138	199	162
76	13	173	147	171	164
77	14	123	174	195	164
78	15	143	158	224	175
79	16	131	---	163	147
80	17	160	148	160	156
81	18	134	138	174	149
82	19	124	127	185	145
83	20	142	173	196	170
84	21	158	139	177	158
85	22	135	120	151	135
86	23	188	152	199	179
87	24	164	152	170	162

Apêndice 43. Sistema 5. Relação N total/ Porg .

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	12.6	13.5	14.2	13.4
65	2	15.1	16.3	11.7	14.4
66	3	14.6	16.1	18.1	16.3
67	4	13.4	11.7	18.3	14.5
68	5	---	---	16.0	---
69	6	11.5	12.1	16.4	13.3
70	7	---	---	---	---
71	8	17.2	14.5	18.6	16.8
72	9	13.4	16.9	15.9	15.4
73	10	14.2	16.1	18.5	16.3
74	11	12.3	17.3	19.6	16.4
75	12	11.5	11.8	16.0	13.1
76	13	14.7	12.2	13.6	13.5
77	14	13.5	18.1	16.4	16.0
78	15	12.0	13.2	18.2	14.5
79	16	11.3	---	14.4	12.8
80	17	15.0	13.5	15.0	14.5
81	18	11.2	11.9	14.2	12.4
82	19	11.8	12.2	17.7	13.9
83	20	11.9	15.6	18.6	15.4
84	21	15.3	12.2	15.2	14.3
85	22	11.9	10.6	14.2	12.2
86	23	16.6	13.0	19.4	16.4

Apêndice 44. Sistema 5. % N total.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	0.19	0.19	0.20	0.19
65	2	0.22	0.23	0.16	0.20
66	3	0.22	0.22	0.23	0.22
67	4	0.22	0.22	0.25	0.23
68	5	0.21	0.21	0.21	0.21
69	6	0.19	0.21	0.20	0.20
70	7	---	---	---	---
71	8	0.21	0.22	0.21	0.21
72	9	0.22	0.23	0.21	0.22
73	10	0.20	0.22	0.20	0.21
74	11	0.22	0.22	0.24	0.23
75	12	0.19	0.20	0.21	0.20
76	13	0.19	0.20	0.19	0.19
77	14	0.19	0.23	0.20	0.21
78	15	0.18	0.18	0.18	0.18
79	16	0.18	---	0.19	0.19
80	17	0.19	0.19	0.19	0.19
81	18	0.19	0.19	0.18	0.19
82	19	0.21	0.20	0.20	0.20
83	20	0.19	0.21	0.21	0.20
84	21	0.18	0.19	0.20	0.19
85	22	0.19	0.19	0.24	0.21
86	23	0.18	0.19	0.21	0.19

Apêndice 45. Sistema 5. % Carbono orgânico.

Data	Ano	BI	BII	BIII	Media
64	1	2.33	2.27	2.38	2.33
65	2	2.38	2.62	2.49	2.50
66	3	2.43	2.47	2.62	2.51
67	4	2.17	2.21	2.85	2.41
68	5	2.49	2.42	2.43	2.45
69	6	2.33	2.44	2.27	2.35
70	7	---	---	---	---
71	8	2.01	2.22	2.19	2.14
72	9	2.15	2.30	2.36	2.27
73	10	2.21	2.33	2.38	2.31
74	11	2.44	2.50	2.62	2.52
75	12	2.44	2.33	2.62	2.46
76	13	2.24	2.42	2.39	2.35
77	14	1.74	2.21	2.38	2.11
78	15	2.15	2.15	2.21	2.17
79	16	2.09	---	2.15	2.12
80	17	2.03	2.09	2.03	2.05
81	18	2.27	2.21	2.21	2.23
82	19	2.21	2.09	2.09	2.13
83	20	2.27	2.33	2.21	2.27
84	21	1.86	2.15	2.33	2.11
85	22	2.15	2.15	2.56	2.29
86	23	2.03	2.21	2.15	2.13
87	24	2.62	2.15	1.92	2.23

Apêndice 46. Isotherma de adsorção de Fósforo. Sistema 1.
Média de blocos e anos 1986-87.

Aplicado ug P/g	Solução em equilíbrio ug P/ml	Retenção na fase sólida ug P/g	% Retenção na fase sólida
0	0.006	-----	-----
5	0.013	4.93	98.50
25	0.048	24.59	98.34
100	0.772	92.34	92.34
250	5.633	193.73	77.49
500	20.106	298.89	59.80

Apêndice 47. Isotherma de adsorção de Fósforo. Sistema 2.
Média de blocos e anos 1986-87.

Aplicado ug P/g	Solução em equilíbrio ug P/ml	Retenção na fase sólida ug P/g	% Retenção na fase sólida
0	0.018	-----	-----
5	0.027	4.91	98.18
25	0.088	24.30	97.20
100	0.930	90.89	90.89
250	5.943	190.76	76.30
500	20.558	294.60	58.92

Apêndice 48. Isotherma de adsorção de Fósforo. Sistema 5.
Média de blocos e anos 1986-87.

Aplicado ug P/g	Solução em equilíbrio ug P/ml	Retenção na fase sólida ug P/g	% Retenção na fase sólida
0	0.019	-----	-----
5	0.040	4.78	95.86
25	0.101	24.18	96.70
100	0.896	91.23	91.23
250	5.661	193.58	77.43
500	20.051	299.68	59.94