

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**CARBONO E NUTRIENTES NO SOLO E A SUSTENTABILIDADE DO
SISTEMA SOJA-ALGODÃO NO CERRADO BRASILEIRO**

**Aurélio Pavinato
(Tese de Doutorado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**CARBONO E NUTRIENTES NO SOLO E A SUSTENTABILIDADE DO
SISTEMA SOJA-ALGODÃO NO CERRADO BRASILEIRO**

AURÉLIO PAVINATO

Engenheiro-Agrônomo (UFSM)
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de Doutor em
Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil
Janeiro, 2009

AURELIO PAVINATO
Engenheiro Agrônomo - UFSM
Mestre em Ciência do Solo - UFRGS

TESE

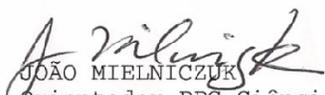
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

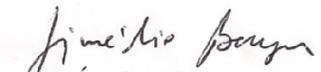
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 09.01.2009
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 19.05.2009
Por


JOÃO MIELNICZUK
Orientador-PPG Ciência do Solo


RENATO LEVIEN
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo


CIMÉLIO BAYER
Departamento de Solos/UFRGS


JEFFERSON DIECKOW
Departamento de Solos/UFPR


FERNANDO MENDES LAMAS
EMBRAPA - Dourados


PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade
de Agronomia

Dedico este trabalho aos meus pais Gentil e Luiza, letrados no campo e visionários na labuta, pelo grande sonho que sempre alimentaram e para minha esposa Taciane e nosso filho Pedro Ricardo, sonhos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao professor João Mielniczuk pela sabedoria e exemplo de comportamento e atitude, pela visão estratégica e espírito construtivista.

À SLC Agrícola S.A. pelo apoio que possibilitou a realização deste curso, tanto na liberação para as aulas, como pela possibilidade de utilizar as áreas experimentais das Fazendas Pamplona, Planalto, Parnaíba e Planorte.

Ao professor Cimélio Bayer pelo apoio em todos os momentos.

Ao professor Alberto Inda Junior (Inda) pela contribuição na caracterização mineralógica do solo e pelo espírito positivo de apoio.

Ao funcionário Luiz Antônio da Silveira (Tonho) pela contribuição nas determinações laboratoriais de C e N e pela boa vontade em ajudar sempre.

Ao meu colega João Paulo Cassol Flores, pelo coleguismo durante o período do curso e pela valiosa contribuição na elaboração gráfica e formatação final da tese.

Ao meu irmão Paulo Sérgio Pavinato, pela parceria e pelo apoio no processamento estatístico dos dados.

A todos os colegas de Pós-Graduação, entre eles Paulo Conceição, Elisandra Oliveira, Fabíola Lopes, Frederico Vieira, Gustavo Tornquist, Josiléia Zanatta, Madalena Boeni, Michely Tomazi e Nilvânia Mello, pelo agradável convívio.

À minha querida esposa Taciane, pelo enorme esforço e abdicção durante estes 4 anos de estudos e pelo apoio permanente.

Ao nosso filho Pedro Ricardo, pela simpatia e sonho de vida realizado.

Enfim, agradeço a todos que de uma ou outra forma contribuíram para a realização do Doutorado e a elaboração desta Tese.

CARBONO E NUTRIENTES NO SOLO E A SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA SOJA-ALGODÃO NO CERRADO BRASILEIRO ^{1/}

Autor: Aurélio Pavinato
Orientador: Prof. Dr. João Mielniczuk

RESUMO

O Cerrado brasileiro representa a grande fronteira agrícola do momento para atender o aumento na demanda mundial por alimentos e fibras. Com o objetivo de avaliar a sustentabilidade técnica da produção de soja e algodão na região do Cerrado sob três sistemas de manejo do solo (preparo convencional-PC, cultivo mínimo-CM e plantio direto-PD), foram utilizados quatro experimentos de longa duração, conduzidos em Luziânia-GO, Costa Rica-MS, Tasso Fragoso-MA e Sapezal-MT, por 13, 11, 5 e 4 anos, respectivamente. Os solos em estudo foram classificados como Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho, com teores de argila de 653, 656, 255 and 452 g kg⁻¹, respectivamente. Os teores e estoques de C e N, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, e os teores de P disponível e de Ca, Mg e K trocáveis nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm foram avaliados. Também foram avaliados a produção de matéria seca e adição de C, a reciclagem de nutrientes das culturas comerciais (soja, milho e algodão) e de cobertura, a produtividade de grãos e fibras das culturas comerciais e o balanço de P, K, Ca e Mg em cada experimento. O cultivo do solo de Cerrado provoca redução dos estoques de C, os quais podem ser recuperados aos seus níveis originais por meio da utilização do PD e de um sistema de rotação de culturas com alta adição de C. Para manter os níveis de estoque de C no solo sob PD, CM e PC, na média dos quatro locais estudados, estima-se que são necessárias adições anuais de C da ordem de 5,0, 5,2 e 6,4 Mg ha⁻¹, respectivamente. A eficiência agrônômica das adubações fosfatadas variaram de 2 a 20%, das adubações potássicas de 70 a 107%, de cálcio entre 47 e 81% e de Mg entre 31 e 91%. Os sistemas de manejo do solo utilizados foram eficientes para garantir altas produtividades das culturas, ainda não havendo diferenciação entre eles na média dos anos. Sistemas de produção com soja e algodão na região do Cerrado, utilizando mínimo revolvimento do solo para evitar presença de erosão, são tecnicamente sustentáveis. Para isso, as culturas utilizadas na rotação de culturas devem adicionar C ao solo em quantidade suficiente para compensar a decomposição da matéria orgânica do solo. Além disso, a fertilização deve atender a exportação de nutrientes pelas culturas e eventuais perdas do sistema.

^{1/} Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. (118 p.) – Janeiro, 2009. Trabalho realizado com apoio financeiro da empresa SLC Agrícola S.A. e do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo-UFRGS.

**CARBON AND NUTRIENTS IN THE SOIL AND THE SUSTAINABILITY OF
SOYBEAN-COTTON PRODUCTION SYSTEM IN THE BRAZILIAN
CERRADO REGION^{1/}**

Author: Aurélio Pavinato
Adviser: João Mielniczuk

ABSTRACT

The Brazilian Savannah (Cerrado) at present represents the greatest agricultural frontier in the world able to supply the increasing demand for food and fiber. With the objective to evaluate the soybean and cotton production and their technical sustainability in the Cerrado under three soil management systems (conventional tillage-CT, minimum tillage-MT and no-tillage-NT), four long term experiments were evaluated, with 13, 11, 5 and 4 years, located, respectively, in Luziânia-Goiás, Costa Rica-Mato Grosso do Sul, Tasso Fragoso-Maranhão and Sapezal-Mato Grosso, , with clay content of 653, 656, 255 and 452 g kg⁻¹, respectively. All soils were classified as Typic Hapludox. The soils were sampled in 5 layers: 0-5; 5-10, 10-20; 20-40 and 40-60 cm, and determined the C and N concentrations and stocks up to 20 cm, labile P and exchangeable K, Ca and Mg in all depths. Moreover, the dry matter production, C input and nutrients recycling from the cash crops (soybean, corn and cotton) and cover crops were measured. The crop yields from the cash crops also were evaluated. With all these data the P, K, Ca and Mg balance in the soil were calculated. The annual crops production in the Cerrado soils causes losses of the soil C stocks, but it can be recovered up to the original level using soil conservative system (no till) and a crop rotation system with high C input. For sustaining the C stock levels in the soils under NT, MT and CT are necessary C additions of 5.0, 5.2 and 6.4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectively. The agronomic efficiency for P and K fertilization, and Ca and Mg additions were between 2-20%, 70-107%, 47-81% and 31-91%, respectively. The soil management systems were efficient in sustaining high crop yields without difference among them in the average of the years. Production systems with soybean and cotton, using minimum soil tillage for avoid soil erosion, are sustainable in the Cerrado region. For this, the C addition by the cash crops and cover crops in the rotation systems have to add enough amount of C to compensate SOM decomposition. Besides that, the fertilization should supply at least the crop nutrient exportation and eventual losses.

^{1/} Doctoral Thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brazil. (118p.) – January, 2009. Research supported by the company SLC Agrícola S.A.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Caracterização do clima e do solo do Cerrado	4
2.2. Sustentabilidade do sistema de produção agrícola no Cerrado	8
3. CAPÍTULO II: MATERIAL E MÉTODOS GERAL	15
3.1. Caracterização geral.....	15
3.2. Caracterização, amostragem e determinações no solo.....	25
3.3. Amostragem e determinações nas culturas.....	29
4. CAPÍTULO III: ESTUDO I – CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO E A SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA DE PRODUÇÃO COM SOJA-ALGODÃO NO CERRADO BRASILEIRO	31
4.1. Introdução.....	31
4.2. Material e Métodos	34
4.3. Resultados e Discussão	37
4.3.1. Concentrações e estoques de C e N no solo	37
4.3.2. Adições de C e N pelas espécies comerciais e de cobertura de solo.....	47
4.3.3. Simulação de estoques de C em função do manejo do solo e da rotação de culturas	57
4.4. Conclusões	66
5. CAPÍTULO IV: ESTUDO II - EVOLUÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO NO CERRADO BRASILEIRO	67
5.1. Introdução.....	67
5.2. Material e Métodos	68
5.3. Resultados e Discussão	77
5.3.1. Indicadores de correção da acidez do solo	77
5.3.2. Balanço de P e K.....	85
5.3.3. Balanço de Ca e Mg.....	93
5.3.4. Produtividade das culturas	99
5.4. Conclusões	108
6. CONCLUSÕES GERAIS	109
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
9. RESUMO BIOGRÁFICO	118

RELAÇÃO DE TABELAS

Página

1. Distribuição da precipitação anual na região do Cerrado ¹	5
2. Distribuição da altitude na região do Cerrado (Hipsometria).	6
3. Dados gerais das áreas experimentais	16
4. Sistema de rotação de culturas no experimento de manejo do solo na Fazenda Pamplona – Luziânia/GO	18
5. Sistema de rotação de culturas no experimento de manejo do solo na Fazenda Planalto – Costa Rica/MS	19
6. Sistema de rotação de culturas no experimento de manejo do solo na Fazenda Parnaíba – Tasso Fragoso/MA.....	20
7. Sistema de rotação de culturas no experimento de manejo do solo na Fazenda Planorte – Sapezal/MT	21
8. Demonstrativo operacional de condução da área experimental localizada em Luziânia para as safras de 2005/06 e 2006/07	22
9. Demonstrativo operacional de condução da área experimental localizada em Costa Rica para as safras de 2005/06 e 2006/07 ...	22
10. Demonstrativo operacional de condução da área experimental localizada em Tasso Fragoso para as safras de 2005/06 e 2006/07	23
11. Demonstrativo operacional de condução da área experimental localizada em Sapezal para as safras de 2005/06 e 2006/07	23
12. Estande de plantas (plantas ha ⁻¹) em dois anos agrícolas (2005/06 e 2006/07) nas áreas experimentais (Luziânia, Costa Rica, Tasso Fragoso e Sapezal) submetidas a três manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).....	24
13. Médias mensais de precipitação pluviométrica, em milímetros, nas áreas experimentais (Luziânia 1963-2007; Costa Rica 1984-2007; Tasso Fragoso 1989-2007 e; Sapezal 1994-2007) ...	24
14. Atributos químicos do solo, coletado em 2005, nas áreas experimentais, na camada de 0-20 cm, em 2005, anteriormente à implantação das culturas de cobertura do solo ..	25
15. Distribuição granulométrica da TFSA e mineralogia qualitativa da fração argila do solo, amostrado em 2005, (Hm= hematita, Gt= goethita, Gb= gibbsita e Ct= caulinita) em diferentes locais do Cerrado brasileiro	26
16. Teores de ferro, alumínio e silício do solo, amostrado em 2005, extraídos seletivamente com ácido sulfúrico (t= totais), com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (d= ditionito) e oxalato de amônio (o= oxalato), razões entre os teores de ferro e índice Ki na fração terra fina seca ao ar em diferentes locais do Cerrado brasileiro	27
17. Teores de ferro, alumínio e silício do solo, amostrado em 2005, extraídos seletivamente com ácido sulfúrico (t= totais), com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) de sódio (d= ditionito) e oxalato de amônio (o= oxalato), razões entre os teores de ferro e índice Ki na fração argila em diferentes locais do Cerrado brasileiro	27

18. Densidade do solo (Mg m^{-3}), avaliada em 2005, em áreas experimentais do Cerrado brasileiro, submetidas a diferentes manejos de solo	35
19. Estoques de carbono e nitrogênio no solo, avaliados em 2005, em áreas experimentais localizadas no Cerrado brasileiro, submetidas a diferentes manejos (PC= preparo convencional, PD= plantio direto, Cer= cerrado).....	41
20. Valores do índice k_2 para áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) e estimativa entre o início da exploração agrícola e a implantação dos experimentos	43
21. Seqüestro de carbono, na camada de 0-20 cm, em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos do solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) e com altas adições de carbono ao solo.....	47
22. Carbono acumulado na matéria seca da parte aérea da soja (kg ha^{-1}) e adicionado ao solo em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo	48
23. Carbono acumulado na matéria seca da parte aérea do algodão (kg ha^{-1}) e adicionado ao solo em áreas experimentais do Cerrado submetidas a manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo.....	48
24. Carbono acumulado na matéria seca da parte aérea do milho (kg ha^{-1}) e adicionado ao solo em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo	49
25. Carbono acumulado na matéria seca da parte aérea (kg ha^{-1}) das culturas de cobertura, para diferentes épocas, em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo ((PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto).....	51
26. Quantidade média de carbono adicionada ao solo (Mg ha^{-1}) em áreas experimentais do Cerrado, submetida a manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto)	52
27. Nitrogênio absorvido pela cultura da soja e exportado no grão (kg ha^{-1}) em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo.....	54
28. Nitrogênio absorvido pela cultura do algodão e exportado no caroço e pluma (kg ha^{-1}) em áreas experimentais do Cerrado, submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo	55
29. Nitrogênio absorvido pela cultura do milho e exportado no grão	

(kg ha ⁻¹) em áreas experimentais do Cerrado, submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo.....	55
30. Reciclagem de nitrogênio (kg ha ⁻¹) pelas culturas de cobertura do solo, em diferentes épocas, em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo ((PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) ..	56
31. Planejamento de rotação de culturas para proporcionar baixas e altas adições de carbono ao solo em diferentes locais do Cerrado.....	59
32. Adições de carbono (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹) necessárias para manter os estoques de carbono do solo nos níveis observados em 2005 para áreas experimentais no Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto).....	65
33. Exportação de fósforo (convertido para P ₂ O ₅), de potássio (convertido para K ₂ O), cálcio e magnésio para diferentes culturas.....	69
34. Resumo do balanço de fósforo para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).....	70
35. Resumo do balanço de potássio para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).....	70
36. Resumo do balanço de cálcio para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto)	71
37. Resumo do balanço de magnésio para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).....	71
38. Teores de fósforo disponível do solo (mg dm ⁻³), em diferentes épocas, para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto)	73
39. Teores de potássio trocável do solo (mg dm ⁻³), em diferentes épocas, para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto)	74
40. Teores de cálcio trocável do solo, em diferentes épocas, para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).....	75
41. Teores de magnésio trocável do solo, em diferentes épocas, para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).....	76

42. Eficiência agronômica de utilização de fósforo, potássio, cálcio e magnésio em quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto). 91

RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

1. Mapa dos biomas brasileiros com a localização do Cerrado.	4
2. Precipitação pluviométrica no Cerrado Oeste, Centro e Leste.	5
3. Isotermas médias do Brasil.....	6
4. Classes de solos na região do Cerrado.	7
5. Distribuição espacial das áreas com cobertura natural e antrópica na região do Cerrado.....	8
6. Distribuição do bioma cerrado no território brasileiro (em destaque) e localização das áreas experimentais	15
7. Teores de carbono orgânico total (a e d), nitrogênio total (b e e) e relação C:N (c e f) do solo, avaliados em 2005, nos experimentos de Luziânia e Costa Rica. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo Teste DMS 5%. ns= não significativo	39
8. Teores de carbono orgânico total (a e d), nitrogênio total (b e e) e relação C:N (c e f) do solo, avaliados em 2005, nos experimentos de Tasso Fragoso e Sapezal. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo Teste DMS 5%. ns= não significativo	40
9. Estoques de carbono (a e c) e nitrogênio (b e d) do solo, avaliados em 2005, nos experimentos de Luziânia e Costa Rica. Barras seguidas da mesma letra dentro da mesma camada, não se diferenciam entre si pelo Teste DMS 5%. ns= não significativo... ..	44
10. Estoques de carbono (a e c) e nitrogênio (b e d) do solo, avaliados em 2005, nos experimentos de Tasso Fragoso e Sapezal. Barras seguidas da mesma letra dentro da mesma camada, não se diferenciam entre si pelo Teste DMS 5%. ns= não significativo	45
11. Estoques de carbono no solo em três sistemas de manejo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e estimativas desses estoques para sistemas de culturas em condições de baixa (a) e alta (b) adição de carbono ao solo após o ano de 2005 para a área experimental de Luziânia	60
12. Estoques de carbono no solo em três sistemas de manejo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e estimativas desses estoques para sistemas de culturas em condições de baixa (a) e alta (b) adição de carbono ao solo após o ano de 2005 para a área experimental de Costa Rica.....	61
13. Estoques de carbono no solo em três sistemas de manejo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e estimativas desses estoques para sistemas de culturas em condições de baixa (a) e alta (b) adição de carbono ao solo após o ano de 2005 para a área experimental de Tasso Fragoso .	62
14. Estoques de carbono no solo em três sistemas de manejo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e estimativas desses estoques para sistemas de culturas em condições de baixa (a) e alta (b) adição de carbono ao solo após o ano de 2005 para a área experimental de Sapezal	63

15. Valores de pH-H ₂ O no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa, em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	78
16. Saturação por bases no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa, em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).	78
17. Valores de pH-H ₂ O no perfil do solo de Cerrado amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	79
18. Saturação por bases no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	79
19. Valores de pH-H ₂ O no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	80
20. Saturação por bases no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	80
21. Valores de pH-H ₂ O no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	81
22. Saturação por bases no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	81
23. Saturação por alumínio no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	83
24. Saturação por alumínio no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	83
25. Saturação por alumínio no perfil do solo de Cerrado, amostrado	

em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	84
26. Saturação por alumínio no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%)	84
27. Teores de fósforo disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo.....	86
28. Teores de potássio disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).....	86
29. Teores de fósforo disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo	87
30. Teores de potássio disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).....	87
31. Teores de fósforo disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).....	88
32. Teores de potássio disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).....	88
33. Teores de fósforo disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo.	89
34. Teores de potássio disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo	89

35. Teores de cálcio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).....	94
36. Teores de magnésio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo.....	94
37. Teores de cálcio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).....	95
38. Teores de magnésio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).....	95
39. Teores de cálcio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).....	96
40. Teores de magnésio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo.....	96
41. Teores de cálcio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).....	97
42. Teores de magnésio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).....	97
43. Rendimento de grãos de soja, em vários anos agrícolas, nas áreas experimentais de Luziânia-GO e Costa Rica-MS. Barras seguidas da mesma letra em cada ano agrícola não se diferenciam entre si pelo Teste de Duncan (5%).....	100
44. Rendimento de grãos de soja, em quatro anos agrícolas, nas áreas experimentais de Tasso Fragoso-MA e Sapezal-MT. Barras seguidas da mesma letra em cada ano agrícola não se diferenciam entre si pelo Teste de Duncan (5%).....	102
45. Rendimento de grãos de milho, em vários anos agrícolas, nas áreas experimentais de Luziânia-GO e Costa Rica-MS. Barras seguidas da mesma letra em cada ano agrícola não se	

diferenciam entre si pelo Teste de Duncan (5%).....	103
46. Rendimento de grãos de milho (a) e algodão em caroço (b) em vários anos agrícolas, na área experimental de Tasso Fragoso-MA. Barras seguidas da mesma letra em cada ano agrícola não se diferenciam entre si pelo Teste de Duncan (5%)	104
47. Rendimento de algodão em caroço, em vários anos agrícolas, nas áreas experimentais de Costa Rica-MS e Sapezal-MT. Barras seguidas da mesma letra em cada ano agrícola não se diferenciam entre si pelo Teste de Duncan (5%).....	105
48. Produção total das culturas principais em vários anos agrícolas em quatro áreas experimentais do Cerrado: Luziânia (soja e milho), Costa Rica (soja, milho e algodão), Tasso Fragoso (soja, milho e algodão) e Sapezal (soja e algodão); submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto). ns= diferenças não significativas (Teste de DMS 5%).....	107

1. INTRODUÇÃO GERAL

A ocupação agrícola do Cerrado brasileiro tem sido uma necessidade brasileira e mundial. A melhoria das condições econômicas e a utilização de produtos agrícolas como fonte de combustíveis têm provocado acelerado crescimento na demanda. O Cerrado brasileiro é a grande fronteira agrícola mundial da atualidade, onde existem condições técnicas e econômicas favoráveis à expansão da produção agrícola. De acordo com Macedo (1996), de uma área total de 207 milhões de hectares do Cerrado, 70 milhões possuem aptidão agrícola para exploração com culturas anuais, mostrando o potencial de expansão da atividade agrícola nessa região, considerando que atualmente são cultivados somente entre 20 e 22 milhões de hectares.

Quando se avalia a utilização da região do Cerrado para cultivo de culturas anuais, a grande preocupação que surge é sobre a sustentabilidade da produção de culturas anuais nas condições edafoclimáticas típica das regiões tropicais. Considerando que sustentabilidade pressupõe a manutenção do “*statuo quo*”, ou sua melhoria, e considerando a fragilidade do bioma Cerrado, quanto à degradação do solo, restam ainda muitas dúvidas sobre quais seriam os sistemas de manejo do solo mais adequados a este ambiente.

Dentre as principais culturas de grãos exploradas no Cerrado, a soja é a que ocupa maior área. Na safra 94/95 foram cultivados 5,8 milhões de hectares e na safra 2007/08 essa área passou para 11,8 milhões de hectares (CONAB, 2008). A reduzida produção de matéria seca e a baixa adição de carbono ao sistema solo têm sido as principais preocupações em relação à sustentabilidade da cultura da soja neste ambiente tropical. Além da soja, outra espécie que tem apresentado notável expansão na região do Cerrado é o algodoeiro, que também aporta baixa quantidade de resíduos vegetais ao solo,

o qual tem baixa relação C:N, sendo rapidamente decomposto. Na safra 1994/95 foram cultivados apenas 270 mil hectares na região do Cerrado e na safra 2007/08 essa área passou para 920 mil hectares (CONAB, 2008). A expansão da produção de algodão no Cerrado foi motivada por diversos fatores, entre os quais, topografia, possibilitando a mecanização completa do processo produtivo, regime de chuvas para obtenção de algodão de alta qualidade e maior organização técnica e administrativa do produtor, possibilitando obter alta produtividade.

Porém, quando se analisa o sistema produtivo nesta região, surgem indagações e preocupações sobre a sustentabilidade da rotação soja-algodão. Associado às baixas adições de C, o manejo do solo em preparo convencional utilizado, principalmente nos primeiros anos de cultivo após abertura do Cerrado, acentua o problema. A utilização dessa tecnologia de manejo do solo por muitos anos tem provocado erosão, alta taxa de mineralização da matéria orgânica e redução da qualidade do solo.

O clima quente, com temperaturas médias elevadas em todos os meses do ano e a alta umidade durante o período chuvoso (5 a 8 meses), cria condições para uma alta taxa de mineralização da matéria orgânica. A ausência de chuvas entre maio e setembro dificulta a produção de matéria seca com espécies utilizadas como culturas de cobertura de solo. Por isso, é necessário desenvolver sistemas de rotação de culturas comerciais, associadas com a utilização de espécies para cobertura do solo na entressafra, para aumentar a adição de C e, ao mesmo tempo, utilizar o mínimo revolvimento do solo para reduzir a taxa de mineralização do C adicionado ao sistema. Nesse sentido, o plantio direto apresenta-se como uma boa alternativa para o manejo do solo, porém a sua expansão tem sido limitada pela dificuldade de se produzir culturas de cobertura, favorecendo o adensamento do solo e perda de potencial produtivo.

Os solos do Cerrado são originalmente de baixa fertilidade. Para atingir alta produtividade são necessárias correções pesadas com calcário, fósforo, potássio, enxofre e micronutrientes, demandando expressivos investimentos de capital e energia. A evolução da fertilidade do solo é um indicador importante de sustentabilidade do sistema de produção, tanto no sentido de uso dos fertilizantes de forma mais eficiente, quanto na avaliação das

possíveis perdas e respectivas conseqüências técnicas, econômicas e ambientais.

Pelo exposto, verifica-se que a sustentabilidade do sistema de produção de soja e algodão em regiões tropicais é frágil. Com essa temática em mente, foi desenvolvido o presente trabalho com o objetivo de avaliar o efeito de sistemas de manejo do solo e de culturas sobre a dinâmica de carbono e nitrogênio do solo e sobre o balanço da fertilidade no Cerrado brasileiro, com o objetivo de definir tecnologias de produção sustentáveis para esta região.

2. CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Caracterização do clima e do solo do Cerrado

O Cerrado brasileiro está localizado em região tipicamente tropical (Figura 1), com abrangência desde próximo da linha do Equador até próximo do trópico de Capricórnio. Segundo a classificação de Köppen, o clima é tropical (Aw), com estações chuvosa e seca bem definidas. Normalmente chove de setembro/outubro a abril/maio, havendo períodos de quatro a sete meses sem chuvas e a precipitação anual é de 600 a 2200 mm, de acordo com cada região (Tabela 1). A Figura 2 representa a distribuição da precipitação pluviométrica nas regiões produtoras de culturas anuais nos Estados do Mato Grosso, Goiás e Maranhão. Em 81,6% da área do Cerrado chove acima de 1200 mm anuais, condição na qual normalmente não há déficit significativo de água para as culturas comerciais cultivadas, não sendo, portanto, um fator restritivo para o aumento da área cultivada (Tabela 1).

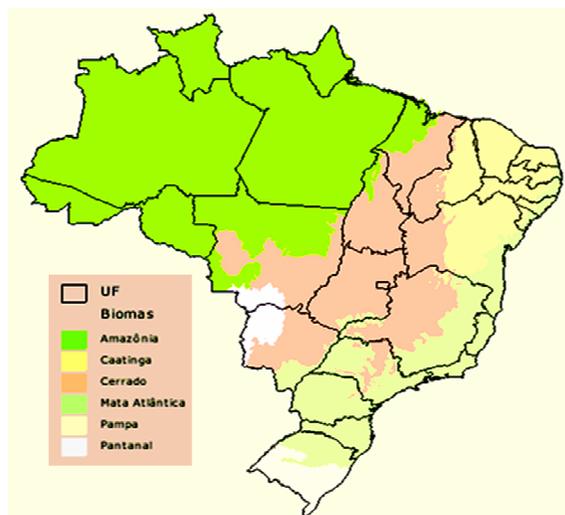


FIGURA 1. Mapa dos biomas brasileiros com a localização do Cerrado. Fonte: (IBGE, 2008).

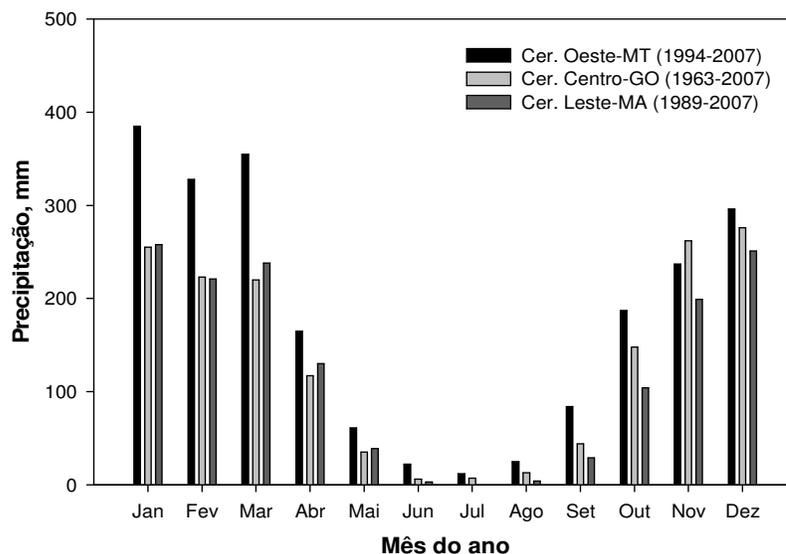


FIGURA 2. Precipitação pluviométrica no Cerrado Oeste, Centro e Leste. Fonte: Dados fornecidos pela SLC Agrícola S.A.

TABELA 1. Distribuição da precipitação anual na região do Cerrado¹.

Classe (mm)	Superfície	
	km ²	%
600 a 800	36.6677	1,8
800 a 1000	132.444	6,5
1000 a 1200	205.798	10,1
1200 a 1400	450.312	22,1
1400 a 1600	442.161	21,7
1600 a 1800	436.041	21,4
1800 a 2000	215.986	10,6
2000 a 2200	118.181	5,8
Total	2.037.600	100

¹ Fonte: Adámoli et al. (1987)

Outra característica importante do Cerrado brasileiro é a altitude, sendo que em torno de 57 milhões de hectares estão localizados em chapada, com mais de 600 m de altitude (Tabela 2), fator importante para amenizar as altas temperaturas, especialmente durante a noite, reduzindo a taxa respiratória das plantas, conseqüentemente, acumulando mais fotoassimilados e aumentando o potencial produtivo.

TABELA 2. Distribuição da altitude na região do Cerrado (Hipsometria).

Classe (m)	Superfície	
	km ²	%
0 a 300	444.196,8	21,8
300 a 600	1.022.875,2	50,2
600 a 900	458.460,0	22,5
900 a 1200	105.955,2	5,2
Mais de 1200	6.112,8	0,3
Total	2.037.600,0	100

¹ Fonte: Adámoli et al. (1987)

Uma característica comum a todos os ambientes tropicais, quer sejam secos, estacionais ou úmidos, de alta ou de baixa altitude, é a isoterma, constituída pelas pequenas diferenças entre as médias de temperatura dos meses mais frios e dos mais quentes (Adámoli et al., 1987). A temperatura média anual no Cerrado situa-se entre 19 e 27°C, dependendo da altitude e latitude, como pode ser observado na Figura 3.

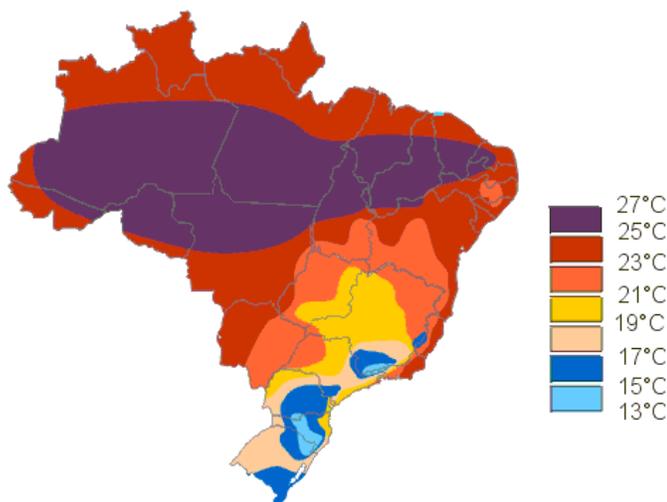


FIGURA 3. Isotermas médias do Brasil.

O Cerrado possui grande proporção de solos com potencial para cultivo agrícola, dependendo da localização geográfica e da topografia, havendo predomínio de Latossolos 45,7%, Neossolos 15,2% e Argissolos 15,1% (Figura 4).

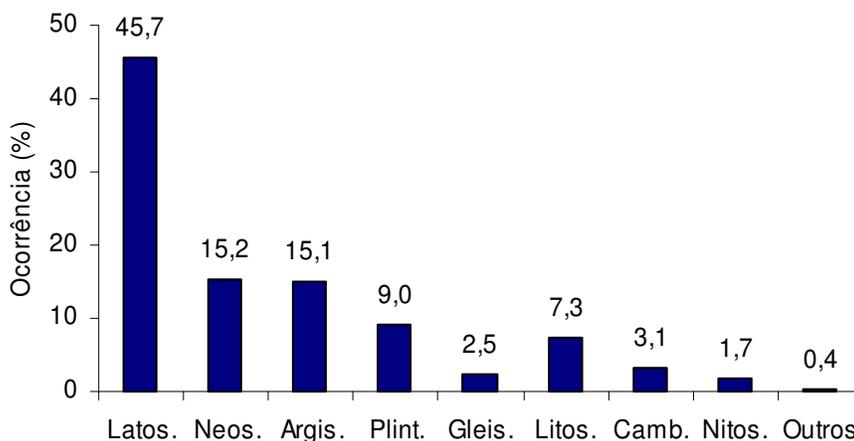


FIGURA 4. Classes de solos na região do Cerrado. (Correia et al., 2002).

Macedo (1996) estimou que 80% dos Latossolos, 50% dos Argissolos, 30% dos Cambissolos, 80% dos Gleissolos e 30% dos Neossolos, apresentam potencial para exploração agrícola com lavoura ou pecuária, totalizando 136 milhões de hectares na região do Cerrado. Como a agricultura utiliza os melhores solos, grande parte da exploração agrícola acontece em Latossolos, mas devido à localização geográfica e a proximidade de centros comerciais, área significativas de solos mais frágeis também poderão ser utilizados para agricultura, aumentando o risco de erosão e degradação do solo.

Quanto à vegetação do Cerrado, dos 123,7 milhões de hectares de cobertura vegetal natural deste bioma, calculada em 2004, a maior parte (61%) é ocupada por áreas com aspectos savânicos (áreas de estrato gramíneo com distribuição de árvores e arbustos sem a formação de um dossel contínuo ou descontínuo), vindo na seqüência a fisionomia florestal (32%), seguida pela campestre (7%) (Edital-Probio, 2004). Na Figura 5 é apresentado um mapa da distribuição espacial das áreas com cobertura natural e antrópica do Cerrado, que nos dá uma idéia da concentração da atividade agrícola na região.

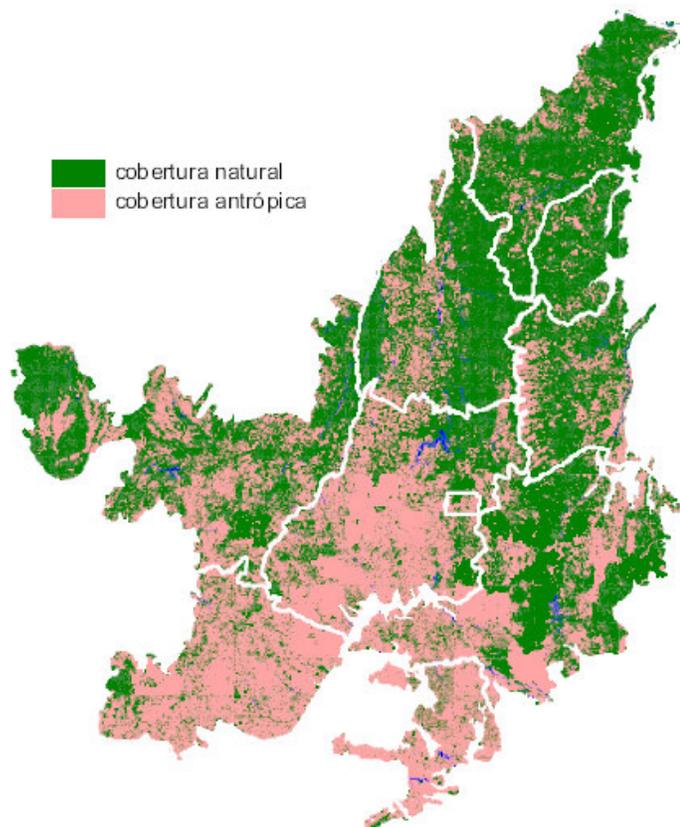


FIGURA 5. Distribuição espacial das áreas com cobertura natural e antrópica na região do Cerrado. Fonte: Edital-Probio 02/2004.

2.2. Sustentabilidade do sistema de produção agrícola no Cerrado

Analisando-se a evolução histórica da relação do homem com o ambiente e considerando a produção de alimentos e o enfoque agrônômico desta relação, pode-se separar a evolução em quatro momentos históricos distintos. Num primeiro momento, o grande desafio do homem foi produzir alimentos e fibras em quantidade suficiente para suprir a demanda das populações. Toda a energia era direcionada para atender a carência alimentar que as populações freqüentemente enfrentavam. A Revolução Verde, pós-segunda guerra mundial, criou as condições favoráveis para aumentar a produção de alimentos e gerar até mesmo excedentes. O segundo momento foi um aperfeiçoamento do primeiro, ou seja, produzir alimentos e fibras de forma

sustentável, mantendo o sistema produtivo para as gerações futuras e sem degradar o meio ambiente. Concomitante com o segundo surge o terceiro momento, focado na especificidade das regiões tropicais, o desafio é produzir alimentos e fibras de forma sustentável em regiões tropicais, consideradas regiões com ecossistemas frágeis, habitada por populações pobres e famintas. No 4º e último momento, que está em plena fase de consolidação, o desafio é produzir alimentos, fibras e energia de forma sustentável. O avanço do conhecimento internacional (Sanchez, 1976; Greenland et al., 1992; Lal, 2002), associado ao desenvolvimento tecnológico gerado no Brasil, especialmente pela EMBRAPA, trouxe respostas positivas em relação ao potencial produtivo do Cerrado brasileiro, região tipicamente tropical. Os resultados produtivos obtidos eram favoráveis, mas existiam, e ainda existem, dúvidas em relação à sustentabilidade do sistema de produção agrícola no longo prazo. O componente energia assume papel preponderante como gerador de demanda, ampliando a discussão da viabilidade de produzir alimento e energia para atender a demanda mundial de forma sustentável.

O primeiro desafio perdurou por séculos e está estritamente associado com a história das civilizações e das disputas por territórios com maior riqueza natural, onde era possível extrair do ambiente o máximo de riquezas ou o máximo de alimentos. Mas o grande avanço histórico na produtividade das terras, e conseqüente na produção de alimentos, foi conseguido através da Revolução Verde. O desenvolvimento do melhoramento genético, o aumento do uso da irrigação e a introdução da tecnologia da fertilização química e do controle de pragas e doenças com agroquímicos proporcionaram ganhos extraordinários de produtividade (FAO, 2004).

O segundo desafio na história da produção de alimentos é produzir alimentos e fibras de forma sustentável. Ele surgiu quando se percebeu que o cultivo intensivo dos solos estava provocando grande degradação, que os recursos naturais são esgotáveis e que as conquistas de aumento na produção de alimentos não deveriam ser efêmeras e sim se perpetuar no longo prazo. No levantamento da história evolutiva da ISTRO (*International Soil and Tillage Research Organization*), fundada em 1955, realizado por Lal (2001), ficou evidenciado que a sustentabilidade do sistema de produção é uma preocupação recente do corpo científico da ciência do solo. Até 1970 todos os temas dos

simpósios realizados pela ISTRO enfocavam como fazer um melhor cultivo do solo. Depois disso se passou a discutir cultivo reduzido, plantio direto, compactação do solo e temas relacionados, mas somente no encontro de 1991 o tema sustentabilidade entrou em discussão como tema central. Ainda segundo Lal (2001), o uso sustentável dos recursos naturais, especialmente do solo e da água, foi a maior preocupação durante os anos 80 e 90, sendo que na última década entrou o tema qualidade do solo como importante fator para medir a sustentabilidade agrícola.

Concomitantemente com as discussões da sustentabilidade da produção agrícola mundial, surge o terceiro desafio, que é produzir alimentos de forma sustentável em clima tropical. O pensamento dominante até a década de 80 era de que os solos tropicais são pobres em matéria orgânica e pouco produtivos (Sanchez, 1976). Viabilizar a produção de alimentos nesta condição edafoclimática, onde a atividade biológica é intensa e a matéria orgânica é decomposta rapidamente, além da ocorrência de chuvas com alta erosividade, era e continua sendo o grande desafio.

A partir de então, começaram a ser publicados estudos mostrando que os solos tropicais apresentam propriedades diferenciadas dos solos temperados, porém com capacidade similar de acumular matéria orgânica. Sanchez (1976) comparou vários solos tropicais da América do Sul e da África com solos de clima temperado da América do Norte e Europa e chegou a conclusão de que as variações no teor de matéria orgânica entre solos da mesma classe são insignificantes. Os mitos sobre as limitações dos solos tropicais foram tão fortes que levou a Sociedade Americana de Ciência do Solo a organizar o livro *Myths and Science of Soils of the Tropics*. No capítulo 2 desse livro, Greenland et al. (1992) discutem a importância e a velocidade em que as reações acontecem em condições tropicais e ajudam a definir a dinâmica da matéria orgânica neste ambiente.

O quarto desafio ficou muito bem caracterizado nos últimos anos. O agravamento do aquecimento global provocado pela emissão de gases de efeito estufa, oriundos principalmente da queima de combustíveis fósseis, gera a necessidade da mudança da base energética mundial para fontes renováveis. A agricultura não será mais uma grande produtora de alimentos e fibras e sim uma grande produtora de alimentos, fibras e energia. É um novo desafio para os

cientistas da ciência do solo porque provavelmente áreas consideradas secundárias para a produção de alimentos serão incorporadas ao sistema produtivo para atender a demanda deste novo mercado. O desafio será como produzir de forma sustentável nestes ambientes, utilizando terras consideradas marginais (Lal, 2006). A condição atual do Cerrado brasileiro se enquadra nos dois últimos desafios e este trabalho foi conduzido considerando esse enfoque.

Para Lal & Pierce (1991), existem vários conceitos para agricultura sustentável e não há uma simples definição amplamente aceita e adequada. Uma definição usada comumente é a proposta pelo *Technical Advisory Committee to the Consultative Group on International Agricultural Research*, que diz o seguinte: “agricultura sustentável deve envolver o manejo bem sucedido dos recursos para satisfazer as mudanças nas necessidades humanas enquanto mantém ou melhora a qualidade do ambiente e conserva os recursos naturais”. Esse conceito transmite um enfoque bastante ambiental e considera o ambiente como fator central. Produzir de forma sustentável não pressupõe a utilização de baixa quantidade de insumos e sim o balanço entre as entradas e saídas do sistema. Um segundo conceito com visão diferente do primeiro é o de Addiscott (1995). Para esse autor, o que interessa é que o sistema atinja um estado estável (*steady state*). Agricultura em preparo convencional, ou ainda em monocultivo, pode ser uma das opções mais sustentáveis que existe, mas deve atender as quatro seguintes condições: (1) o sistema deve atingir um estado estável; (2) o fluxo dentro do sistema, particularmente de nitrogênio, deve ser de magnitude apropriada; (3) a capacidade de auto-organização deve ser mantida no sistema, isto significa ter certeza que o potencial biológico é mantido e; (4) a manutenção do estado estável não deve envolver excessivo gasto de energia, e produção de entropia, fora do sistema, com fertilizantes industrializados, por exemplo.

No início da década de 90, pesquisadores de países desenvolvidos, preocupados com as mudanças ambientais globais, provocadas pela interação de degradação ambiental e crescimento populacional, propuseram um consórcio de agências internacionais e nacionais para desenvolver um sistema de avaliação do manejo sustentável das terras (*Framework for Evaluation of Sustainable Land Management-FESLM*). A *International Board for Research and Management (IBSRAM)* organizou um workshop em 1991, onde foi formado um

grupo de trabalho (*International Working Group-IWG*) para elaborar o projeto (Smyth & Dumanski, 1995). Os autores citam afirmações de Goodland (1991), mostrando que o crescimento econômico tinha ultrapassado os limites ecológicos, como podia ser evidenciado por alguns dos seguintes sinais: o impacto das atividades humanas no aquecimento global, a deterioração da camada de ozônio, as crescentes taxas de degradação do solo e perda de biodiversidade. No contexto do *FESLM*, para o *IGW*, manejo sustentável do solo foi definido como a combinação de tecnologias, políticas e atividades direcionadas para a integração de princípios sócio-econômicos com preocupação ambiental simultaneamente. Esse conceito está baseado em cinco pilares:

- *Produtividade* – manter ou elevar a produção/serviço;
- *Segurança* – reduzir o nível de risco na produção;
- *Proteção* – proteger a qualidade e o potencial dos recursos naturais e prevenir a degradação do solo e da água;
- *Viabilidade* – ser economicamente viável;
- *Aceitabilidade* – ser socialmente aceitável.

Dentro desta mesma linha de pensamento, Doran (2002) separa a sustentabilidade em aspectos econômicos, ambientais e sociais. Para atingir sustentabilidade, é necessário que todos estes aspectos sejam atendidos.

Na medida em que a discussão de sustentabilidade foi sendo ampliada e o seu conceito consolidado, surgiu a necessidade de definir indicadores para avaliar a sustentabilidade. De acordo com o *FESLM*, atributos indicadores de valor são aqueles que simultaneamente: (1) refletem mudanças ambientais, econômicas e sociais importantes para o sucesso contínuo de sistemas específicos de uso da terra; (2) mostre estável e razoavelmente previsível resposta a mudanças, sem significar flutuação em curto período ou distância; (3) são medidas claras de uma causa tendo boa compreensão do efeito; (4) podem ser medidos e expressos em termos numéricos.

Em 1996, a Sociedade Americana de Ciência do Solo lançou um livro sobre metodologia para avaliar a qualidade do solo (Doran & Jones, 1996), onde descreve todos os indicadores possíveis de utilização, englobando indicadores químicos, físicos e biológicos do solo. Os indicadores para medir a sustentabilidade do sistema de produção devem ser práticos, de fácil avaliação,

custo baixo e que podem ser repetidos freqüentemente. Segundo Islam & Weil (2000), os indicadores podem ser divididos em três grandes grupos: (1) os efêmeros, cujas alterações ocorrem em curto espaço de tempo ou são modificados pelas práticas de cultivo (umidade do solo, densidade, pH, disponibilidade de nutrientes); (2) os permanentes, que são inerentes ao solo (profundidade, camadas restritivas, textura, mineralogia) e; (3) os indicadores intermediários, localizados entre esses dois extremos, que demonstram uma crítica influência da capacidade do solo em desempenhar suas funções (agregação, biomassa microbiana, quociente respiratório, carbono orgânico total e ativo). Para estes autores, os indicadores intermediários são os de maior importância para integrarem um índice de qualidade do solo, conforme resumido por Conceição et al. (2005).

Para avaliar a qualidade do solo foi necessário desenvolver indicadores que fossem capazes de detectar as variações no solo em função de variações no manejo ou alterações pelo uso. Para Doran & Parkin (1994), nossa habilidade para identificar propriedades básicas do solo, que servem como indicadores da qualidade é limitada, devido a vários fatores físicos, químicos e biológicos envolvidos e suas interações, variando em intensidade, no tempo e no espaço. Os autores ainda reforçam que os modelos para definir qualidade do solo devem ser holísticos e não reducionistas, e devem ser acessíveis para a maioria possível de pessoas e não ficar limitado a um seleto grupo de cientistas. Pesquisadores que trabalham na área de manejo do solo têm estudado a utilização da matéria orgânica como principal indicador de qualidade do solo (Reeves, 1987, Mielniczuk, 1989).

No Brasil os trabalhos para avaliar qualidade do solo e sustentabilidade do sistema de produção ainda são escassos. No sul do Brasil, a Universidade Federal de Santa Maria e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul estão desenvolvendo trabalhos sobre o tema (Vezzani, 2001; Conceição, 2002), mas no Cerrado os trabalhos de pesquisa são escassos e mais direcionadas a avaliar o efeito do manejo do solo sobre as características e propriedades de forma isolada, sem fazer associação com a sustentabilidade do sistema de produção dentro do conceito apresentado por Addiscott (1995), de atingir um estado estável em termos de balanço energético. São vários os indicadores para avaliar a qualidade do solo, mas para Mielniczuk (1999) é

consenso em considerar a matéria orgânica do solo (MOS) como indicador de qualidade do solo devido a dois fatores. Primeiro, o teor de MOS é sensível às práticas de manejo, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais, onde nos primeiros anos de cultivo mais de 50% da MOS previamente acumulada é perdida por diversos processos, entre esses, a decomposição microbiana e a erosão (Sanchez, 1976; Dalal & Mayer, 1986; Greenland et al., 1992; Andreux, 1996; Piccolo, 1996). Segundo, a maioria dos atributos do solo e do ambiente relacionados às funções básicas do solo, tem estreita relação com a MOS (Doran & Parkin, 1994). Trabalho desenvolvido por Conceição (2002), com base em experimentos de longa duração conduzidos no Rio Grande do Sul, mostrou que a matéria orgânica realmente é um bom indicador de qualidade do solo. Reeves (1997) também reforçou que o carbono é o mais importante indicador da qualidade do solo e sustentabilidade agrônômica devido ao seu impacto nos outros indicadores físicos, químicos e biológicos de qualidade do solo

A partir da visão holística de qualidade do solo, conceitos até então utilizados na literatura ecológica passaram a fazer parte das discussões na ciência do solo. Seybold et al. (1999) descreveram o conceito de resiliência do solo, como sendo um componente fundamental da qualidade do solo, da seguinte maneira: estabilidade próximo a um estado estável de equilíbrio. O conceito de resiliência deu origem ao conceito de resistência, que seria a capacidade que o solo apresenta de resistir a mudanças. Em outras palavras, resiliência seria a capacidade que o solo apresenta de retornar à condição de estabilidade inicial e resistência a capacidade em manter-se no estado inicial.

Mais recentemente, Doran & Zeiss (2000) lançaram o conceito de saúde do solo, como sendo a capacidade que o solo apresenta de funcionar como um sistema vivo vital, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade das plantas e animais, manter ou melhorar a qualidade do ar e da água, e promover a saúde das plantas e animais. Segundo os autores, o desafio futuro é identificar ou desenvolver sistemas de manejo sustentáveis os quais serão a vanguarda para a saúde do solo e a sustentabilidade da produção agrícola. A hipótese deste trabalho é de que a redução do revolvimento do solo e a utilização de rotação de culturas são condições mínimas necessários para desenvolver sistemas de produção de soja e algodão sustentáveis na região do Cerrado brasileiro.

3. CAPÍTULO II: MATERIAL E MÉTODOS GERAL

3.1. Caracterização geral

O bioma Cerrado engloba 24% do território brasileiro, abrangendo regiões com condições edafoclimáticas distintas. Por isso, para melhor caracterizá-lo foram utilizados, no presente estudo, quatro experimentos instalados em quatro locais representativos do Cerrado: Luziânia-GO (16°15'02" S e 47°37'02" W), Costa Rica-MS (18°15'10" S e 53°12'41" W), Tasso Fragoso-MA (8°30'77" S e 46°3'47" W) e Sapezal-MT (13°56'33" S e 58°53'43") (Figura 6).

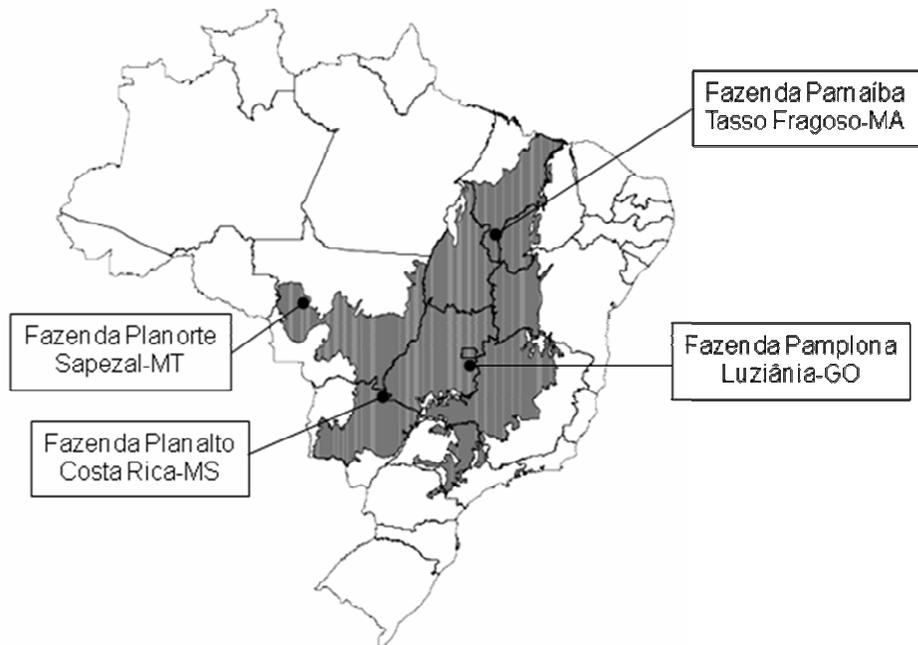


FIGURA 6. Distribuição do bioma cerrado no território brasileiro (em destaque) e localização das áreas experimentais.

Os experimentos estão instalados em fazendas pertencentes à empresa SLC Agrícola S.A., e consistem de três sistemas de manejo do solo: preparo convencional (PC), cultivo mínimo (CM) e plantio direto (PD), com três repetições em todos os locais. O PC consiste no preparo do solo através de, normalmente, 2 operações de gradagem, o cultivo mínimo em apenas uma operação de escarificação e o plantio direto no plantio sem preparo do solo. Na Tabela 3 são apresentados dados gerais das áreas experimentais. Para comparação com os sistemas de manejo adotados no presente estudo, foi amostrada a área de cerrado mais próximo do experimento, com topografia e solo similar, sendo esta área utilizada como o sistema natural de referência.

TABELA 3: Dados gerais das áreas experimentais.

Local	Ano de abertura do Cerrado	Ano de início dos experimentos	Altitude --- m ---	Tipo de Solo
Luziânia	1977	1992	981	LVA ¹
Costa Rica	1974	1994	790	LV ²
Tasso Fragoso	1990	2000	614	LVA
Sapezal	1997	2001	642	LV

¹ Latossolo Vermelho amarelo

² Latossolo Vermelho

Antes da instalação dos experimentos, as áreas de Luziânia e Costa Rica foram cultivadas sob preparo convencional, com gradagem pesada, por 15 e 20 anos, respectivamente, tendo como cultura principal a soja no verão, sendo cultivado milho em três oportunidades em cada local, enquanto que no inverno, estação seca, o solo era mantido sob pousio.

Em Tasso Fragoso, após a abertura do cerrado (safra 1990/91), foi cultivada soja em sistema convencional de preparo do solo, usando-se geralmente uma gradagem pesada e uma intermediária ou niveladora, até o ano agrícola de 1994/95. A partir de então foram cultivados soja (1995/96), milho (1996/97) e soja (1997/98 e 1998/99) sob plantio direto. Na safra 1999/00 o solo da área experimental foi gradeado com uma grade pesada, seguida de uma intermediária, a fim de homogeneizar as condições do solo para a implantação dos distintos manejos do solo (2000/01), dando início ao experimento.

No mesmo ano agrícola da abertura do cerrado em Sapezal (safra 1997/98) foi cultivada a cultura da soja, sendo o solo preparado com uma

gradagem pesada e uma intermediária. No ano agrícola seguinte, foi cultivado algodão em plantio direto. Nas safras de 1999/00 e 2000/01 foi cultivada soja, em plantio direto em 1999/00 e com uma gradagem pesada e uma intermediária em 2000/01. No ano seguinte então foi implantado o experimento com a diferenciação dos manejos de solo na área.

O delineamento experimental utilizado em todos os locais foi o de blocos ao acaso com três repetições. Em 2005, após a colheita da cultura principal da safra 2004/05 e da amostragem de solo, os blocos foram divididos em subparcelas, nas quais passou-se a plantar diferentes espécies de cobertura, com o objetivo de criar níveis diferenciados de adição de C ao solo. As Tabelas 4 a 7 mostram a rotação de culturas adotada nas áreas experimentais. As subparcelas apresentavam dimensões de 11,3 x 150 m, 9,6 x 110 m, 7,3 x 82 m e 8,3 x 107 m (largura x comprimento) em Luziânia, Costa Rica, Tasso Fragoso e Sapezal, respectivamente.

As culturas cultivadas nos experimentos foram das seguintes espécies: soja (*Glycine max* L.), milho (*Zea mays* L.), algodão (*Gossypium hirsutum* L.), crotalária (*Crotalaria juncea* L.), braquiária (*Braquiaria ruziziensis* L.), milheto (*Pennisetum glaucum* L.) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.).

Nas Tabelas 8 a 11 são apresentados resumos das principais práticas utilizadas, insumos aplicados e atividades desenvolvidas nas áreas experimentais durante a condução dos experimentos nas safras de 2005/06 e 2006/07, período posterior a inclusão das plantas de cobertura nos experimentos.

Na Tabela 12 é apresentado a população de plantas das culturas comerciais para as safras 2005/06 e 2006/07 nas áreas experimentais para os diferentes sistemas de manejo de solo e de culturas. Na Tabela 13 são apresentados os dados médios de precipitação pluviométrica registrados ao longo dos anos nas fazendas onde se localizam as áreas experimentais.

Para atender aos objetivos do presente estudo, foram avaliados atributos de solo e das culturas utilizadas, cujas avaliações são descritas na seqüência.

TABELA 4. Sistema de rotação de culturas no experimento de manejo do solo na Fazenda Pamplona – Luziânia/GO.

Manejo do Solo	Tratamentos	----- Ano agrícola e culturas -----					
		----- 2004/05 -----		----- 2005/06 ¹ -----		----- 2006/07 ¹ -----	
		1º safra	2º safra	1º safra	2º safra	1º safra	2º safra
Plantio direto	1	Soja		Milho	Dessecação periódica ²	Soja precoce	Dessecação periódica ²
Plantio direto	2	Soja		Milho	Milheto	Soja precoce	Milheto
Plantio direto	3	Soja		Milho	Braquiária	Soja precoce	Braquiária
Cultivo Mínimo	4	Soja		Milho	Braquiária	Soja precoce	Braquiária
Cultivo Mínimo	5	Soja		Milho	Milheto	Soja precoce	Milheto
Cultivo Mínimo	6	Soja		Milho	Dessecação periódica ²	Soja precoce	Dessecação periódica ²
Preparo Convencional	7	Soja		Milho	Dessecação periódica ²	Soja precoce	Dessecação periódica ²
Preparo Convencional	8	Soja		Milho	Milheto	Soja precoce	Milheto
Preparo Convencional	9	Soja		Milho	Braquiária	Soja precoce	Braquiária
Veg. Natural	10	Cerrado		Cerrado		Cerrado	

¹ Safra 05/06 Milho híbrido P30K75 e soja 06/07 variedade BRS Valiosa.

² Dessecado com campânula para evitar deriva paras as demais parcelas.

TABELA 5. Sistema de rotação de culturas no experimento de manejo do solo na Fazenda Planalto – Costa Rica/MS.

Manejo do Solo	Tratamentos	----- Ano agrícola e culturas -----						
		2004/05		2005/06 ¹		2006/07 ¹		
		1º safra	2º safra	1º safra	2º safra	1º safra	2º safra	
Plantio direto	1	Algodão		Soja precoce		Dessecação periódica ²		Algodão
Plantio direto	2	Algodão		Soja precoce		Milheto		Algodão
Plantio direto	3	Algodão		Soja precoce		Braquiária		Algodão
Plantio direto	4	Algodão		Soja precoce		Crotalária juncea		
Plantio direto	5	Algodão		Soja precoce		Milho safrinha	Nabo	Algodão
Cultivo Mínimo	6	Algodão		Soja precoce		Milho safrinha	Nabo	Algodão
Cultivo Mínimo	7	Algodão		Soja precoce		Crotalária juncea		
Cultivo Mínimo	8	Algodão		Soja precoce		Braquiária		Algodão
Cultivo Mínimo	9	Algodão		Soja precoce		Milheto		Algodão
Cultivo Mínimo	10	Algodão		Soja precoce		Dessecação periódica ²		Algodão
Prep. Convencional	11	Algodão		Soja precoce		Dessecação periódica ²		Algodão
Prep. Convencional	12	Algodão		Soja precoce		Milheto		Algodão
Prep. Convencional	13	Algodão		Soja precoce		Braquiária		Algodão
Prep. Convencional	14	Algodão		Soja precoce		Crotalária juncea		
Prep. Convencional	15	Algodão		Soja precoce		Milho safrinha	Nabo	Algodão
Veg. Natural	16	Cerrado				Cerrado		Cerrado

¹ Safra 05/06 soja variedade Msoy 6101 e safra 06/07 algodão variedade FMT 701.

² Dessecado com campânula para evitar deriva para as demais parcelas.

TABELA 6. Sistema de rotação de culturas no experimento de manejo do solo na Fazenda Parnaíba – Tasso Fragoso/MA.

Manejo do Solo	Tratamentos	----- Ano agrícola e culturas -----					
		----- 2004/05 -----		----- 2005/06 ¹ -----		----- 2006/07 ¹ -----	
		1º safra	2º safra	1º safra	2º safra	1º safra	2º safra
Plantio direto	1	Algodão		Soja precoce	Dessecação periódica ²	Milho	
Plantio direto	2	Algodão		Soja precoce	Milheto	Milho	
Plantio direto	3	Algodão		Soja precoce	Braquiária	Milho	
Cultivo Mínimo	4	Algodão		Soja precoce	Braquiária	Milho	
Cultivo Mínimo	5	Algodão		Soja precoce	Milheto	Milho	
Cultivo Mínimo	6	Algodão		Soja precoce	Dessecação periódica ²	Milho	
Preparo Convencional	7	Algodão		Soja precoce	Dessecação periódica ²	Milho	
Preparo Convencional	8	Algodão		Soja precoce	Milheto	Milho	
Preparo Convencional	9	Algodão		Soja precoce	Braquiária	Milho	
Veg. Natural	10	Cerrado		Cerrado		Cerrado	

¹ Safra 05/06 soja variedade P98C81 e safra 06/07 milho híbrido P30K64.

² Dessecado com campânula para evitar deriva para as demais parcelas.

TABELA 7. Sistema de rotação de culturas no experimento de manejo do solo na Fazenda Planorte – Sapezal/MT.

Manejo do Solo	Tratamentos	----- Ano agrícola e culturas -----					
		----- 2004/05 -----		----- 2005/06 ¹ -----		----- 2006/07 ¹ -----	
		1º safra	2º safra	1º safra	2º safra	1º safra	2º safra
Plantio direto	1	Soja	Dessecação periódica ²	Algodão		Soja prec.	Dessecação periódica ²
Plantio direto	2	Soja	Milheto	Algodão		Soja prec.	Milheto
Plantio direto	3	Soja	Braquiária	Algodão		Soja prec.	Braquiária
Plantio direto	4	Soja	Milho safrinha	Algodão		Soja prec.	Milho safrinha
Plantio direto	5	Soja	Milho safrinha	Nabo	Algodão	Soja prec.	Milho safrinha
Cult. Mínimo	6	Soja	Milho Saf./Braquiária		Algodão	Soja prec.	Milho Safr./Braquiária
Cult. Mínimo	7	Soja	Milho Saf./Braquiária		Algodão	Soja prec.	Milho Saf./Braquiária
Cult. Mínimo	8	Soja	Milho safrinha	Nabo	Algodão	Soja prec.	Milho safrinha
Cult. Mínimo	9	Soja	Milho safrinha		Algodão	Soja prec.	Milho safrinha.
Cult. Mínimo	10	Soja	Braquiária		Algodão	Soja prec.	Braquiária
Cult. Mínimo	11	Soja	Milheto		Algodão	Soja prec.	Milheto
Cult. Mínimo	12	Soja	Dessecação periódica ²		Algodão	Soja prec.	Dessecação periódica ²
Prep. Conv.	13	Soja	Dessecação periódica ²		Algodão	Soja prec.	Dessecação periódica ²
Prep. Conv.	14	Soja	Milheto		Algodão	Soja prec.	Milheto
Prep. Conv.	15	Soja	Braquiária		Algodão	Soja prec.	Braquiária
Prep. Conv.	16	Soja	Milho safrinha		Algodão	Soja prec.	Milho safrinha
Prep. Conv.	17	Soja	Milho safrinha	Nabo	Algodão	Soja prec.	Milho safrinha
Prep. Conv.	18	Soja	Milho Saf./Braquiária		Algodão	Soja prec.	Milho Saf./Braquiária
Veg. Natural	19		Cerrado		Cerrado		Cerrado

¹ Var. algodão 05/06 BRS-Cedro e soja 06/07 CD-217. ² Dessecado com campânula para evitar deriva paras as demais parcelas.

TABELA 8. Demonstrativo operacional de condução da área experimental localizada em Luziânia para as safras de 2005/06 e 2006/07.

Atividade	Manejos do solo		
	PC ¹	CM ²	PD ³
----- 2005/06 - Milho (Híbrido P30K75) -----			
Gradagem Pesada	05/10/05	-	-
Gradagem Intermediária	10/10/05	-	-
Escarificação	-	05/10/05	-
Plantio	21/10/05	21/10/05	21/10/05
Adubação Base (NPK 08-30-15), kg ha ⁻¹	420	420	420
Adubação a lanço (Sulfato de Amônio), kg ha ⁻¹	105	105	105
Adubação a lanço (KCl), kg ha ⁻¹	250	250	250
Adubação a lanço (Uréia), kg ha ⁻¹	220	220	220
----- 2006/07 – Soja (Cultivar BRS Valiosa) -----			
Gradagem Pesada	14/11/2006	-	-
Gradagem Intermediária	14/11/2006	-	-
Escarificação	-	13/11/2006	-
Plantio	24/11/2006	24/11/2006	24/11/2006
Plantio culturas de cobertura	13/03 e 03/04/2007	13/03 e 03/04/2007	13/03 e 03/04/2007
Adub. de Base (Superfosfato Simples), kg ha ⁻¹	197	197	197
Adubação a lanço (KCl), kg ha ⁻¹	60	60	60

¹ PC= preparo convencional² CM= cultivo mínimo³ PD= plantio direto**TABELA 9.** Demonstrativo operacional de condução da área experimental localizada em Costa Rica para as safras de 2005/06 e 2006/07.

Atividade	Manejos do solo		
	PC ¹	CM ²	PD ³
----- 2005/06-Soja (Cultivar Msoy 6101) -----			
Gradagem Pesada	05/10/05	-	-
Gradagem Intermediária	10/10/05	-	-
Escarificação	-	05/10/05	-
Plantio	21/10/05	21/10/05	21/10/05
Adubação Base (SFS 00-18-00), kg ha ⁻¹	200	200	200
Adubação foliar (Mn 14), L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0
Adubação Cobertura (KCl 00-00-60), kg ha ⁻¹	60	60	60
----- 2006/07 - Algodão (Cultivar FMT 701) -----			
Gradagem Pesada	25/09/06	-	-
Gradagem Intermediária	13/12/06	-	-
Escarificação	-	25/09/06	-
Plantio	14/12/06	14/12/06	14/12/06
Adub. de Base (Superfosfato Simples), kg ha ⁻¹	148	148	148
Adub. de Base (MAP), kg ha ⁻¹	120,5	120,5	120,5
Adubação Foliar (Mn 14), L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0
Adub. de Cobertura (Sulfato de Amônio), kg ha ⁻¹	161	161	161
Adub. de Cobertura (KCl), kg ha ⁻¹	150	150	150
Adub. de Cobertura (Uréia), kg ha ⁻¹	165	165	165

¹ PC= preparo convencional ² CM= cultivo mínimo ³ PD= plantio direto

TABELA 10. Demonstrativo operacional de condução da área experimental localizada em Tasso Fragoso para as safras de 2005/06 e 2006/07.

Atividade	Manejos do solo		
	PC ¹	CM ²	PD ³
----- 2005/06- Soja (Cultivar P-98C81) -----			
Gradagem Pesada	31/10/05	-	-
Gradagem Intermediária	31/10/05	-	-
Escarificação	-	31/10/05	-
Plantio	19/11/05	19/11/05	19/11/05
Adubação de base(NPK 03-28-00), kg ha ⁻¹⁽⁴⁾	220,0	220,0	220,0
Adubação foliar (Mn 14), L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0
Adubação foliar (Molibdato de Sódio), L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0
Adubação (KCl), kg ha ⁻¹	100,0	100,0	100,0
----- 2006/07 – Milho (Híbrido P30K64) -----			
Gradagem Pesada	04/10/06	-	-
Gradagem Média	10/10/06	-	-
Escarificação	-	25/11/06	-
Plantio	05/12/06	05/12/06	05/12/06
Adubação (MAP), kg ha ⁻¹	200	200	200
Adubação (Sulfato de Amônio), kg ha ⁻¹	170	170	170
Adubação (KCl), kg ha ⁻¹	150	150	150
Adubação (Uréia), kg ha ⁻¹	170	170	170
Adubação foliar (Solubor), kg ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0
Adubação foliar (Profol 14% Mn), L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0

¹ PC= preparo convencional

² CM= cultivo mínimo

³ PD= plantio direto

⁴ 03-28-00 + 12,6%Ca + 8%S + 0,3%Zn + 0,2%B + 0,5%Cu + 0,6%Mn + 0,03%Mo.

TABELA 11. Demonstrativo operacional de condução da área experimental localizada em Sapezal para as safras de 2005/06 e 2006/07.

Atividade	Manejos do solo		
	PC ¹	CM ²	PD ³
----- 2005/06- Algodão (Cultivar BRS Cedro) -----			
Gradagem Pesada	16/11/05	-	-
Gradagem Média	09/12/05	-	-
Escarificação	-	23/03/05	-
Plantio	17/12/05	17/12/05	17/12/05
Adu. de Base (NPK 06-36-00), kg ha ⁻¹	400	400	400
Adubação a lanço (KCl), kg ha ⁻¹	210,0	210,0	210,0
Adu. Cobertura (Sulfato de Amônio), kg ha ⁻¹	300	300	300
Adubação (Uréia), kg ha ⁻¹	200	200	200
----- 2006/07 – Soja (Cultivar CD-217) -----			
Gradagem Pesada	14/09/06	-	-
Gradagem Média	14/09/06	-	-
Escarificação	-	20/05/06	-
Plantio	17/09/06	17/09/06	17/09/06
Adu. Cobertura (Superfosfato Simples), kg ha ⁻¹	250	250	250
Adubação (KCl), kg ha ⁻¹	70	70	70
Adubação a lanço (KCl), kg ha ⁻¹	210	210	210

¹ PC= preparo convencional

² CM= cultivo mínimo

³ PD= plantio direto

TABELA 12. População de plantas (plantas ha⁻¹) em dois anos agrícolas (2005/06 e 2006/07) nas áreas experimentais (Luziânia, Costa Rica, Tasso Fragoso e Sapezal) submetidas a três manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).

Cultura de Cobertura	----- Luziânia -----			----- Costa Rica -----			-- Tasso Fragoso --			----- Sapezal -----		
	PC	CM	PD	PC	CM	PD	PC	CM	PD	PC	CM	PD
	----- 2005/06 – Milho -----			----- 2005/06 – Soja -----			----- 05/06 – Soja -----			----- 2005/06 – Algodão -----		
Brachiária	56.790	56.790	58.848	273.259	265.333	305.333	237.037	243.621	251.852	69.231	76.190	72.527
Milheto	55.967	56.790	60.494	294.519	261.111	302.370	244.444	250.206	256.790	72.161	86.081	86.081
Crotalaria	-	-	-	270.519	255.704	305.111	-	-	-	-	-	-
Milho safrinha +nabo	-	-	-	275.556	272.000	302.667	-	-	-	70.696	74.725	82.051
Milho safr.+Brachiária	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75.092	81.685	85.714
Milho Safrinha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71.062	67.399	88.645
Dessecação periódica	55.556	57.407	60.288	286.370	254.000	297.037	242.798	244.444	255.967	72.894	85.714	86.447
	----- 2006/07 – Soja -----			--- 2006/07 – Algodão ---			----- 2006/07 – Milho -----			----- 2006/07 – Soja -----		
Brachiária	217.284	210.700	204.938	80.952	85.348	90.476	60.000	54.815	58.519	312.088	306.227	325.275
Milheto	218.930	217.284	215.638	89.744	64.835	90.110	60.741	55.556	60.741	299.634	315.751	327.473
Crotalaria	-	-	-	82.418	91.941	100.733	-	-	-	-	-	-
Milho safrinha +nabo	-	-	-	87.546	94.505	110.256	-	-	-	313.553	310.623	323.077
Milho safr.+Brachiária	-	-	-	-	-	-	-	-	-	310.623	316.484	320.147
Milho Safrinha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	312.821	313.553	302.564
Dessecação periódica	213.169	213.992	208.230	93.773	93.773	101.832	58.519	54.815	50.370	317.949	313.553	323.077

TABELA 13. Médias mensais de precipitação pluviométrica, em milímetros, nas áreas experimentais (Luziânia 1963-2007; Costa Rica 1984-2007; Tasso Fragoso 1989-2007 e; Sapezal 1994-2007).

Local	Meses do ano												Total
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	
Luziânia	255	223	220	117	35	6	7	13	44	148	262	276	1606
Costa Rica	302	254	286	165	72	22	17	35	79	166	248	291	1937
Tasso Fragoso	258	221	238	130	39	3	0	4	29	104	199	251	1476
Sapezal	385	328	355	165	61	22	12	25	84	187	237	296	2157

3.2. Caracterização, amostragem e determinações no solo

A coleta das amostras de solo para as avaliações de atributos químicos e da densidade do solo ocorreu ao final da safra 2004/05, logo após a colheita das culturas de verão.

Para caracterização dos atributos químicos das áreas experimentais foram determinados os valores de pH-H₂O, de acidez potencial (H+Al), da

Tabela 14. Atributos químicos do solo, amostrado em 2005, nas áreas experimentais, na camada de 0-20 cm (média das camadas 0-5, 5-10 e 10-20cm), em 2005, anteriormente à implantação das culturas de cobertura do solo.

Manejo do solo	pH-H ₂ O	H+Al	Al	Ca	Mg	K	P	MO	CTC _{pH=7}	V
			cmol _c dm ⁻³				ppm	%	cmol _c dm ⁻³	%
----- Luziânia -----										
Plantio direto	6,1	2,6	0,0	2,9	1,6	0,17	8,8	2,2	7,2	61
Cultivo mínimo	6,3	2,4	0,0	2,9	1,5	0,28	10,4	2,9	7,1	65
Prep. convencional	6,5	2,0	0,0	2,6	1,3	0,22	8,8	1,8	6,1	67
Cerrado	3,6	3,8	0,3	0,3	0,1	0,08	1,6	2,0	4,3	8
----- Costa Rica -----										
Plantio direto	5,3	5,1	0,2	2,2	1,0	0,26	11,8	3,2	8,6	40
Cultivo mínimo	5,3	5,0	0,2	2,3	1,1	0,28	11,5	3,3	8,7	42
Prep. convencional	5,3	4,7	0,1	2,4	1,1	0,24	9,7	3,4	8,5	44
Cerrado	4,6	7,7	0,7	0,5	0,3	0,12	3,9	3,4	8,6	11
----- Tasso Fragoso -----										
Plantio direto	5,4	4,3	0,3	1,8	0,6	0,21	29,3	3,0	6,9	37
Cultivo mínimo	5,5	3,8	0,1	2,0	0,8	0,22	26,6	3,3	6,7	44
Prep. convencional	5,5	3,8	0,0	2,1	0,7	0,18	27,0	2,9	6,6	44
Cerrado	4,6	6,3	0,7	0,3	0,2	0,08	6,4	2,8	6,8	7
----- Sapezal -----										
Plantio direto	5,7	3,5	0,0	2,1	1,4	0,19	3,7	3,6	7,1	50
Cultivo mínimo	5,7	3,2	0,0	2,3	1,4	0,16	4,1	3,3	7,1	54
Prep. convencional	5,8	3,0	0,0	2,6	1,5	0,16	3,5	3,1	7,3	58
Cerrado	4,5	8,6	1,0	0,2	0,2	0,12	1,5	4,8	9,1	6

capacidade de troca de cátions (CTC_{pH=7,0}) e da saturação por bases (V) e os teores de Al, Ca, Mg e K trocáveis, de fósforo (Mehlich I) e matéria orgânica (MO), no laboratório UNIHTAL, de Campinas-SP, seguindo metodologia utilizada pelos laboratórios de análise de rotina do estado de São Paulo (Raij et al., 2001), sob supervisão e coordenação do IAC-Instituto Agrônomo de Campinas (Tabela 14).

Além da caracterização química do solo, também foi realizada na camada 0-20 cm uma caracterização mineralógica. Para tanto, foram utilizadas amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) passadas em peneira de malha de 2

mm da mesma amostragem para determinação química. Para compor as amostras de 0-20 cm foram utilizadas sub-amostras das camadas 0-5, 5-10 e 10-20, numa proporção de massa de acordo com a espessura da camada representada.

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta após dispersão em NaOH 1 N (EMBRAPA, 1997). A fração argila foi coletada por sedimentação segundo a Lei de Stokes. A suspensão de argila foi floculada com HCl 0,1 mol L⁻¹, lavada com solução etanol/água na proporção 1:1 e seca em estufa a 50°C. Os óxidos de ferro foram concentrados através do tratamento de 3 g de argila com NaOH 5 mol L⁻¹ a quente por duas horas (Kämpf & Schwertmann, 1982) (Tabela 15). A análise qualitativa da fração argila foi realizada por difratometria de raios-X (DRX) (equipamento Philips, radiação de Fe K α e filtro de Fe, voltagem de 30 kV e corrente de 30 mA), sendo utilizadas lâminas não orientadas de fração argila desferrificada (intervalo de 4 a 50 °2 θ) e dos óxidos de ferro concentrados (intervalo de 25 a 60 °2 θ). A razão

TABELA 15. Distribuição granulométrica da TFSA e mineralogia qualitativa da fração argila do solo, amostrado em 2005, (Hm= hematita, Gt= goethita, Gb= gibbsita e Ct= caulinita) em diferentes locais do Cerrado brasileiro.

Local	Argila	Silte	Areia	Hm/Hm+Gt	Gb/Gb+Ct
	-----g kg ⁻¹ -----				
Luziânia	653	223	124	0,39	0,74
Costa Rica	656	243	101	0,86	0,50
Tasso Fragoso	255	46	699	0,31	0,00
Sapezal	452	363	185	0,61	0,62

gibbsita/(gibbsita+caulinita), Gb/(Gb+Ct), foi calculada segundo a relação entre a área (A) das reflexões Gb (002) e Ct (001): A_{Gb}/(A_{Gb}+A_{Ct}) (Inda Junior & Kämpf, 2005). A razão hematita/(hematita + goethita), Hm/(Hm+Gt), foi estimada por meio do cálculo da área das reflexões Gt (110) e Hm (012), multiplicando-se a área da reflexão Gt (110) por 0,30, uma vez que a intensidade da reflexão Hm (012) é de 30% (Inda Junior & Kämpf, 2005) (Tabela 15).

Nas frações TFSA (Tabela 16) e argila (Tabela 17), após extrações químicas seletivas com H₂SO₄ (1:1) (EMBRAPA, 1997), ditionito-citrato-

bicarbonato de sódio a 80°C em duas extrações sucessivas (Inda Junior & Kämpf, 2003) e oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ à pH 3,0, no escuro (Schwertmann, 1964), foram determinados os teores de ferro total (Fet), ferro

TABELA 16. Teores de ferro, alumínio e silício do solo, amostrado em 2005, extraídos seletivamente com ácido sulfúrico (t= totais), com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (d= ditionito) e oxalato de amônio (o= oxalato), razões entre os teores de ferro e índice Ki na fração terra fina seca ao ar em diferentes locais do Cerrado brasileiro.

Local	----- H ₂ SO ₄ -----			DCB	-- Oxalato --			Ki	Fed/Fet	Feo/Fed
	Fet	Alt	Sit	Fed	Feo	Alo	Sio			
	-----g kg ⁻¹ -----									
Luziânia	42,0	39,3	5,0	38,0	1,7	6,6	0,4	0,24	0,90	0,04
Costa Rica	66,0	26,0	5,0	65,3	2,5	4,2	0,5	0,37	0,99	0,04
Tasso Fragoso	16,5	5,2	4,1	19,6	0,9	1,4	0,5	1,50	1,00	0,05
Sapezal	72,9	27,4	5,2	67,1	2,0	5,2	0,5	0,37	0,92	0,03

TABELA 17. Teores de ferro, alumínio e silício do solo, amostrado em 2005, extraídos seletivamente com ácido sulfúrico (t= totais), com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) de sódio (d= ditionito) e oxalato de amônio (o= oxalato), razões entre os teores de ferro e índice Ki na fração argila em diferentes locais do Cerrado brasileiro.

Local	----- H ₂ SO ₄ -----			----- DCB -----			--- Oxalato ---		
	Fet	Alt	Sit	Fed	Ald	Sid	Feo	Alo	Sio
	-----g kg ⁻¹ -----								
Luziânia	44,3	109,7	14,0	33,4	13,8	2,4	1,6	8,6	0,6
Costa Rica	83,2	88,4	24,7	66,0	11,3	3,1	2,7	5,8	0,6
Tasso Fragoso	53,6	57,1	32,1	34,3	12,7	3,0	2,2	3,9	0,7
Sapezal	114,0	124,5	30,9	70,4	16,5	2,7	2,5	6,9	0,5

ditionito (Fed), ferro oxalato (Feo), alumínio total (Alt), alumínio oxalato (Alo), silício total (Sit) e silício oxalato (Sio) por espectroscopia de absorção atômica (EAA). As relações molares SiO₂/Al₂O₃ foram calculadas a partir dos teores de Sit e Alt extraídos pelo ataque sulfúrico.

As amostras para as avaliações dos atributos químicos do solo foram coletadas em quatro trincheiras em cada subparcela, nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Essas amostras foram misturadas para formar uma amostra composta para cada manejo do solo. A trincheira tinha largura do

espaçamento entrelinhas, indo do meio de uma entrelinha até o meio da outra. Para amostragem das camadas de 20-40 e 40-60 cm foi utilizado trado calador, coletando-se uma amostra na linha do plantio e mais uma em cada lado da dessa linha, formando também uma amostra composta. As amostras compostas foram então divididas em duas partes, sendo uma enviada ao laboratório UNITHAL (Campinas-SP) para as seguintes avaliações: pH-H₂O, H+Al, Al, Ca, Mg, K, P. A outra parte foi enviada ao Laboratório de Biogeoquímica, localizado junto ao Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), para determinação dos teores de C e N. O método utilizado para determinar C foi por combustão seca da amostra (Analisador Shimadzu) e determinação do CO₂ liberado em sensor infravermelho. O N foi determinado pelo método Kjeldahl por destilação a vapor.

Para determinação dos estoques de C e N no solo, foi feita uma amostragem para avaliação da densidade do solo juntamente com a coleta de solo para avaliação de atributos químicos. Foram coletadas amostras nas mesmas trincheiras anteriormente descritas, nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Para tanto, foi utilizado um anel de inox com diâmetro de 4,0 cm e altura de 4,6 cm. As amostras foram tomadas uma ao lado da outra, nas diferentes profundidades. Após a retirada da amostra, foi feito uma toaleta no anel, de maneira a ajustar o volume de solo ao volume do anel. Feito isso, o solo foi retirado do anel, posto em saco plástico devidamente identificado e enviado para o laboratório de Biogeoquímica da UFRGS. As amostras foram então secas a 105°C até peso constante, pesadas e a densidade do solo foi calculada pela relação entre a massa de solo seco e o volume do anel.

O cálculo do estoque de C e N nas diferentes camadas do solo (0-5, 5-10 e 10-20cm) foi com base massa equivalente, ou seja, o Cerrado nativo foi considerado o sistema de referência e os estoques de C e N nos demais sistemas de manejo de solo foi calculado com base na massa de solo do sistema de referência.

3.3. Amostragem e determinações nas culturas

Nas culturas foram feitas avaliações da produção de matéria seca, de grãos, dos teores de nutrientes no tecido vegetal e nos grãos. Além dessas avaliações, para a soja, algodão e milho safrinha foi feita a contagem da população de plantas. Para isso, foram contadas as plantas contidas em cinco metros lineares, repetindo-se esse procedimento em 10 pontos em cada subparcela.

Para determinar a produção de massa seca das culturas foram coletadas duas subamostras por subparcela, no estágio de máximo acúmulo de matéria seca, ou seja, no início da deiscência das folhas, seguindo o seguinte esquema de acordo com as culturas: soja – duas linhas de 0,5 m em cada subamostra (área amostrada de 0,90 m²; espaçamento entre linhas de 0,45 m); milho – uma linha de um metro em cada subamostra (área amostrada de 0,90 m² para o espaçamento entre linhas de 0,45 m ou de 1,40 m² para o espaçamento de 0,70 m); algodão – uma linha de um metro em cada subamostra (área amostrada de 0,90 m²; espaçamento entre linhas de 0,90 m); culturas de cobertura – foi coletado o material vegetal contido em uma área de 0,5 m² por subamostra. As amostras foram acondicionadas em sacos de algodão, secas em estufa a 65°C, pesadas e trituradas. Posteriormente foi retirada uma alíquota dessa amostra, que foi dividida em duas, sendo uma enviada para análise de macronutrientes no laboratório UNITHAL e a outra armazenada até obtenção dos resultados, sendo posteriormente descartadas.

No ponto de colheita mecânica, o milho e a soja foram colhidos com colhedora motorizada, sendo feita uma passada em cada subparcela, perfazendo todo o comprimento da mesma. Após, os grãos foram descarregados em uma caixa sobre uma balança, tendo a sua massa mensurada. Foram tomadas subamostras para determinação do teor de umidade e do índice de impurezas dos grãos. Essa mesma subamostra foi dividida em duas, sendo uma enviada ao laboratório UNITHAL para determinação dos teores de macronutrientes no produto colhido para quantificar a exportação de nutrientes, e a outra guardada até o recebimento dos resultados, sendo posteriormente descartadas. A produtividade de algodão foi determinada através da colheita de três subamostras de uma linha de 10 m

de comprimento por subparcela e pesagem em balança comercial eletrônica de balcão. Foram tomadas amostras de aproximadamente 1 kg por sub-parcela para proceder o descaroçamento com micro-algodeira. Amostras de caroço e de pluma foram enviadas ao laboratório UNITHAL para determinar a concentração de nutrientes para cálculo da exportação pela colheita.

4. CAPÍTULO III: ESTUDO I – CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO E A SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA DE PRODUÇÃO COM SOJA-ALGODÃO NO CERRADO BRASILEIRO

4.1. Introdução

O uso do solo para produção agrícola de espécies anuais provoca redução na concentração e no estoque de C e N, com perda na qualidade do solo e redução no seu potencial produtivo (Lal & Pierce, 1991). A preocupação de manter a qualidade do solo e garantir a produção de alimentos é milenar e passou a ser estudada cientificamente a partir do final do século XIX, quando foram instalados os primeiros experimentos de longa duração no planeta, para avaliar o efeito de diferentes sistemas de manejo sobre a produtividade das culturas (Reeves, 1997). Os principais experimentos são Rothamsted (UK), The Morrow Plots – IL (USA), Sanborn Field – MO (USA), The Magruder Plots – OK (USA), The Askow long-term fertilization experiment (Denamark) and The Old Rotation – AL (USA), todos localizados em regiões de clima temperado. São trabalhos de longa duração que continuam em avaliação e mostram que é possível a produção de alimento de forma sustentável em ambiente temperado. Até o final do século XX, existia o mito de que não era possível produzir alimentos de forma sustentável em região tropical (Greenland et al., 1992), que aos poucos foi sendo desmistificado e demonstrado que seria possível a implantação de sistemas sustentáveis de produção nas regiões tropicais (Lal & Pierce, 1991; Sanchez & Logan, 1992).

O Brasil, através da EMBRAPA, foi um país líder no desenvolvimento de tecnologias para produção de culturas anuais em região tropical, principalmente na região do Cerrado, mas fazem apenas 30 anos que o Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado-EMBRAPA/CPAC foi criado, por isso os poucos estudos existentes são recentes e de curta duração. Nos primeiros anos de pesquisa, o foco foi avaliar o potencial produtivo da região e somente mais tarde alguns trabalhos de pesquisa foram implantados para avaliar aspectos de qualidade do solo e sustentabilidade do sistema de produção. Os poucos resultados produzidos quanto a dinâmica da matéria orgânica mostram dados divergentes, alguns com perdas significativas de C (Silva et al., 1994; Zinn et al., 2005a; Ferreira et al., 2007) e outros com perdas pequenas ou até acúmulos, dependendo da rotação de culturas e do sistema de manejo do solo utilizados (Corazza et al., 1999; Roscoe & Buurman, 2003; Bayer et al., 2006b).

Em torno de 58% e 4% da matéria orgânica do solo é composta por carbono (C) e nitrogênio (N), respectivamente, tendo a mesma importante papel no equilíbrio dinâmico de processos químicos, físicos e biológicos no solo. Em ambientes tropicais, a matéria orgânica assume maior importância, pois é responsável por grande parte da CTC do solo (de 75 a 93%) (Sousa & Lobato, 2002b). Além disso, o estoque de C no solo é um dos principais indicadores para avaliar a sustentabilidade do sistema de produção (Mielniczuk, 1999).

Em condições de vegetação nativa, o nível de C no solo está em equilíbrio, ou seja, a quantidade adicionada anualmente via resíduos de plantas é semelhante à quantidade perdida na forma de CO_2 pela mineralização dos resíduos orgânicos e atividade microbiana. Esse equilíbrio pode ser expresso matematicamente pela equação $dC/dt = k_1A - k_2C$ (Hénin & Dupuis, 1945), onde: dC/dt é a variação no C total no solo em função do tempo t ; k_1 é a taxa de conversão dos resíduos orgânicos em C no solo; A é a quantidade (Mg ha^{-1}) de C adicionado anualmente ao solo; k_2 é a taxa anual de mineralização do C do solo; e C é o estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}).

Em solos cultivados, essa dinâmica geralmente está fora de equilíbrio, pois se alteram a fonte e a taxa de adição dos resíduos culturais (k_1A) e a taxa de perda de C (k_2). Na condição de Cerrado nativo, a adição anual de C é baixa, mas apresenta grande variação entre os diferentes locais em função principalmente do regime pluviométrico. De acordo com

determinação de Meirelles & Henriques (1992) no Cerrado de Planaltina-DF, a produção primária líquida variou de 1,08 a 1,76 Mg ha⁻¹ de C. Já Scholes & Hall (1996) estimaram uma produção primária líquida média de 6,42 Mg ha⁻¹ de C, valor médio de 199 locais de savanas em vários países. A introdução de culturas anuais pode proporcionar adições maiores ou menores que às adições de C do Cerrado nativo, variando de acordo com a rotação de culturas utilizada. Na rotação soja e milho adicionou 4,0 e 4,3 t ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente (Bayer et al., 2006b). Já em monocultivo de soja a adição foi de 2,0 t ha⁻¹ (Guimarães et al., 2003) e em monocultivo de algodão de 3,2 t ha⁻¹ (Pettigrew et al., 2006). O aumento na taxa de perda de C e N, e conseqüente degradação do sistema de produção, ocorrem quando, devido ao manejo intensivo do solo, há elevação na taxa de mineralização da matéria orgânica (Bayer et al., 2006a) e as adições são insuficientes para compensar as perdas.

Ao mesmo tempo em que na região do Cerrado as condições ambientais são favoráveis para alta decomposição da matéria orgânica, também possibilitam produzir alta quantidade de matéria seca, podendo resultar em elevadas adições de C ao solo. Para isso, é necessário desenvolver sistemas de rotação de culturas que proporcionem altas adições de C ao solo. O sistema de rotação de cultura soja-algodão, objeto deste estudo, é composto por duas espécies de baixa adição de C e resíduo com baixa relação C/N e, conseqüentemente, alta taxa de mineralização. Como são culturas que apresentam viabilidade econômica, é necessário introduzir outras culturas e estudar sistemas de rotação de culturas e manejo do solo que possibilitem a sustentabilidade deste sistema de produção.

A dinâmica do N possui estreita relação com a dinâmica do C. A perda ou acúmulo de N está associada com a perda ou acúmulo de C. A elevada taxa de decomposição da matéria orgânica exerce efeito positivo na disponibilização de N para as culturas no curto prazo. No longo prazo, no entanto, reduz o estoque e aumenta a dificuldade para suprir N às culturas, dificultando a recuperação dos estoques de C e N e a melhoria da qualidade do solo. Segundo Urquiaga et al. (1990), a quantidade de N no perfil de solo de 0-100 cm pode variar de 3 a 14 Mg ha⁻¹. A disponibilização deste N para as plantas em crescimento é proporcional ao estoque total e a taxa de mineralização da matéria orgânica (k_2).

O objetivo deste trabalho foi avaliar sistemas de rotação de culturas e manejo de solo, determinando as adições mínimas necessárias de C e N para cada sistema de manejo de solo, para viabilizar a sustentabilidade do sistema de produção e garantir alta produtividade das culturas no Cerrado brasileiro.

4.2. Material e Métodos

Para determinar as concentrações e os estoques de C e N no solo, foram utilizadas amostras de solo das camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm das amostragens realizadas em 2005 e da camada de 0-20 cm das amostragens realizadas no primeiro ano de cada experimento. Para se ter a mesma base de avaliação dos teores de carbono, foi feita uma análise de regressão entre os teores de carbono do solo de amostras analisadas no Laboratório UNITHAL (colorimetria) e no Laboratório de Biogeoquímica-UFRGS (analisador Shimadzu VCSH) nos resultados de 2005 para cada experimento, que permitiu a correção dos teores de C iniciais de cada área experimental (determinados por colorimetria) para valores equivalente aos obtidos com o analisador. Para o estabelecimento destas regressões foram utilizadas 108, 156, 90 e 107 amostras dos experimentos de Luziânia, Costa Rica, Sapezal e Tasso Fragoso, respectivamente, as quais foram analisadas nos dois laboratórios previamente citados. Os teores de C das amostras variaram (Analisador) entre: 1,66-3,72%; 1,26-2,93%; 1,4-3,67%; e 0,62-1,92%, para os locais de Luziânia, Costa Rica, Sapezal e Tasso Fragoso, respectivamente. A partir desta análise foram obtidas as seguintes equações: $C_A = 1,05C_C + 1,29$ ($R^2 = 0,69$, Luziânia); $C_A = 1,02C_C + 0,77$ ($R^2 = 0,71$, Costa Rica); $C_A = 1,06C_C + 0,89$ ($R^2 = 0,98$, Sapezal) e; $C_A = 0,66C_C + 0,17$ ($R^2 = 0,80$, Tasso Fragoso); onde C_A = carbono determinado no analisador e C_C = carbono determinado por colorimetria.

Com a utilização das equações listadas acima foi possível calcular os teores de C no início do experimento e utilizando-se os dados de densidade do solo em preparo convencional (Tabela 18), que até o início dos experimentos era o manejo de solo utilizado em todas as áreas, foram calculados estoques de C, em massa equivalente, em cada experimento. Os estoques de C e de N no ano de 2005 foram calculados normalmente, sem nenhum tipo de transformação, e com os respectivos valores de densidade para cada manejo do

solo (Tabela 18), considerando o Cerrado nativo como sistema de referência para calcular o estoque de C e N com base em massa equivalente. Pelo fato da amostragem do solo no tratamento de cultivo mínimo (CM) ter sido feita nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, foram somados os estoques de C e N dos demais tratamentos nas camadas de 0-5 e 5-10 cm para tornar possível a comparação entre os mesmos. A variação entre os estoques de C do solo no início do experimento e no ano de 2005 permitiu calcular a taxa anual de alteração no estoque de C em cada sistema de manejo de solo.

A quantidade de carbono acumulada pelas culturas principais (soja, milho e algodão) e pelas coberturas do solo (braquiária, milheto, milho safrinha, nabo, crotalária e pousio) foi calculada com base na produção de matéria seca da parte aérea das culturas, considerando-se que 40% do resíduo adicionado ao solo se encontram na forma carbono (Monegat, 1991).

TABELA 18. Densidade do solo (Mg m^{-3}), avaliada em 2005, em áreas experimentais do Cerrado brasileiro, submetidas a diferentes manejos de solo.

Manejo do solo	Camada ---- cm ----	Local			
		Luziânia	Costa Rica	Sapezal	Tasso Fragoso
Cerrado	0-5	1,00	0,83	0,79	1,30
	5-10	1,02	0,91	1,04	1,33
	10-20	1,03	1,00	0,98	1,43
	0-20	1,02	0,94	0,95	1,37
Plantio Direto	0-5	1,05	1,13	1,14	1,53
	5-10	1,11	1,19	1,52	1,57
	10-20	1,12	1,19	1,38	1,58
	0-20	1,10	1,18	1,36	1,57
Cultivo Mínimo	0-10	1,08	1,20	1,15	1,63
	10-20	1,15	1,24	1,31	1,61
	0-20	1,12	1,22	1,23	1,62
Preparo Convencional	0-5	1,09	1,22	1,20	1,56
	5-10	1,07	1,22	1,26	1,63
	10-20	1,10	1,23	1,35	1,65
	0-20	1,09	1,23	1,29	1,62

A quantidade de N absorvido pela soja, milho e algodão foi determinada pela análise dos teores deste nutriente no tecido vegetal das culturas no seu ponto de máximo acúmulo de matéria seca. Os teores de N também foram determinados nos grãos dessas culturas, o que permitiu o cálculo da quantidade de N exportada pelas mesmas.

Com os dados da quantidade de carbono adicionada pelas culturas de grãos e de cobertura do solo foi elaborado um planejamento de rotação de culturas envolvendo até três anos de cultivos, visando estabelecer uma condição de baixa e outra de alta adição de C ao solo. Com base nessas adições de C pelas culturas foram projetados cenários futuros do comportamento dos estoques de C do solo das áreas experimentais por um período de 50 anos após a última avaliação desses estoques (2005). Para que essa aproximação fosse realizada, algumas condições foram assumidas e são descritas na seqüência.

Os estoques de carbono do Cerrado foram assumidos como sendo estáveis ao longo do tempo. Assim sendo, os seus valores são os mesmos desde a abertura do Cerrado, em cada local onde se encontram instalados os experimentos, permanecendo assim para o tempo futuro. Esses mesmos valores de estoque são considerados como os valores iniciais de estoques de C para os diferentes manejos na abertura do Cerrado e início do plantio de culturas anuais.

A variação dos estoques de C no solo desde a abertura do cerrado até o início de cada experimento foi calculada pela equação (Woodruff, 1949):

$$C_t = C_0 \cdot e^{-k_2 t} + (k_1 A / k_2) \cdot (1 - e^{-k_2 t}) \quad (1)$$

onde:

C_t = estoque de carbono no tempo t (Mg ha^{-1});

C_0 = estoque de carbono inicial do solo (Mg ha^{-1});

k_1 = taxa anual de conversão dos resíduos orgânicos para C do solo;

k_2 = taxa anual de mineralização do C do solo;

A = adição anual de C ao solo (Mg ha^{-1}).

Onde C_t foi o estoque de C calculado para o início dos experimentos, C_0 o estoque de C determinado no Cerrado Nativo em 2005 e considerado como sendo o estoque na abertura do cerrado das áreas experimentais. O k_1 foi assumido como 0,15 (Bayer et al., 2006a). A adição de C ao solo (fator A) foi estimada pela adição de resíduos da cultura da soja, seguida de pousio, baseados nos dados observados nos anos agrícolas 2005/06 e 2006/07, como será descrito na seqüência. O índice k_2 foi ajustado para que estoque de C final (C_t) equivalesse ao estoque calculado para o início dos experimentos, sendo este o k_2 pré-experimentos.

Para o cálculo do k_2 do período experimental foi utilizada a Equação 1, alterando-se os valores das adições (fator A), e utilizando-se como C_0 o estoque de carbono no início do experimento e como C_t o estoque de C determinado em 2005. Os valores do fator A foram estimados a partir da produção de matéria seca das culturas principais e das culturas de cobertura do solo em cada preparo. Para as culturas principais essa estimativa foi feita usando o índice de colheita aparente (IC= Produção de grãos/massa seca total da parte aérea), os quais foram de 0,46, 0,40 e 0,51 para soja, milho e algodão, respectivamente, mensurados nos anos agrícolas de 2005/06 e 2006/07 e que se encontram em acordo com valores apresentados na literatura (Sisti et al., 2004). A estimativa da produção de matéria seca, e conseqüente adição de C, das culturas de cobertura e do pousio foi feito baseado nos dados mensurados nos mesmos anos agrícolas citados anteriormente. Além da adição de C pela parte aérea das culturas comerciais e coberturas de solo, foi considerado a adição das raízes, em todos os cálculos e simulações, numa proporção de 30% da adição total, ou seja, 70% parte aérea e 30% raízes, para todas as espécies cultivadas e utilizadas na simulações de estoque de C.

Para o cálculo dos cenários futuros dos estoques de C do solo foi utilizada também a Equação 1, onde utilizou-se o índice k_2 determinado para o período experimental e as adições de carbono variaram de um experimento para outro conforme o local, conforme o planejamento de rotação de culturas elaborado para se atingir baixas e altas adições de C em cada área experimental e em cada manejo de solo.

A análise de variância (ANOVA) foi feita utilizando-se o software *SAS for Windows*, empregando-se o Teste da Diferença Mínima Significativa (LSD Test - 5%) para a comparação entre médias.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. – Concentrações e estoques de C e N no solo

O Cerrado brasileiro é um bioma único, mas há grande diversidade edafoclimática entre as regiões. Como neste trabalho foram utilizados dados coletados em quatro experimentos de longa duração, distribuídos

estrategicamente na região do Cerrado, foi possível analisar as variações regionais nos estoques de C e N no solo, especialmente associado à produção de soja e algodão. As Figuras 7 e 8 demonstram que a produção de culturas anuais em preparo convencional do solo (PC), provocou perdas na concentração de C na camada de 0-5 cm nos quatro locais estudados em relação ao Cerrado nativo (Cerrado). Na camada de 5-10 cm, houve perda somente em Costa Rica e Tasso Fragoso e na camada de 10-20 cm houve perda somente em Costa Rica, provavelmente devido ser uma área cultivada por 20 anos em PC antes da instalação do experimento. Isso demonstra que, mesmo utilizando preparo convencional do solo, as perdas ficaram limitadas principalmente às camadas superficiais do solo, até 10 cm, em relação ao Cerrado. As perdas de N foram similares às perdas de C, com exceção de Tasso Fragoso, onde não ocorreram perdas, nem mesmo na camada de 0-5 cm.

Por outro lado, na medida em que foi utilizado o plantio direto (PD), houve recuperação no estoque de C e N (Tabela 19), na mesma seqüência das perdas, primeiro na camada superficial de 0-5 cm, mas com a tendência de no longo prazo acumular em profundidade, concordando com dados obtidos na região Sul do Brasil (Bayer et al., 2006a; Zanatta et al., 2007). Resultados de pesquisa com fracionamento da matéria orgânica evidenciam que a fração lábil do C é perdida mais rapidamente com o preparo do solo e que a utilização de sistemas conservacionistas de manejo do solo proporcionam acúmulo primeiramente nesta fração e nas camadas superficiais do solo (Blair et al., 1995; Salton, 2005; Vieira et al., 2007). Apesar da tendência de acumular C e N no PD em relação ao PC ser a mesma em todos os locais, houve acúmulo significativo na camada 0-5 cm somente em Luziânia e Costa Rica e 5-10 cm em Costa Rica, locais com experimentos de maior duração, 13 e 11 anos, respectivamente.

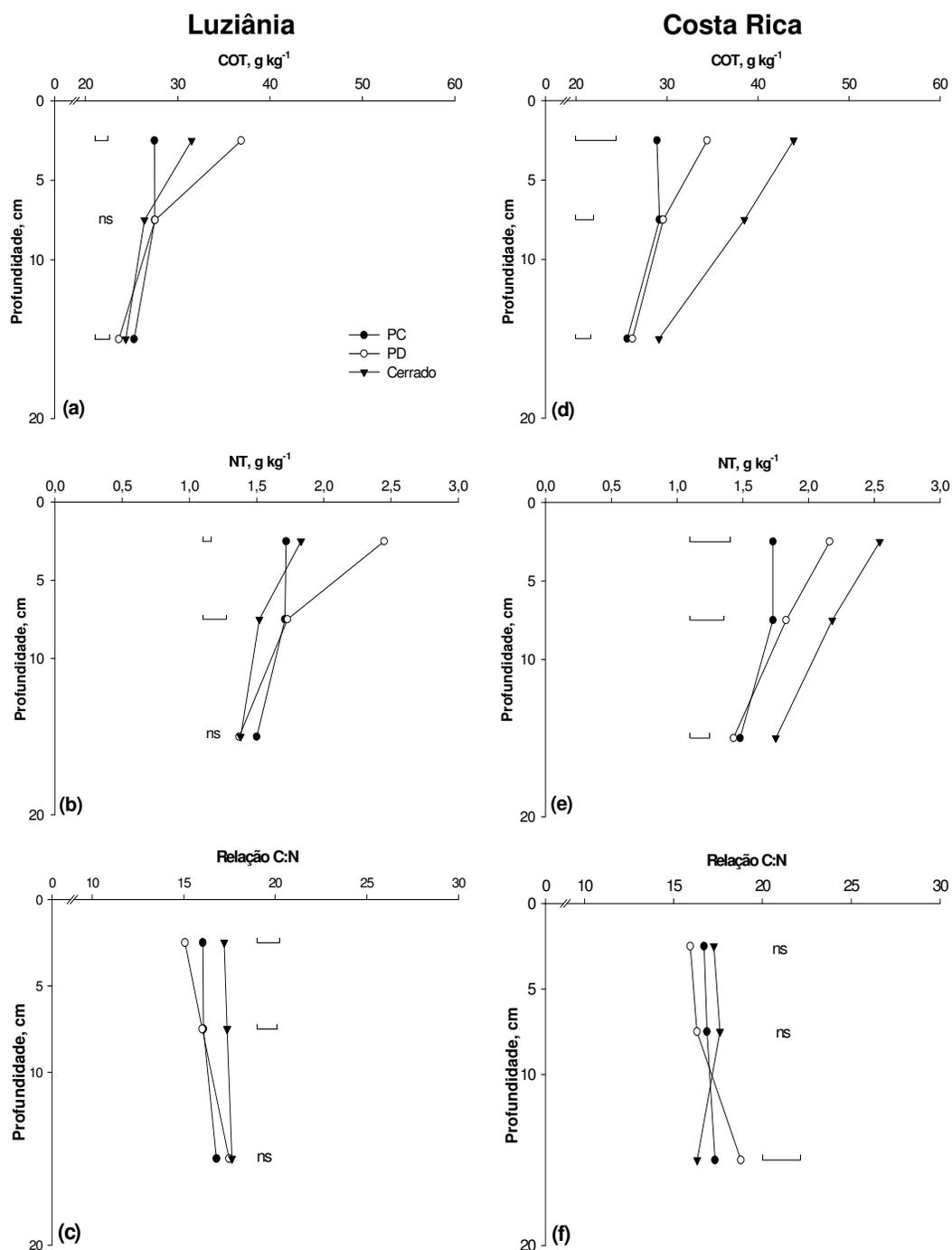


FIGURA 7. Teores de carbono orgânico total (a e d), nitrogênio total (b e e) e relação C:N (c e f) do solo, avaliados em 2005, nos experimentos de Luziânia e Costa Rica. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo Teste DMS 5%. ns= não significativo.

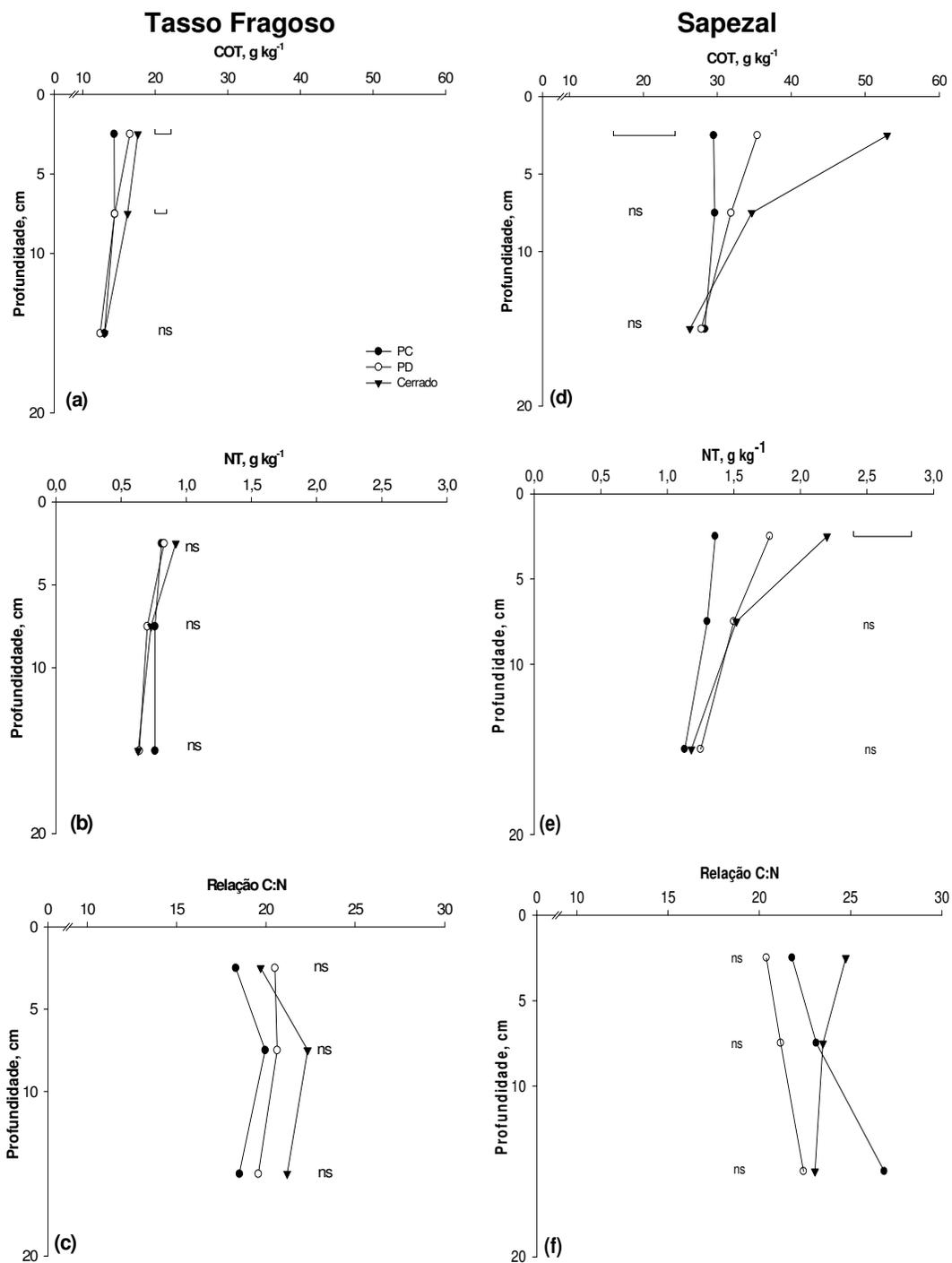


FIGURA 8. Teores de carbono orgânico total (a e d), nitrogênio total (b e e) e relação C:N (c e f) do solo, avaliados em 2005, nos experimentos de Tasso Frágoso e Sapezal. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo Teste DMS 5%. ns= não significativo.

TABELA 19. Estoques de carbono e nitrogênio no solo, avaliados em 2005, em áreas experimentais localizadas no Cerrado brasileiro, submetidas a diferentes manejos (PC= preparo convencional, PD= plantio direto, Cer= cerrado).

Camada	Locais											
	Luziânia			Costa Rica			Tasso Fragoso			Sapezal		
	PC	PD	Cer	PC	PD	Cer	PC	PD	Cer	PC	PD	Cer
----- cm -----	----- Estoque de C, Mg ha ⁻¹ -----											
0-5	13,7c ¹	18,4a	15,7b	11,1c	14,2b	18,1a	9,0b	10,3ab	11,0a	11,6b	14,2b	20,8a
5-10	14,1a	14,1a	13,6a	12,3b	13,4b	17,5a	9,5b	9,6b	10,7a	15,6a	17,0a	18,0a
10-20	25,9a	24,2b	25,0ab	25,5b	26,1b	29,0a	18,6a	17,7a	18,6a	27,9a	27,4a	25,8a
0-20	53,7	56,7	54,3	48,9	53,7	64,6	37,1	37,6	40,3	55,1	58,6	64,6
	----- Estoque de N, Mg ha ⁻¹ -----											
0-5	0,86c	1,22a	0,91b	0,66c	0,89b	1,05a	0,51ns	0,52	0,58	0,52b	0,70a	0,87a
5-10	0,87ab	0,88a	0,78b	0,73c	0,83b	0,99a	0,50ns	0,46	0,48	0,66ns	0,78	0,78
10-20	1,54a	1,41a	1,42a	1,47b	1,42b	1,74a	1,09ns	0,91	0,90	1,07 ns	1,22	1,16
0-20	3,28	3,51	3,11	2,86	3,14	3,78	2,10	1,89	1,96	2,32	2,71	2,82

¹ Médias seguidas de mesma letra na linha para cada local não diferem entre si pelo Teste DMS 5%. ns= não significativo.

A relação C/N no solo na camada 0 a 20 cm foi alta em todos os locais e manejos de solo estudados, acima de 15/1, possivelmente devido ao alto conteúdo de C no solo na forma de carvão, acumulado pelo histórico de presença de fogo no Cerrado nativo (Forbes et al., 2006; Jantalia et al., 2007). A relação C/N foi maior somente nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm no Cerrado em relação aos sistemas de PC e PD em Luziânia, nos demais locais se observou apenas uma tendência nesse sentido.

O estoque de C no solo é um indicador importante, pois cerca de 80% do carbono total dos ecossistemas de savana encontra-se no solo (Scurlock & Hall, 1998), além de ser um indicador que mostra a capacidade do solo em atuar como fonte ou dreno de C. A matéria orgânica do solo afeta diretamente a capacidade produtiva do solo, com os conseqüentes reflexos ambientais. O estoque de C no Cerrado foi utilizado como sistema de referência para analisar a evolução do estoque nos demais sistemas de manejo do solo, considerando que no Cerrado o estoque mantém-se estável ao longo dos anos, mesmo sabendo que apesar de ser um sistema teoricamente estável, pode apresentar variação de estoque no tempo, principalmente em função da presença de fogo (Aduan et al., 2003) e redução na taxa de adição de C.

A Tabela 19 demonstra que há grande variação no estoque total de C do Cerrado (Cer) na camada 0 a 20 cm nos diferentes locais estudados (40,3 a 64,6 Mg ha⁻¹) e, ao mesmo tempo, evidencia a diferenciação das condições edafoclimáticas das diferentes regiões do Cerrado, onde os experimentos estavam localizados, sendo as principais: temperatura, regime pluviométrico, mineralogia do solo e teor de argila. A utilização do PC do solo provocou redução nos estoques de C em Costa Rica, Tasso Fragoso e Sapezal, na proporção de 24%, 8% e 15%, respectivamente, em relação ao Cer, mas não houve redução significativa em Luziânia, mostrando que nas condições de solo e clima da região de Luziânia a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo é menor que nas demais regiões. A mineralogia, devido à alta concentração de óxidos de ferro e alumínio (Tabelas 15 a 17), que atuam na agregação do solo e exercem proteção física e química da matéria orgânica do solo (Roscoe et al., 2004; Bayer et al., 2006b), além da menor precipitação pluviométrica (Tabela 13) e maior altitude (Tabela 3) (conseqüentemente,

menor temperatura média), ajudam a explicar a menor taxa de decomposição da matéria orgânica, expressa através do menor k_2 (Tabela 20). Além disso, os dados mineralógicos demonstram que Luziânia apresenta o menor K_i , indicando maior índice de intemperismo do solo e maior atividade dos óxidos na proteção da matéria orgânica do solo. Em todos os locais, o estoque de C no sistema PD foi maior que do PC, demonstrando a possibilidade de recuperar e manter níveis de estoque de C no solo mais elevados utilizando este sistema de manejo do solo. Em Luziânia o estoque de C no sistema de PD foi maior que no próprio Cer, caracterizando o potencial de seqüestro de C em nível superior ao próprio sistema natural. O grande diferencial de acúmulo de C no PD ocorreu na camada superficial de 0 a 5 cm, processo normal de acúmulo de C em solos não revolvidos (Lovato et al., 2004), mas no longo prazo, a tendência é acumular C em profundidade. Como não houve grande variação na relação C/N entre os manejos de solo em todos os locais, o estoque de N seguiu a mesma tendência do estoque de C, com exceção do Cer que apresentou tendência de maior relação C/N e, conseqüente, relativamente menor estoque de N em relação aos demais sistemas de manejo do solo.

Nas Figuras 9 e 10 constam os estoques de C e N nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, incluindo o tratamento de manejo do solo cultivo mínimo (CM). Os dados mostram estoque de C no CM em níveis intermediários aos do

TABELA 20. Valores do índice k_2 para áreas experimentais na região do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) e estimativa entre o início da exploração agrícola e a implantação dos experimentos.

Manejo do Solo	Luziânia	Costa Rica	Tasso Fragosso	Sapezal	Média
----- k_2 estimado e anos de cultivo antes da instalação dos experimentos -----					
PC	1,23	2,28	2,45	3,86	2,45
Anos	15	20	10	4	
----- k_2 calculado e anos de cultivo para o período experimental -----					
PC	1,48	1,95	2,14	2,30	1,97
CM	1,25	1,45	1,86	1,71	1,57
PD	1,02	1,44	1,85	1,61	1,48
Anos	13	11	5	4	

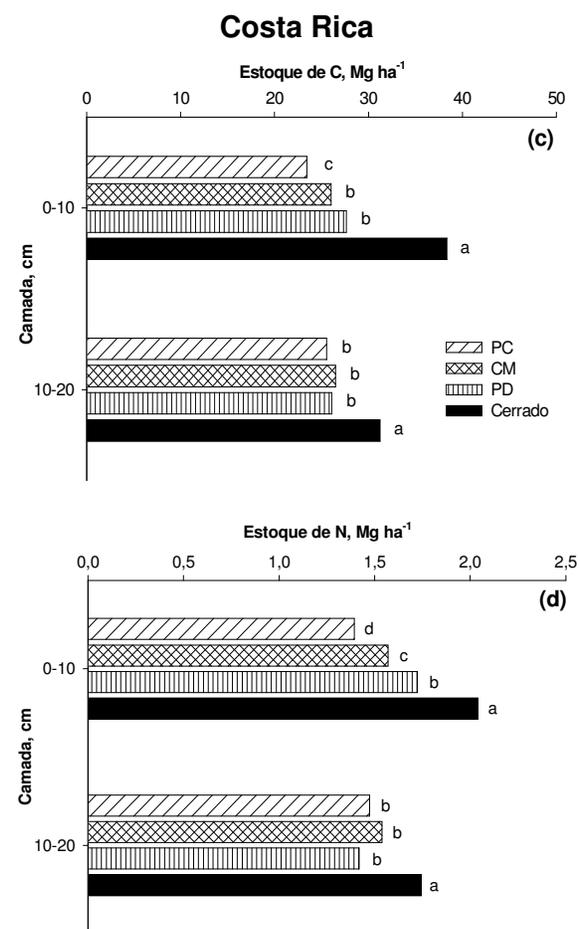
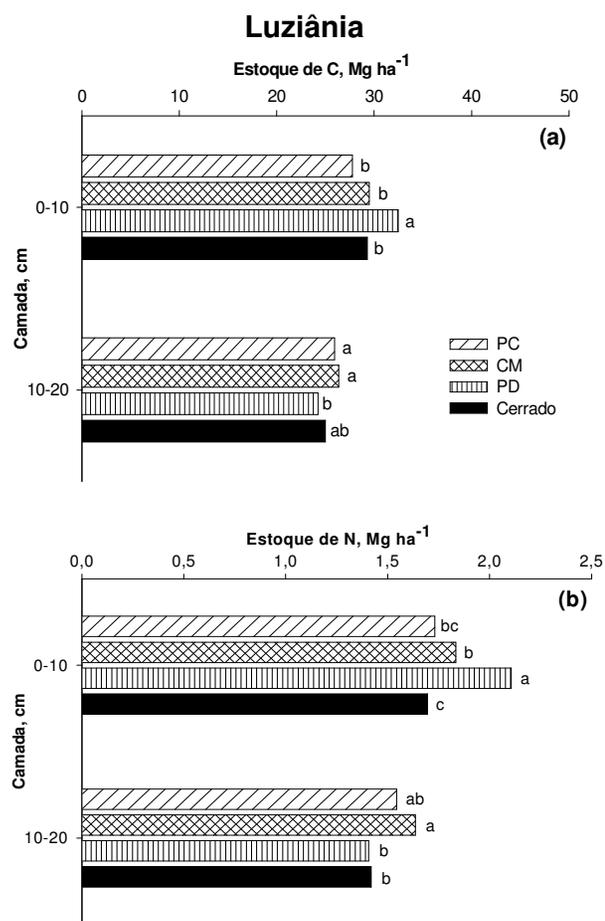


FIGURA 9. Estoques de carbono (a e c) e nitrogênio (b e d) do solo, avaliados em 2005, nos experimentos de Luziânia e Costa Rica. Barras seguidas da mesma letra dentro da mesma camada, não se diferenciam entre si pelo Teste DMS 5%. ns= não significativo.

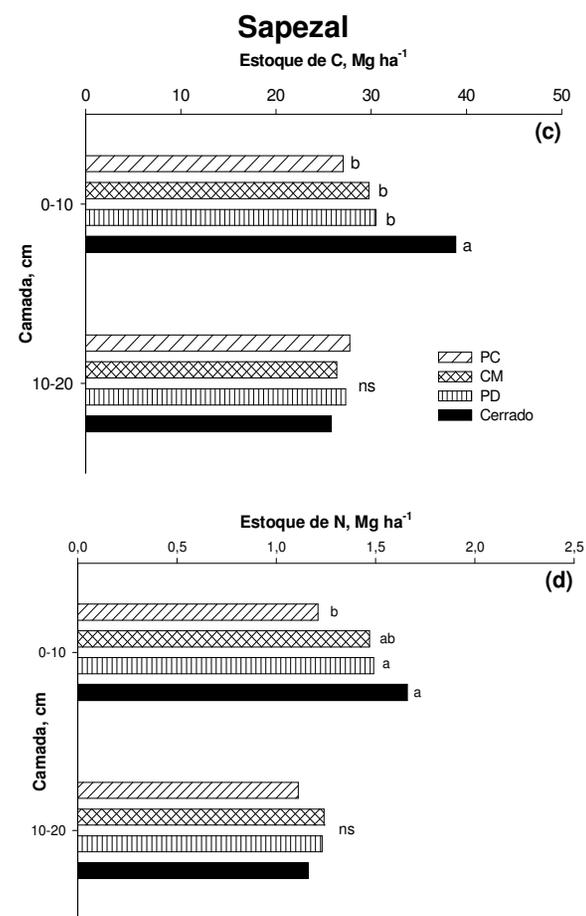
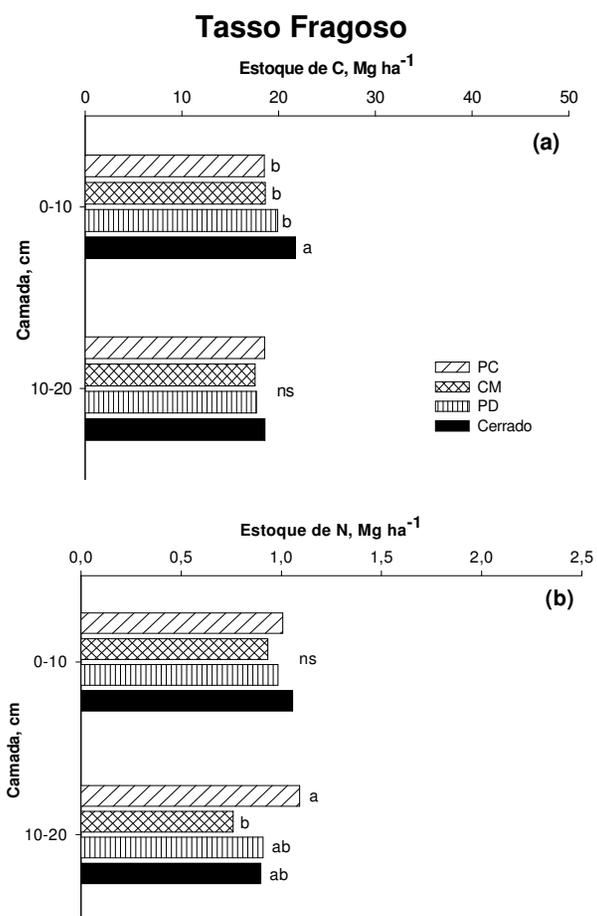


FIGURA 10. Estoques de carbono (a e c) e nitrogênio (b e d) do solo, avaliados em 2005, nos experimentos de Tasso Fragoso e Sapezal. Barras seguidas da mesma letra dentro da mesma camada, não se diferenciam entre si pelo Teste DMS 5%. ns= não significativo.

PD e PC, reforçando o conceito de que é um sistema de manejo do solo com revolvimento mínimo do solo, extremamente eficaz na descompactação do solo, e com menor ação na decomposição da matéria orgânica do solo que o PC, sendo recomendada sua utilização em áreas compactadas. Os estoques de N apresentaram comportamento similar aos estoques de C na camada de 0-10 cm. Já na camada 10-20 cm, houve maior estoque de N no CM em relação ao PD em Luziânia e menor estoque de N no CM em relação ao PC em Tasso Fragoso.

A utilização do preparo convencional provocou redução nos estoques de C em relação ao Cerrado nativo. Já o CM aliado a uma rotação de culturas com maior adição de C, por exemplo, com a inclusão da cultura do milho e coberturas de solo com milheto ou braquiária, possibilitou acumular C no solo. A Tabela 21 demonstra que a taxa de seqüestro de C determinada nas condições do Cerrado brasileiro variou entre os sistemas de manejo do solo e locais, nas condições de rotação de culturas em que os experimentos foram conduzidos. Sob PC, em todos os locais houve perda de C, porém sob CM houve perdas apenas em Sapezal e sob PD houve acúmulo em todos os locais, variando de 0,06 a 0,21 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 21). O CM é um sistema de manejo do solo que provoca baixa incorporação da matéria orgânica ao solo, por isso a taxa de seqüestro de C é intermediária em relação ao PD e PC. As taxas de seqüestro de C no PD foram inferiores à média de 0,35 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, calculada com base em 8 trabalhos de pesquisa desenvolvidos na região no Cerrado (Bayer et al., 2006b), mas ficaram dentro da amplitude de -0,03 a 0,60 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ relatada pelos mesmos autores. O seqüestro de C também foi menor que os valores determinados para regiões subtropical e temperada, de 0,48 e 0,34 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente (Bayer et al., 2006b). A mudança do manejo do solo reduz a taxa de decomposição da matéria orgânica, mas para aumentar o potencial de seqüestro de C é necessário, além de reduzir o revolvimento do solo, aumentar as adições de C via resíduos culturais das culturas comerciais e culturas de cobertura de solo (Mielniczuk, 1999; Lal, 2002).

TABELA 21. Seqüestro de carbono, na camada 0-20 cm, em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos do solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) do início dos experimentos até 2005.

Local e Ano/Período	Manejo do solo		
	PC	CM	PD
	-- Estoque de C no início do experimento, Mg ha ⁻¹ --		
Luziânia – 1992	54,06	54,06	54,06
Costa Rica – 1994	51,37	51,37	51,37
Tasso Fragoso – 2000	57,80	57,80	57,80
Sapezal - 2001	37,33	37,33	37,33
	----- Estoque de C em 2005, Mg ha ⁻¹ -----		
Luziânia	53,69 A	55,17 A	56,70 A
Costa Rica	49,00 A	52,50 AB	53,70 B
Tasso Fragoso	37,09 A	37,47 A	37,62 A
Sapezal	55,10 A	56,40 A	58,62 A
Média dos locais	48,72	50,39	51,66
	----- Sequestro de C, Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----		
Luziânia – 13 anos	-0,03	0,09	0,20
Costa Rica – 11 anos	-0,22	0,10	0,21
Tasso Fragoso – 5 anos	-0,05	0,03	0,06
Sapezal – 4 anos	-0,67	-0,35	0,21
Média dos locais	-0,17	0,03	0,18

¹ Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo Teste DMS 5%. ns= não significativo.

4.3.2. Adições de C e N pelas espécies comerciais e de cobertura de solo

As condições climáticas das regiões tropicais são extremamente favoráveis à decomposição da matéria orgânica do solo, mas, ao mesmo tempo, permitem produzir grande quantidade de matéria seca e adicionar alta quantidade de C ao solo. A redução do revolvimento do solo proporciona condições para reduzir as perdas de C e N, mas o aumento no estoque é dependente das quantidades adicionadas anualmente (Sá et al., 2001; Mielniczuk et al., 2003). Como o objetivo deste trabalho foi avaliar a sustentabilidade do sistema de produção desenvolvido no Cerrado brasileiro, determinou-se o potencial de produção de matéria seca das principais culturas comerciais cultivadas (soja, milho e algodão) e das principais espécies utilizadas como cobertura de solo (*Braquiária ruziziensis*, milheto, nabo forrageiro, crotalária juncea e vegetação espontânea). Os dados das Tabelas 22 e 23 demonstram que as culturas da soja e algodão apresentam baixa

capacidade de produção de matéria seca e, conseqüentemente, adicionam baixas quantidades de C ao solo. A adição de C pela parte aérea da soja, média de todos os locais e tratamentos, foi de 1,70 Mg ha⁻¹ e o tratamento com maior adição chegou a 2,55 Mg ha⁻¹. O mesmo aconteceu com a cultura do algodão, a adição média de C da parte aérea foi 1,92 Mg ha⁻¹ e o tratamento com máxima adição chegou a 2,16 Mg ha⁻¹ (Tabela 23).

TABELA 22. Carbono acumulado na matéria seca da parte aérea da soja (Mg ha⁻¹) e adicionado ao solo em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo.

Manejo do solo	Tratamentos (Culturas de cobertura)							Média
	Braqui-ária	Milhe-to	Milho safrinha	Milho saf.+ braquiária	Milho saf. + nabo	Crota-lária	Pousio	
----- Luziânia – 2006/07 -----								
PC	2,42	2,74	-	-	-	-	2,48	2,55
CM	3,00	2,38	-	-	-	-	2,27	2,55
PD	2,76	2,47	-	-	-	-	2,17	2,47
----- Sapezal - 2006/07 -----								
PC	1,08	1,16	1,06	0,79	0,99	-	1,08	1,03
CM	1,02	1,03	0,98	1,16	1,10	-	1,02	1,05
PD	0,99	1,07	1,06	1,05	1,14	-	0,73	1,01
----- Tasso Fragoso - 2005/06 -----								
PC	2,20	1,92	-	-	-	-	1,62	1,91
CM	1,37	1,99	-	-	-	-	2,09	1,82
PD	1,65	1,78	-	-	-	-	1,72	1,72
----- Costa Rica - 2005/06 -----								
PC	1,70	1,45	1,63	-	-	1,81	1,81	1,68
CM	1,71	1,72	1,15	-	-	1,76	1,66	1,60
PD	1,06	0,94	1,11	-	-	1,12	1,03	1,05
Média	1,75	1,72	1,17	1,00	1,08	1,56	1,64	1,70

TABELA 23. Carbono acumulado na matéria seca da parte aérea do algodão (Mg ha⁻¹) e adicionado ao solo em áreas experimentais do Cerrado submetidas a manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo.

Manejo do solo	Tratamentos (Culturas de cobertura)							Média
	Braqui-ária	Milhe-to	Milho safrinha	Milho saf.+ braquiária	Milho saf. + nabo	Crota-lária	Pousio	
----- Costa Rica – 2006/07 -----								
PC	1,99	2,13	2,01	-	-	2,04	2,00	2,03
CM	2,22	2,14	2,19	-	-	2,00	2,24	2,16
PD	2,08	2,10	2,17	-	-	2,16	2,07	2,12
----- Sapezal – 2005/06 -----								
PC	1,85	1,66	1,57	1,54	1,78	-	1,50	1,65
CM	1,44	1,98	1,82	1,85	1,44	-	1,30	1,64
PD	2,21	2,21	1,91	1,61	1,82	-	1,59	1,89
Média	1,96	2,03	1,95	1,67	1,68	2,07	1,783	1,92

A soja é a cultura mais cultivada na região do Cerrado e a cultura do algodão está em franca expansão nos últimos anos. São duas culturas que produzem matéria seca de baixa relação C/N e conseqüentemente apresentam alta taxa de mineralização dos resíduos. Diversas culturas alternativas para serem inseridas no sistema de rotação foram pesquisadas. A cultura do milho, tradicional cultura utilizada como rotação de culturas na região sul do Brasil, mas cultivada em pequena escala na região do Cerrado devido ao alto custo logístico para transportar a produção até os principais centros consumidores, a cultura do milho safrinha, para ser cultivada após a colheita da soja precoce, e várias espécies de culturas de cobertura de solo. A cultura do milho possui alta capacidade de produção de matéria seca e de adicionar C ao solo. Na média de dois locais, a adição de C pela parte aérea do milho foi de 5,62 Mg ha⁻¹, aproximadamente três vezes maior que às adições da soja e do algodão (Tabela 24).

TABELA 24. Carbono acumulado na matéria seca da parte aérea do milho (Mg ha⁻¹) e adicionado ao solo em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas de solo.

Manejo do solo	Tratamentos (Culturas de cobertura)			Média
	Braquiária	Milheto	Pousio	
----- Tasso Fragoso - 2006/07 -----				
PC	6,66	7,63	7,95	7,42
CM	7,14	8,18	7,81	7,71
PD	6,80	6,72	5,92	6,48
----- Luziânia - 2005/06 -----				
PC	4,28	4,24	4,26	4,26
CM	3,75	3,90	3,97	3,87
PD	4,15	3,91	3,96	4,01
Média	5,46	5,77	5,65	5,62

Mesmo na condição de milho safrinha (2^a safra), a produção de matéria seca foi elevada (Tabela 25). A adição de C pelos resíduos da parte aérea atingiu média de 4,22 Mg ha⁻¹, mais de duas vezes a adição da soja e do algodão. Espécies de cobertura de solo são uma alternativa viável para anteceder ou suceder às culturas de soja e algodão para aumentar a adição de C ao sistema e tornar o sistema de produção sustentável. Na média dos quatro locais, a adição de C pela braquiária *ruziensis* foi de 3,01 Mg ha⁻¹, mas em Sapezal a adição foi de 4,52 Mg ha⁻¹ (Tabela 25). A adição média do milheto de outono foi

2,64 Mg ha⁻¹, mas em Costa Rica atingiu 3,38 Mg ha⁻¹. O milho semeado na primavera, antes do plantio da cultura principal, adicionou 2,07 Mg ha⁻¹ (Tabela 25), sendo uma alternativa viável a ser utilizada nas lavouras que serão plantadas com algodão no mês de dezembro. Também foram determinadas as adições de C pelo nabo forrageiro, crotalária juncea e vegetação espontânea, as quais foram de 1,90, 0,71 e 1,33 Mg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 25). Os dados de produção de matéria seca e adição de C das coberturas de solo determinados por Lamas & Staut (2005) foram muito similares às determinações deste trabalho, confirmando o alto potencial de produção de matéria seca na região do Cerrado por culturas de cobertura de solo. Os autores mediram a produção de matéria seca em dois locais (Primavera do Leste-MT e Sorriso-MT) e em duas épocas de plantio (outono e primavera). Considerando 40% de C na matéria seca e valores médios dos dois locais, as culturas apresentaram as seguintes adições: milho 2,2 e 3,5 Mg ha⁻¹, Braquiária 1,6 e 3,5 Mg ha⁻¹, Crotalária juncea 1,7 e 3,5 Mg ha⁻¹, na primavera e outono, respectivamente. A parcela em pousio adicionou 1,4 Mg ha⁻¹ no outono, valor similar ao determinado no presente estudo. O milho é a cultura de cobertura de solo mais utilizada na região do Cerrado e segundo Salton & Hernani (1994), a sua produção de matéria seca varia de 5,0 a 8,0 Mg ha⁻¹, ou seja 2,0 a 3,2 Mg ha⁻¹ de C (40% de C). Todas estas culturas de coberturas listadas são alternativas a serem consideradas no planejamento de rotação de culturas para incrementar a quantidade de C a ser adicionada ao sistema solo, na tentativa de compensar as baixas adições de C das culturas de soja e algodão.

Com base nas determinações de adição de C realizadas nas safras 2005/06 e 2006/07, no histórico de produtividade das culturas e na rotação de culturas utilizada em cada local, foi possível estimar as adições médias de C durante o período experimental (até 2005), as quais foram de 5,12, 5,74, 4,94 e 4,16 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, em Luziânia, Costa Rica, Tasso Fragoso e Sapezal, respectivamente (Tabela 26).

TABELA 25. Carbono acumulado na matéria seca da parte aérea (Mg ha^{-1}) das culturas de cobertura, para diferentes épocas, em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto).

Manejo do solo	Braquiária	Milheto Outono	Milheto Primavera	Milho safrinha	Milho safrinha + braquiária	Nabo de primavera	Crotalária	Pousio	Média
----- Luziânia – 2006/07 -----									
PC	1,51	-	-	-	-	-	-	-	1,51
CM	1,27	-	-	-	-	-	-	-	1,27
PD	1,60	-	-	-	-	-	-	-	1,60
----- Costa Rica - 2005/06 -----									
PC	3,80	3,27	2,27	3,97	-	0,73	1,80	1,33	2,45
CM	4,13	3,13	2,13	4,90	-	0,80	1,73	1,33	2,60
PD	4,00	3,73	1,80	4,04	-	0,60	1,87	1,33	2,48
----- Tasso Fragoso - 2005/06 -----									
PC	2,04	3,09	-	-	-	-	-	-	2,56
CM	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PD	2,43	3,03	-	-	-	-	-	-	2,73
----- Sapezal - 2004/05 -----									
PC	2,54	1,48	-	-	-	-	-	-	2,01
CM	2,10	1,60	-	-	-	-	-	-	1,85
PD	3,20	1,75	-	-	-	-	-	-	2,48
----- Sapezal - 2006/07 -----									
PC	4,60	-	-	4,14	3,80	-	1,86	-	3,60
CM	5,20	-	-	4,14	3,80	-	2,07	-	3,80
PD	3,75	-	-	4,14	3,80	-	2,06	-	3,44
Média	3,01	2,64	2,07	4,22	3,80	0,71	1,90	1,33	

TABELA 26 Quantidade média de carbono adicionada ao solo (Mg ha^{-1}) em áreas experimentais do Cerrado, submetida a manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto).

Local	Manejo do Solo			Média
	PC	CM	PD	
Luziânia (1992-2005)	5,12	5,12	5,13	5,12
Costa Rica (1994-2005)	5,10	5,68	6,43	5,74
Tasso Fragoso (2000-2005)	4,98	4,83	5,01	4,94
Sapezal (2001-2005)	4,16	4,18	4,13	4,16

O N é o nutriente absorvido em maior quantidade pela maioria das culturas cultivadas (Reichardt et al., 1979). Assim como o C, sua fonte primária é a atmosfera, pois cerca de 80% do gás atmosférico é constituído por N. A maioria das espécies leguminosas possuem a capacidade de fixar o N atmosférico e 100% da sua demanda pode ser atendida por este processo. Aproximadamente dois terços do nitrogênio utilizado na agricultura do mundo provêm da fixação biológica (Greenwood, 1982). Mas para a fixação biológica funcionar, as plantas necessitam fornecer alta quantidade de energia para as bactérias fixadoras, em conseqüência, a fixação biológica somente acontece eficientemente em plantas vigorosas e bem desenvolvidas, condição presente somente em solos bem manejados. Além da fixação biológica, o N pode chegar até o solo através da água da chuva e dos fertilizantes. As plantas não fixadoras utilizam o N presente no solo independente da origem.

Para avaliar o balanço de N no sistema de produção do Cerrado foram determinadas a absorção e a exportação de N pelas espécies comerciais e a absorção e a reciclagem de N pelas espécies utilizadas como cobertura de solo (Tabelas 27 a 30). Os dados demonstram a alta capacidade de fixação biológica e absorção de N pela cultura da soja. Na média de todos os locais, a soja absorveu 228 kg ha^{-1} , mas ao mesmo tempo exportou 180 kg ha^{-1} , 79% da absorção, adicionando ao sistema solo apenas 48 kg ha^{-1} , valor pequeno relativo à absorção total, mas ao mesmo tempo significativo, considerando que não houve adição de fertilizante nitrogenado. Além disso, há o N a ser reciclado pelo sistema radicular da soja, contribuindo assim de forma significativa no suprimento de N ao sistema solo. A cultura do milho apresenta alta demanda de N (absorção média de dois locais de 262 kg ha^{-1}), equivalente a 66% da quantidade absorvida.

A cultura do algodão não absorve tanto N quanto o milho, mas praticamente toda a quantidade absorvida é exportada. Na média de dois locais atingiu 144 kg ha^{-1} . No momento da coleta das plantas para determinação da matéria seca total da parte aérea e a absorção de nutrientes (estádio da planta de máximo acúmulo de matéria seca) é possível que na cultura do algodão tenha ocorrido a perda de folhas, subestimando a absorção total de N. Tanto a cultura do milho como a do algodão, possuem alta demanda por N e as adubações nitrogenadas são caras e, além disso, nem sempre eficientes, devido às perdas por lixiviação e escoamento superficial. Isso é especialmente acentuado nas condições tropicais do Cerrado, onde uma chuva torrencial pode provocar a perda do produto aplicado. Mais uma vez, vê-se nesse ponto a necessidade de desenvolver sistemas de rotação de culturas eficientes na fixação biológica de N_2 e no aproveitamento do N residual da cultura anterior. Com isso, haverá economia de fertilizantes, redução na contaminação de lençol freático, por dosagens elevadas de fertilizantes aplicadas sem o escalonamento demandado pela absorção das plantas e, ao mesmo tempo, maior facilidade para acumular C e N no solo (Sisti et al., 2004). O suprimento de N é um componente chave para reduzir perdas de C e aumentar os estoques de C no solo (Ismail et al., 1994). O desenvolvimento de sistemas de produção sustentáveis estão diretamente relacionados ao planejamento de adequado aporte de C pelas espécies comerciais e coberturas de solo utilizadas no sistema de rotação de culturas e pelo adequado suprimento de N via utilização de espécies com capacidade de fixação biológica e aporte de adubações nitrogenadas.

TABELA 27. Nitrogênio absorvido pela cultura da soja e exportado no grão (kg ha⁻¹) em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo.

Manejo do solo	Tratamentos (Culturas de cobertura)						
	Braquiária	Milheto	Milho safrinha	Milho saf.+ braquiária	Milho saf.+ nabo	Crotalária	Pousio
Absorvido							
----- Luziânia – 2006/07 -----							
PC	298,0	314,5	-	-	-	-	301,8
CM	350,0	315,0	-	-	-	-	291,0
PD	322,6	309,3	-	-	-	-	268,6
----- Sapezal - 2006/07 -----							
PC	183,2	190,9	175,9	167,2	201,5	-	186,5
CM	173,7	172,3	180,6	177,9	192,2	-	166,0
PD	181,7	172,7	192,1	176,9	211,3	-	164,1
----- Tasso Fragoso - 2005/06 -----							
PC	250,4	234,1	-	-	-	-	206,5
CM	205,2	267,3	-	-	-	-	256,8
PD	220,5	237,6	-	-	-	-	218,0
----- Costa Rica - 2005/06 -----							
PC	276,4	249,0	281,4	-	-	275,0	272,9
CM	250,3	261,2	222,2	-	-	291,5	260,7
PD	208,3	207,0	235,2	-	-	247,8	211,1
Média	243,4	244,2	214,6	174,0	201,7	271,4	248,2
Exportado							
----- Luziânia – 2006/07 -----							
PC	197,9	198,1	-	-	-	-	198,4
CM	190,0	205,5	-	-	-	-	202,1
PD	198,9	201,3	-	-	-	-	200,0
----- Sapezal - 2006/07 -----							
PC	190,0	189,1	193,7	194,5	192,6	-	197,6
CM	195,6	186,8	191,0	187,7	191,9	-	193,8
PD	188,3	193,4	191,5	191,8	189,4	-	193,8
----- Tasso Fragoso - 2005/06 -----							
PC	227,9	229,8	-	-	-	-	221,1
CM	239,3	238,1	-	-	-	-	231,9
PD	232,3	227,7	-	-	-	-	232,9
----- Costa Rica - 2005/06 -----							
PC	148,4	155,0	147,1	-	-	139,7	135,8
CM	154,6	162,1	160,0	-	-	168,6	142,9
PD	158,0	175,6	173,2	-	-	175,2	165,6
Média	193,4	196,9	176,1	191,3	191,3	161,2	148,1

TABELA 28. Nitrogênio absorvido pela cultura do algodão e exportado no caroço e pluma (kg ha^{-1}) em áreas experimentais do Cerrado, submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo.

Manejo do solo	Tratamentos (Culturas de cobertura)						
	Braquiária	Milheto	Milho safrinha	Milho saf.+ braquiária	Milho saf. + nabo	Crotalária	Pousio
Absorvido							
----- Costa Rica - 2006/07 -----							
PC	93,6	119,2	103,3	-	-	94,4	108,5
CM	127,1	124,1	141,5	-	-	120,2	104,3
PD	105,0	106,4	128,7	-	-	105,5	106,5
----- Sapezal - 2005/06 -----							
PC	176,3	156,6	145,4	129,1	148,4	-	157,3
CM	147,1	152,3	156,5	180,3	151,0	-	135,0
PD	230,5	196,5	166,1	143,8	147,9	-	132,5
Média	146,6	142,5	140,3	151,1	149,1	106,7	124,0
Exportado							
----- Costa Rica - 2006/07 -----							
PC	122,4	135,2	-	-	-	133,1	116,7
CM	162,2	136,8	-	-	-	135,0	126,1
PD	114,5	103,7	-	-	-	126,5	114,6
----- Sapezal - 2005/06 -----							
PC	156,1	154,1	145,0	153,1	151,4	-	151,1
CM	162,4	164,1	164,6	166,4	160,0	-	147,6
PD	171,1	157,5	128,6	150,6	166,6	-	134,8
Média	146,5	141,9	138,0	156,7	159,3	131,3	131,8

TABELA 29. Nitrogênio absorvido pela cultura do milho e exportado no grão (kg ha^{-1}) em áreas experimentais do Cerrado, submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto) com distintas coberturas do solo.

Manejo do solo	Tratamentos (Culturas de cobertura)		
	Braquiária	Milheto	Pousio
Absorvido			
----- Tasso Fragoso - 2006/07 -----			
PC	347,3	316,3	325,0
CM	293,4	389,3	424,1
PD	262,1	236,5	232,7
----- Luziânia - 2005/06 -----			
PC	216,7	210,8	213,5
CM	210,1	203,0	191,6
PD	220,7	208,2	209,3
Média	258,4	260,7	266,0
Exportado			
----- Tasso Fragoso - 2006/07 -----			
PC	209,3	239,8	249,9
CM	224,4	257,1	245,2
PD	213,8	211,2	186,0
----- Luziânia - 2005/06 -----			
PC	127,2	119,8	121,1
CM	112,7	110,8	106,6
PD	122,7	120,5	138,9
Média	168,4	176,5	174,6

TABELA 30. Reciclagem de nitrogênio (kg ha⁻¹) pelas culturas de cobertura do solo, em diferentes épocas, em áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo ((PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto).

Manejo do solo	Braquiária	Milheto Outono	Milheto Primavera	Milho safrinha	Milho safrinha + braquiária	Nabo de primavera	Crotalária	Pousio	Média
----- Luziânia – 2006/07 -----									
PC	46,6	-	-	-	-	-	-	-	46,6
CM	36,0	-	-	-	-	-	-	-	36,0
PD	52,4	-	-	-	-	-	-	-	52,4
----- Costa Rica - 2005/06 -----									
PC	178,6	117,6	81,6	164,8	-	29,0	75,6	53,8	100,2
CM	189,1	115,2	78,4	117,3	-	32,3	78,9	50,5	94,5
PD	134,0	118,5	57,2	94,8	-	23,9	61,6	44,0	76,3
----- Tasso Fragoso - 2005/06 -----									
PC	108,3	111,5	-	-	-	-	-	-	109,9
CM	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PD	130,4	110,5	-	-	-	-	-	-	120,5
----- Sapezal - 2006/07 -----									
PC	111,9	-	-	17,3	53,6	-	53,9	-	59,2
CM	115,7	-	-	26,3	36,5	-	79,8	-	64,6
PD	78,5	-	-	21,0	17,9	-	73,1	-	47,6
Média	107,4	114,6	72,4	73,6	36,0	28,4	70,5	49,4	

4.3.3. Simulação de estoques de C em função do manejo do solo e da rotação de culturas

O cultivo de culturas anuais após a abertura do Cerrado nativo por 20, 15, 10 e 4 anos em Costa Rica, Luziânia, Tasso Fragoso e Sapezal, respectivamente, predominantemente com soja e em preparo convencional do solo, antes da instalação dos experimentos, provocou redução no estoque de C do solo na ordem de 0,66, 0,02, 0,30 e 1,71 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em relação ao estoque de C do Cerrado nativo, equivalentes a perdas de 20,5%, 0,4%, 7,4% e 10,6% do estoque total original, cujas taxas são consideradas normais para o sistema de produção implantado. A taxa de perda anual foi mais elevada em Sapezal porque a determinação foi realizada nos primeiros quatro anos após a abertura do Cerrado, quando normalmente as taxas de perdas são mais acentuadas. Na mesma região tropical do Cerrado, Salton (2005) determinou perda de 5% em 20 anos de cultivo e Silva et al. (1994) determinaram perda de 35% em apenas 5 anos de cultivo. Na região subtropical do Sul do Brasil, Sá et al. (2001) determinaram perda de 35% em 10 anos de cultivo, enquanto as perdas encontradas por Lovato (2001), e Diekow (2003) foram de 27% e 16%, em 14 e 16 anos de cultivo, respectivamente.

Após a instalação dos experimentos, nos quatro locais, foi possível avaliar a evolução do estoque de C em função de três manejos de solo (PC, CM e PD) e da implantação de um sistema de rotação de culturas com soja e milho em Luziânia, soja e algodão em Sapezal e soja, milho e algodão em Costa Rica e Tasso Fragoso, com coberturas de solo eventuais. Em todos os locais estudados, a utilização do sistema PD proporcionou condições para acúmulo de C no solo, conforme demonstrado na tabela 19, mas mesmo no sistema de PC houve redução nas taxas de perda de C em relação ao período anterior à instalação dos experimentos, para 0,22, 0,03, 0,05 e 0,67 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, em Costa Rica, Luziânia, Tasso Fragoso e Sapezal, respectivamente. As menores taxas de perda de C são explicadas pela tendência natural de redução nas perdas ao longo do tempo e pelo aumento na adição de C em função da alteração na rotação de culturas em relação ao predominante monocultivo de soja praticado anteriormente.

Os indicadores calculados com base nos dados de evolução do estoque de C medidos até 2005 foram utilizados para montar cenários de estoque de C para os próximos 50 anos, para cada um dos três sistemas de manejo do solo, simulando dois níveis de adição, de acordo com planejamento de rotação de culturas (Tabela 31). O cenário de baixa adição considera o plantio de soja e algodão em rotação de cultura e sem a implantação de espécies para cobertura de solo, apenas a vegetação espontânea normal das condições de pousio. No cenário de alta adição de C, foi considerado um planejamento de rotação de culturas tecnicamente e economicamente viável, para as condições de cada local. Em Costa Rica e Sapezal, a rotação envolve o plantio de soja precoce, milho 2^a safra, algodão e cultura de cobertura de solo com milheto pré-plantio de algodão. Em Luziânia e Tasso Fragoso, como não é possível plantar milho 2^a safra devido menor ciclo de chuvas, foi adicionado o milho safra entre a safra de soja e a safra de algodão, mantendo a rotação de culturas soja-milho-algodão e coberturas de solo com braquiária ou milheto após o milho e pousio após soja. Com base nas adições de C determinadas para cada uma das culturas nas safras 05/06 e 06/07 (Tabelas 22 a 25), as adições de C estimadas pela parte aérea e raízes das culturas comerciais e de cobertura de solo variaram de 3,1 a 4,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no planejamento de baixa adição de C e de 6,0 a 7,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no planejamento de rotação de culturas de alta adição de C, para os diferentes locais.

As Figuras 11 a 14 mostram que com baixa adição de C, em todos os locais, e independente do sistema de manejo de solo a ser utilizado, haverá perda de C no solo, mostrando que a redução do revolvimento do solo isoladamente não é suficiente para estancar as perdas de C em sistemas de produção na região do Cerrado, se as adições de C não forem suficientes para compensar as perdas. Por outro lado, com sistemas de rotação de culturas com alta adição de C, haverá em todos os locais aumento nos estoques de C no solo, especialmente com a utilização do manejo do solo em PD e CM. Quando é utilizada alta adição e PC, em três locais a simulação mostra que haverá pequeno acúmulo de C e em Sapezal pequena redução. Esse comportamento diferente de Sapezal é explicado pelo maior k_2 em relação aos demais locais, consequência do cálculo realizado considerando os dados entre 4° e 8° ano após a abertura do Cerrado. Assim como aconteceu nos demais

TABELA 31. Planejamento de rotação de culturas para proporcionar baixas e altas adições de carbono ao solo em diferentes locais do Cerrado.

Local	Culturas e respectivas adições anuais de C pela parte aérea e raízes, Mg ha ⁻¹											Média
	Ano 1					Ano 2			Ano 3			
	Soja 2,43	Milho Safrinha 5,83	Milho Outubro 3,76	Pousio I 1,9	Pousio II 0,95	Milho 8,04	Braquiária 4,3	Milho Out. 3,76	Pousio I 0,95	Milho Primavera. 2,95	Algodão 2,73	
----- <i>Rotação de cultura para baixa adição</i> -----												
Luziânia	X				X						X	3,1
Costa Rica	X			X					X		X	4,5
Tasso Fragoso	X				X						X	3,1
Sapezal	X			X					X		X	4,5
----- <i>Rotação de cultura para alta adição</i> -----												
Luziânia	X				X	X	X				X	6,2
Costa Rica	X	X								X	X	7,0
Tasso Fragoso	X				X	X		X			X	6,0
Sapezal	X	X								X	X	7,0

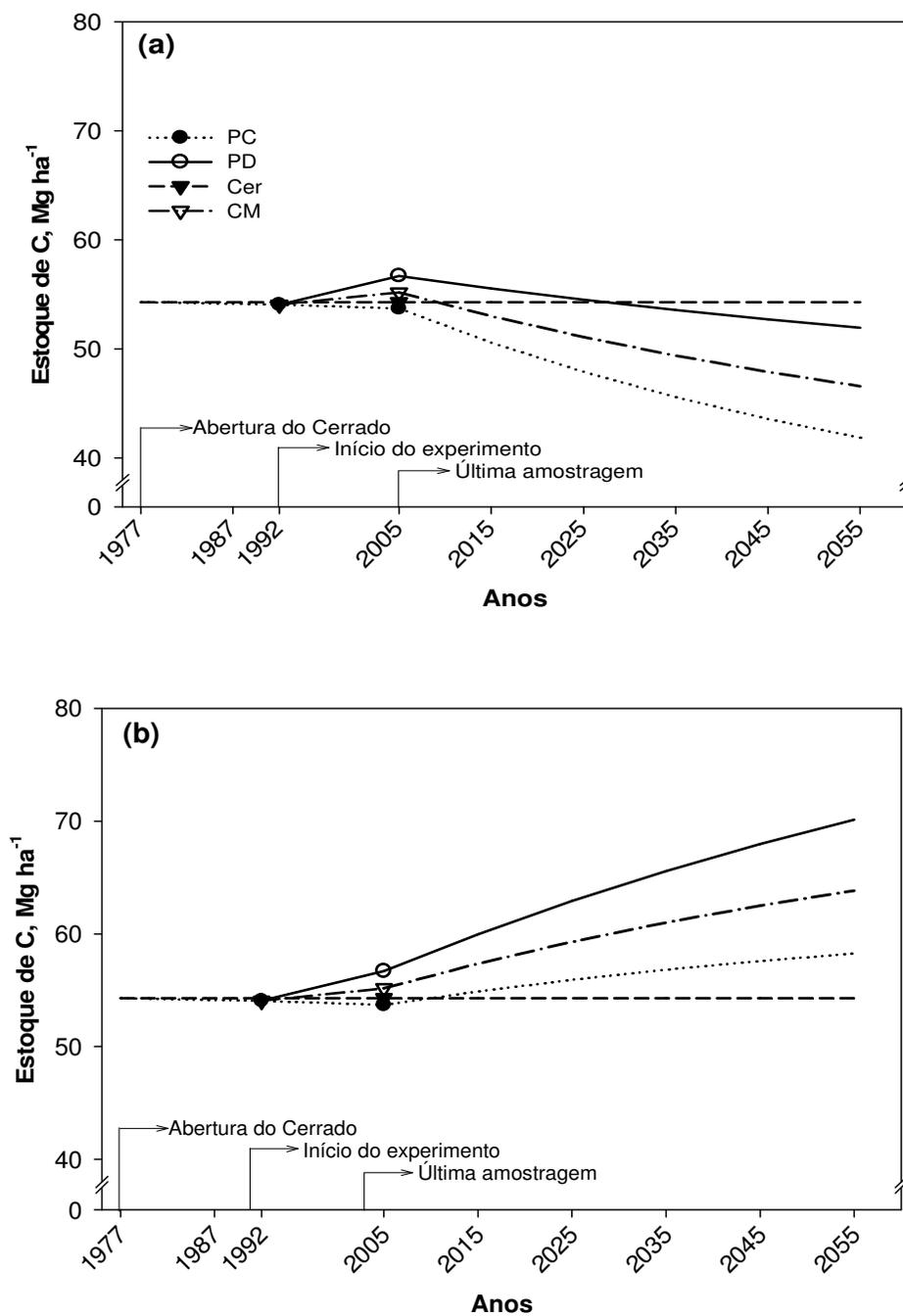


FIGURA 11. Estoques de carbono no solo em três sistemas de manejo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e estimativas desses estoques para sistemas de culturas em condições de baixa (a) e alta (b) adição de carbono ao solo após o ano de 2005 para a área experimental de Luziânia.

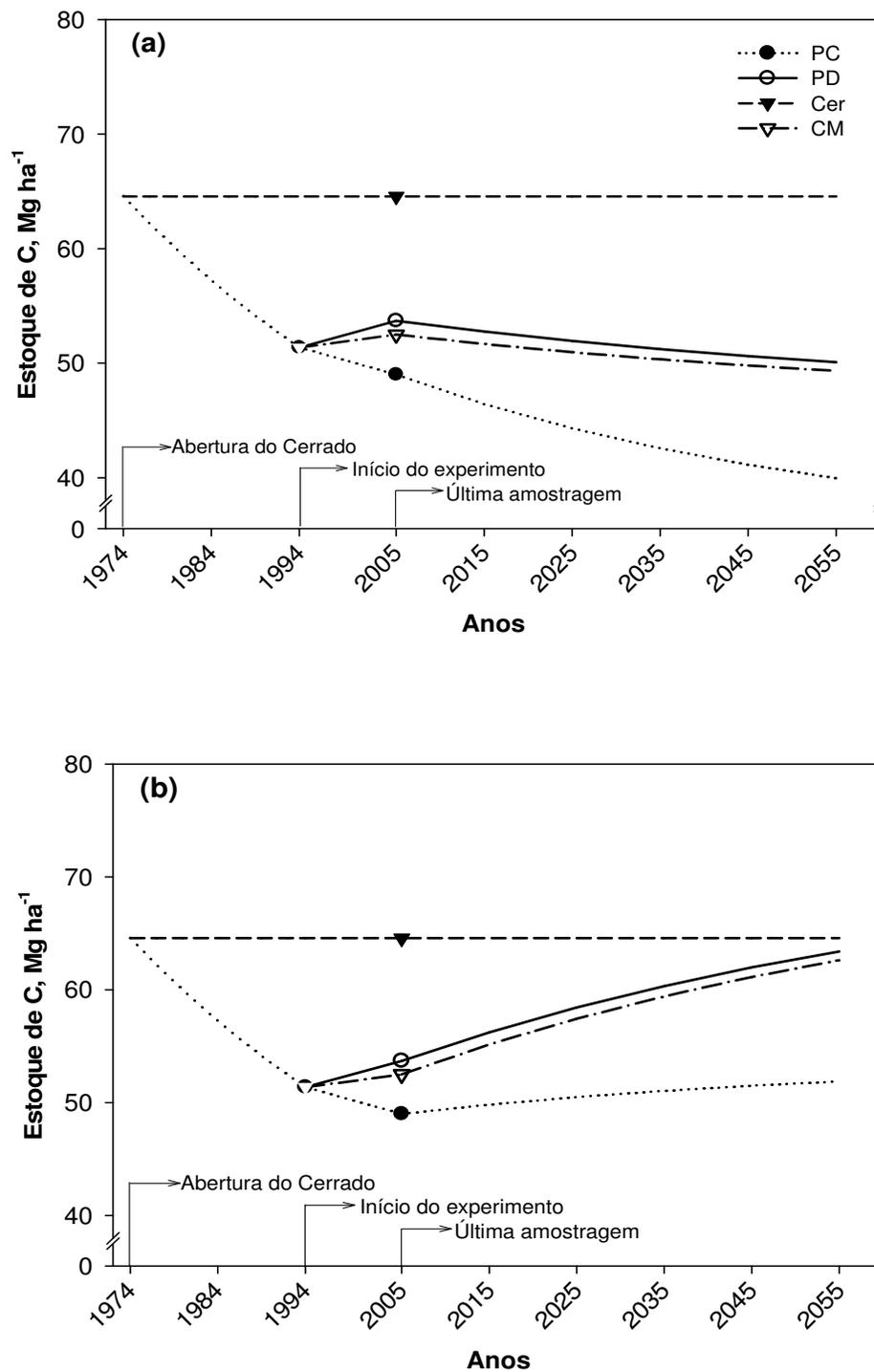


FIGURA 12. Estoques de carbono no solo em três sistemas de manejo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e estimativas desses estoques para sistemas de culturas em condições de baixa (a) e alta (b) adição de carbono ao solo após o ano de 2005 para a área de Costa Rica.

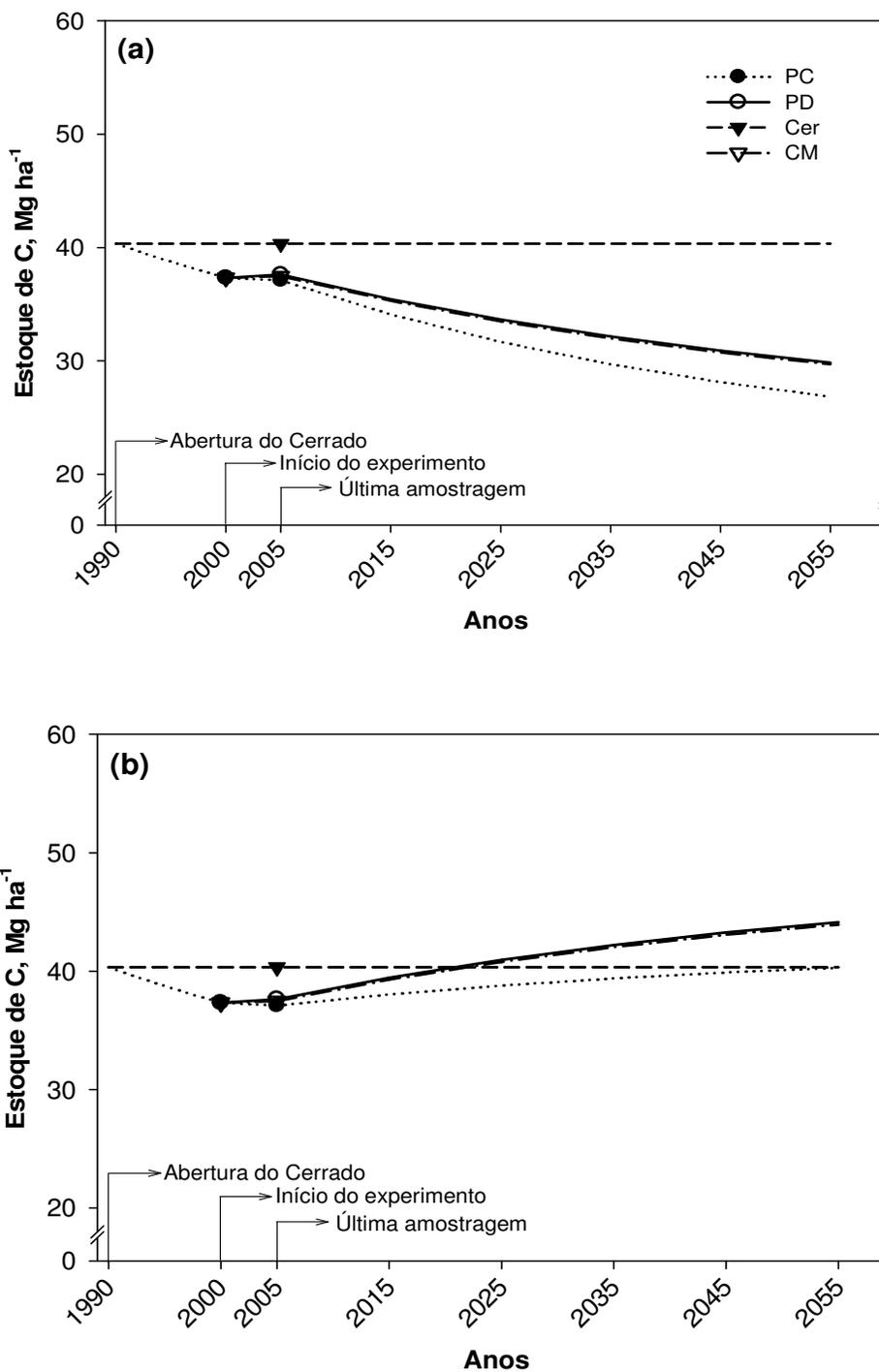


FIGURA 13. Estoques de carbono no solo em três sistemas de manejo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e estimativas desses estoques para sistemas de culturas em condições de baixa (a) e alta (b) adição de carbono ao solo após o ano de 2005 para a área experimental de Tasso Fragoso.

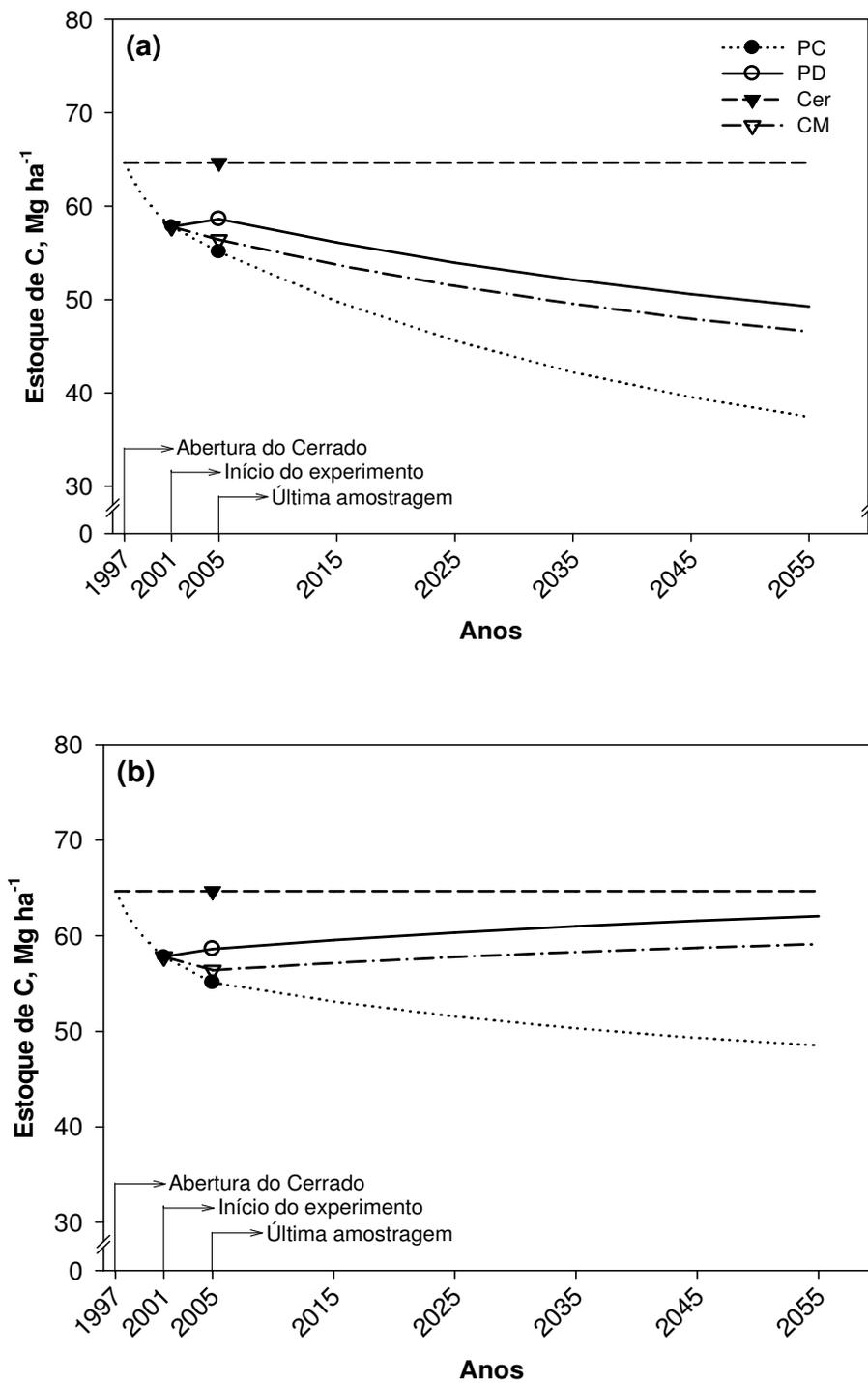


FIGURA 14. Estoques de carbono no solo em três sistemas de manejo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e estimativas desses estoques para sistemas de culturas em condições de baixa (a) e alta (b) adição de carbono ao solo após o ano de 2005 para a área experimental de Sapezal.

locais cultivados por um período maior, a tendência é redução no k_2 e redução nas perdas, conforme foi mostrado na tabela 20. Com isso, é possível afirmar que com um sistema de rotação de culturas que permita altas adições de C e implantando um sistema eficiente de controle da erosão, para evitar perdas não contabilizadas neste modelo, é possível manter um nível mínimo de estoque de C no solo no sistema de preparo convencional. Mas, devido as chuvas torrenciais típicas das regiões tropicais, o preparo convencional do solo está associado com presença de erosão, que por sua vez, provoca maior demanda de fertilizantes para suprir as perdas e manter a fertilidade do solo. Além disso, maior revolvimento do solo significa maior fixação de P pela maior exposição do nutrientes aos sítios de fixação e maior perda de bases devido a menor capacidade de retenção e ao menor poder tampão do solo. Somado-se a isso, a redução no teor de matéria orgânica no solo cria condições favoráveis para maior presença de doenças de solo devido menor atividade microbiológica e menor competição entre os microorganismos benéficos no combate aos patogênicos, caracterizando que para manter o sistema de produção sustentável nas condições tropicais do Cerrado brasileiro é necessário reduzir o revolvimento do solo e utilizar sistemas conservacionistas de manejo de solo, favoráveis ao gradual acúmulo de C.

Além disso, os níveis de seqüestro de C estão associados estreitamente com os níveis de adição de C ao solo (Sá et al., 2001; Zinn et al., 2005b). Em sistema de pastagem permanente Salton (2005) encontrou taxas de acúmulo de C de $0,91 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e houve redução para $0,44 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no sistema de dois anos com pastagem e dois anos com soja, em relação ao Cerrado nativo. Com manejo do solo sob PD ou CM e a utilização de um sistema de rotação de culturas com alta adição de C, os estoques de C em 50 anos serão maiores do que o próprio Cerrado nativo em Luziânia e Tasso Fragoso e atingirão nível muito próximo ao do Cerrado nativo em Sapezal e Costa Rica, com seqüestro de $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ no sistema plantio direto, na média dos quatro locais, variando de $2,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ em Sapezal a $14,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ em Luziânia. Considerando que a região do Cerrado cultiva em torno de 21 milhões de ha com culturas anuais em 2008, com altas adições de C e sob PD, há um potencial de sequestro de 0,17 Gigaton de C.

Se o objetivo fosse manter o “*statuo quo*” em termos de estoque de C no solo nos diferentes locais e em cada manejo de solo, utilizando o sistema de rotação de culturas com soja, milho e algodão, seriam necessárias adições médias de 6,4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no PC e 5,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no PD, variando de 5,3 a 8,6 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no PC e 3,8 a 6,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no PD, em Luziânia e Sapezal, respectivamente (Tabela 32), incluindo parte aérea e raízes das culturas. As maiores taxas de adição na região de Sapezal e menores na região de Luziânia estão associadas principalmente às diferenças no k₂ determinados para cada um dos locais. Além das diferenças de mineralogia, textura, regime pluviométrico, temperatura, etc, entre Luziânia e Sapezal, o k₂ determinado para Luziânia é reflexo de 13 anos de evolução no estoque de C no solo, em sistema de produção cultivado há 28 anos e em Sapezal o k₂ é reflexo de variação no estoque de C durante quatro anos e em sistema de produção cultivado há oito anos apenas, podendo estar super estimado, e assim superestimando a necessidade de adição de C para manter o sistema de produção sustentável. As condições de solo e clima do Sapezal são muito similares às de Costa Rica, apenas com altitude menor, podendo ser uma referência mínima em termos de necessidade de adição de C, onde para PC e PD são necessários 6,5 e 5,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Os valores determinados para manter o estoque de C no solo para o ambiente de Cerrado foram muito similares aos valores determinados para a região sub-tropical do Sul do Brasil, de 4,4 e 8,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o PD e PC, respectivamente (Mielniczuk et al., 2003).

TABELA 32. Adições de carbono (Mg ha⁻¹ ano⁻¹), parte aérea e raízes, necessárias para manter os estoques de carbono do solo nos níveis observados em 2005 para áreas experimentais no Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional; CM= cultivo mínimo; PD= plantio direto).

Local	Manejo do solo		
	PC	CM	PD
Luziânia	5,3	4,6	3,8
Costa Rica	6,5	5,0	5,0
Tasso Fragosso	5,3	4,6	4,6
Sapezal	8,6	6,5	6,5
Média	6,4	5,2	5,0

4.4. Conclusões

Sistemas de produção com soja e algodão na região do Cerrado, com adequado manejo do solo e adição de resíduos culturais de milho e plantas de cobertura de solo, são tecnicamente sustentáveis.

O cultivo do solo de cerrado provoca redução dos estoques de carbono, mas é possível recuperá-los aos níveis originais através da utilização do plantio direto e/ou cultivo mínimo e de sistemas de rotação de culturas com alta adição de carbono ao solo.

Para manter os níveis de estoque de carbono no solo, na média dos quatro locais estudados, estimou-se que é necessária a adição de resíduos vegetais em quantidades equivalentes a $5,0 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no plantio direto, $5,2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no cultivo mínimo e $6,4 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no preparo convencional.

5. CAPÍTULO IV: ESTUDO II – EVOLUÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO NO CERRADO BRASILEIRO

5.1. Introdução

Solos da região do Cerrado apresentam propriedades físicas, como profundidade, textura e estrutura, favoráveis ao uso agrícola, mas por outro lado, apresentam características químicas extremamente limitantes. A alta toxidez por alumínio (Al) e os baixos teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e potássio (K) são características da maioria dos solos sob vegetação de Cerrado (Sousa et al., 1985; Sousa & Lobato, 2002a). Para viabilizar o cultivo e a produção agrícola é necessário elevado investimento na correção da acidez e da fertilização do solo.

A expansão da produção agrícola na região do Cerrado se intensificou a partir da década de 70. Para suportar tecnologicamente o desenvolvimento da região, em 1977 a EMBRAPA criou o Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado (CPAC), que desenvolveu tecnologia de correção do solo e adubação para as culturas anuais mais cultivadas, especialmente para a cultura da soja. Tais recomendações foram sintetizadas por Sousa & Lobato (2002a). A tecnologia gerada pela EMBRAPA permitiu a expansão da área cultivada nas últimas três décadas e possibilitou expressivo aumento de produtividade das culturas.

Estudos de calibração e a experiência acumulada ao longo deste período geraram um conjunto de informações, que tornaram possível a formulação de recomendações precisas de dosagens de calcário, gesso, fósforo, potássio e micronutrientes para corrigir a fertilidade do solo e permitir alta produtividade das culturas. No entanto, os trabalhos de pesquisa

desenvolvidos tinham como objetivo avaliações de curto prazo e respostas rápidas para atender a demanda existente, visando informar ao produtor qual a dosagem de fertilizante e corretivo que ele deveria utilizar para obter alta produtividade de uma determinada cultura. A região carece de estudos de longo prazo, que além de avaliar o resultado sobre as culturas anualmente, consigam visualizar as conseqüência das práticas utilizadas atualmente sobre a dinâmica de nutrientes no solo em longo prazo, ou seja, estudar o sistema de produção, a eficiência das adubações e, com base nestas informações, ajustar as recomendações de fertilizantes visando a máxima eficiência técnica, econômica e ambiental. Máxima eficiência técnica e econômica medida através do custo da unidade de produto produzida e máxima eficiência ambiental medida pela maximização da utilização das fontes de energia externas ao sistema de produção e redução na geração de resíduos e contaminação do ambiente.

A região do Cerrado engloba 207 milhões de hectares (Macedo, 1996), 24% do território nacional, e existe grande variação edafoclimática entre as diferentes micro-regiões. A soja é a cultura mais cultivada, mas, na medida em que os solos estão sendo corrigidos e apresentando alto nível de fertilidade, os produtores estão introduzindo outras culturas, como milho e algodão, para promover a rotação de culturas e reduzir os riscos associados ao monocultivo. O detalhamento das recomendações de adubação com visão do sistema de produção, considerando as especificidades micro-regionais e o sistema de rotação de culturas, é uma necessidade atual da região. Este trabalho tem como objetivo avaliar a evolução da fertilidade do solo, medir a eficiência agrônômica das adubações e a produtividade das culturas de soja, milho e algodão, em quatro locais, nos estados do Goiás, Mato Grosso do Sul, Maranhão e Mato Grosso, que representam as principais micro-regiões do Cerrado brasileiro.

5.2. Material e Métodos

Para o presente estudo foram utilizadas as amostras de solo coletadas nas áreas experimentais de Luziânia-GO (1992 a 2007, 15 anos), Costa Rica-MS (1994 a 2007, 13 anos), Tasso Fragoso-MA (2000 a 2007, 7 anos) e Sapezal-MT (1997 a 2007, 10 anos), nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, em diferentes manejos de solo: preparo convencional

(PC), plantio direto (PD), cultivo mínimo (CM – apenas em Sapezal) e Cerrado nativo.

Para a determinação do balanço de nutrientes (P, K, Ca e Mg) nas áreas experimentais foram considerados os seguintes parâmetros: a produção total e exportação de nutrientes pelas culturas; a adição total de nutrientes pelos fertilizantes e corretivos; e o nível de fertilidade e acúmulo de nutrientes no solo. Os dados de produção total dos produtos comercialmente explorados (grãos para soja e milho e algodão em caroço), nas safras compreendidas no período experimental para cada local, foram obtidos junto a SLC Agrícola S.A., os quais já haviam sido tratados estatisticamente, usando-se o Teste de Duncan 5%. Para mensuração da quantidade de cada nutriente que foi exportada pelas culturas (soja, milho e algodão) foram utilizados os índices de exportação de nutrientes por essas culturas, determinados em condições experimentais e de lavouras, utilizados pela SLC Agrícola S.A. (Tabela 33).

Para determinar a adição total de nutrientes, foi utilizado o histórico de cada área experimental e foram contabilizadas todas as aplicações de fertilizantes e insumos contendo P, K, Ca e Mg, tendo-se desta forma a adição total de nutrientes durante o período experimental em cada área avaliada. De posse dos valores das quantidades adicionadas e exportadas de nutrientes, foi feito o cálculo do balanço de P, K, Ca e Mg nos sistemas de manejo utilizados em cada área experimental. Um resumo desse balanço, para cada nutriente em todos os experimentos, é apresentado nas Tabelas 34 a 37.

TABELA 33. Exportação de fósforo (convertido para P_2O_5), de potássio (convertido para K_2O), cálcio e magnésio para diferentes culturas¹.

Cultura	P (P_2O_5)	K (K_2O)	Ca	Mg
	----- kg Mg ⁻¹ -----			
Soja	9,6	21,6	3,5	2,6
Milho	8,1	7,3	2,0	1,8
Algodão	8,2	12,1	2,4	2,6

¹ Fonte: SLC Agrícola S.A., dados não publicados.

TABELA 34. Resumo do balanço de fósforo para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).

	Local			
	Luziânia	Costa Rica	Tasso Fragoso	Sapezal
Anos de cultivo	15	13	7	10
	----- Produção total grãos e algodão em caroço, Mg -----			
PC	74,1	69,2	33,7	36,0
CM	73,6	70,0	34,5	36,2
PD	74,6	69,1	33,9	35,8
	----- Adição de P ₂ O ₅ , kg ha ⁻¹ -----			
PC, CM e PD	1156,5	1078,0	775,8	1016,3
	----- Exportação de P ₂ O ₅ , kg ha ⁻¹ -----			
PC	646,6	588,5	285,5	324,2
CM	643,7	595,6	291,6	326,7
PD	652,1	588,3	286,5	322,9
	----- Balanço de P ₂ O ₅ , kg ha ⁻¹ -----			
PC	509,9	489,0	490,2	692,1
CM	512,8	481,9	484,1	689,6
PD	504,4	489,2	489,3	693,4

TABELA 35. Resumo do balanço de potássio para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).

	Local			
	Luziânia	Costa Rica	Tasso Fragoso	Sapezal
Anos de cultivo	15	13	7	10
	----- Produção total grãos e algodão em caroço, Mg -----			
PC	74,1	69,2	33,7	36,0
CM	73,6	70,0	34,5	36,2
PD	74,6	69,1	33,9	35,8
	----- Adição de K ₂ O, kg ha ⁻¹ -----			
PC, CM e PD	1095,3	1140,0	625,5	1018,4
	----- Exportação de K ₂ O, kg ha ⁻¹ -----			
PC	984,2	845,7	387,5	633,7
CM	990,1	860,0	393,1	641,2
PD	997,6	846,1	389,3	633,3
	----- Balanço de K ₂ O, kg ha ⁻¹ -----			
PC	111,1	294,0	238,0	384,7
CM	105,2	280,0	232,4	377,2
PD	97,7	293,0	236,2	385,1

TABELA 36. Resumo do balanço de cálcio para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).

	Local			
	Luziânia	Costa Rica	Tasso Fragoso	Sapezal
Anos de cultivo	15	13	7	10
	----- Produção total grãos e algodão em caroço, Mg -----			
PC	74,1	69,2	33,7	36,0
CM	73,6	70,0	34,5	36,2
PD	74,6	69,1	33,9	35,8
	----- Adição de Ca, kg ha ⁻¹ -----			
	1517,1	1316,6	1301,2	2237,9
	----- Exportação de Ca, kg ha ⁻¹ -----			
PC	182,3	172,2	81,6	109,3
CM	181,8	174,6	83,2	110,4
PD	184,4	172,2	81,9	109,1
	----- Balanço de Ca, kg ha ⁻¹ -----			
PC	1359,8	1144,4	1219,5	2128,6
CM	1359,8	1142,0	1218,0	2127,5
PD	1357,7	1144,4	1219,2	2128,8

TABELA 37. Resumo do balanço de magnésio para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).

	Local			
	Luziânia	Costa Rica	Tasso Fragoso	Sapezal
Anos de cultivo	15	13	7	10
	----- Produção total grãos e algodão em caroço, Mg -----			
PC	74,1	69,2	33,7	36,0
CM	73,6	70,0	34,5	36,2
PD	74,6	69,1	33,9	35,8
	----- Adição de Mg, kg ha ⁻¹ -----			
	477,0	412,5	416,5	855,0
	----- Exportação de Mg, kg ha ⁻¹ -----			
PC	149,0	153,4	71,8	93,5
CM	148,3	155,6	73,3	94,1
PD	150,5	153,5	72,4	93,0
	----- Balanço de Mg, kg ha ⁻¹ -----			
PC	318,8	259,1	344,7	803,4
CM	319,2	256,9	343,2	803,0
PD	317,3	259,0	344,1	803,9

¹ Ano de início do experimento

² Ano da última análise química do solo considerada no presente trabalho

Além disso, para avaliar o incremento ou diminuição nos níveis de cada nutriente no solo desde o início dos experimentos até a última análise de solo, realizada em 2007, foi calculada a diferença entre os teores iniciais desses nutrientes para cada manejo do solo e os teores da última análise de solo. Como os teores iniciais de nutrientes na camada de 40-60 cm de profundidade em todos os locais e na camada de 20-40 cm em Luziânia não foram avaliados no início dos experimentos, bem como as áreas de cerrado adjacentes aos experimentos, foram utilizados nesses casos os teores da área de Cerrado (avaliada em 2005) para calcular o acúmulo de nutrientes no solo ao longo do período de cultivo e, por proporção, para o período experimental. Em Sapezal o início da avaliação da evolução da fertilidade do solo foi concomitante com a abertura do Cerrado. Em função da variabilidade dos teores de P e K de um ano para outro, de acordo com as análises de solo, julgou-se mais adequado calcular a diferença entre o início e a última avaliação feita por meio da utilização de uma equação de uma linha de tendência, utilizando-se o *software Microsoft Excel 2003*, para cada manejo do solo. Tendo o valor dessa diferença em mãos e tomando-se por base uma camada de 20 cm (0-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade) transformou-se a mesma em kg ha^{-1} de P_2O_5 , de K_2O , de Ca e de Mg para calcular na seqüência as perdas ou ganhos de P, K, Ca e Mg no solo, respectivamente. A diferença entre os valores dessa transformação e os valores do balanço de cada nutriente nos manejos de solo resultou nas quantidades de nutrientes perdidas e/ou fixados em cada camada de solo. Para finalizar então foi calculada a eficiência agronômica da aplicação de fertilizantes contendo tais nutrientes, levando-se em consideração o total aplicado e o que o foi perdido nos distintos manejos de solo. As tabelas 38 a 41 mostram os dados de evolução da fertilidade do solo de forma pontual e resumida, os quais foram utilizados para calcular a evolução dos teores dos nutrientes no solo para fazer o balanço de nutrientes e calcular a eficiência agronômica das adubações. Os dados de análise de solo do Cerrado foram utilizados como referência de fertilidade do solo quando do início do cultivo das áreas em que posteriormente foram implantados os experimentos.

TABELA 38. Teores de fósforo disponível do solo (mg dm^{-3}), em diferentes épocas, para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).

Manejo do Solo	Local															
	Luziânia				Costa Rica				Tasso Fragoso				Sapezal			
	Cer. ¹ 1977	1992 ²	2005	2007	Cer. ¹ 1974	1994 ²	2005	2007	Cer. ¹ 1990	2000 ²	2005	2007	Cer. ¹ 1997	2001 ²	2005	2007
	----- 0-20 cm -----															
PC	1,6	3,0	8,8	6,6	3,9	10,0	9,7	8,5	2,3	25,5	27,0	22,9	1,5	6,5	3,5	4,3
CM	1,6	3,0	10,4	7,7	3,9	9,0	11,5	8,3	2,3	20,5	26,7	24,2	1,5	8,5	4,1	5,5
PD	1,6	3,0	8,8	5,7	3,9	7,0	12,0	10,0	2,3	29,5	29,3	24,7	1,5	6,0	3,7	5,4
	----- 20-40 cm -----															
PC	1,2	-	3,9	-	4,7	3,0	4,4	-	1,6	2,5	10,6	-	1,3	4,0	1,9	-
CM	1,2	-	4,4	-	4,7	3,0	-	-	1,6	2,5	11,0	-	1,3	5,5	1,0	-
PD	1,2	-	4,8	-	4,7	8,0	4,1	-	1,6	5,0	11,4	-	1,3	4,0	1,0	-
	----- 40-60 cm -----															
PC	1,5	-	2,0	-	3,0	-	3,7	-	2,0	-	4,3	-	1,3	-	1,0	-
CM	1,5	-	2,8	-	3,0	-	-	-	2,0	-	4,0	-	1,3	-	1,0	-
PD	1,5	-	3,5	-	3,0	-	3,8	-	2,0	-	3,6	-	1,3	-	1,0	-

¹ Cer.= Cerrado amostrado em 2005

² Ano de início do experimento

TABELA 39. Teores de potássio trocável do solo (mg dm^{-3}), em diferentes épocas, para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).

Manejo do Solo	Local															
	Luziânia				Costa Rica				Tasso Fragoso				Sapezal			
	Cer. ¹ 1977	1992 ²	2005	2007	Cer. ¹ 1974	1994 ²	2005	2007	Cer. ¹ 1990	2000 ²	2005	2007	Cer. ¹ 1997	2001 ²	2005	2007
	----- 0-20 cm -----															
PC	41	35	84	123	45	47	94	106	32	53	71	96	46	82	64	57,3
CM	41	39	88	112	45	39	110	99	32	51	84	88	46	66	64	73,1
PD	41	23	68	73	45	35	100	89	32	53	80	80	46	57	75	61,3
	----- 20-40 cm -----															
PC	27	-	51	-	34	27	47	-	27	22	35	-	29	37	27	-
CM	27	-	41	-	34	23	62	-	27	20	47	-	29	29	24	-
PD	27	-	31	-	34	31	59	-	27	22	59	-	29	23	24	-
	----- 40-60 cm -----															
PC	23	-	43	-	20	-	35	-	22	-	27	-	23	-	20	-
CM	23	-	35	-	20	-	35	-	22	-	39	-	23	-	16	-
PD	23	-	27	-	20	-	35	-	22	-	51	-	23	-	16	-

¹ Cer.= Cerrado amostrado em 2005

² Ano de início do experimento

TABELA 40. Teores de cálcio trocável do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), em diferentes épocas, para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).

Manejo do Solo	Local															
	Luziânia				Costa Rica				Tasso Fragoso				Sapezal			
	Cer. ¹ 1977	1992 ²	2005	2007	Cer. ¹ 1974	1994 ²	2005	2007	Cer. ¹ 1990	2000 ²	2005	2007	Cer. ¹ 1997	2001 ²	2005	2007
	----- 0-20 cm -----															
PC	0,33	2,00	2,63	3,50	0,53	2,83	2,40	3,66	0,26	1,10	2,08	2,58	0,23	2,70	2,60	2,37
CM	0,33	2,00	2,88	3,90	0,53	2,83	2,33	3,82	0,26	1,20	2,02	2,56	0,23	2,75	2,30	2,49
PD	0,33	2,00	2,89	3,50	0,53	2,83	2,24	4,02	0,26	1,10	1,79	2,79	0,23	2,45	2,13	2,39
	----- 20-40 cm -----															
PC	0,23	-	0,82	-	0,33	1,80	0,77	-	0,26	0,35	0,27	-	0,20	1,05	0,88	-
CM	0,23	-	0,97	-	0,33	1,10	0,72	-	0,26	0,35	0,30	-	0,20	1,15	0,68	-
PD	0,23	-	1,11	-	0,33	1,10	0,67	-	0,26	0,30	0,33	-	0,20	0,75	0,67	-
	----- 40-60 cm -----															
PC	0,20	-	0,62	-	0,37	-	0,77	-	0,20	-	0,20	-	0,20	-	0,62	-
CM	0,20	-	0,90	-	0,37	-	0,72	-	0,20	-	0,22	-	0,20	-	0,52	-
PD	0,20	-	1,18	-	0,37	-	0,67	-	0,20	-	0,23	-	0,20	-	0,47	-

¹ Cer.= Cerrado amostrado em 2005

² Ano de início do experimento

TABELA 41. Teores de magnésio trocável do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), em diferentes épocas, para quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).

Manejo do Solo	Local															
	Luziânia				Costa Rica				Tasso Fragoso				Sapezal			
	Cer. ¹	1992 ²	2005	2007	Cer. ¹	1994 ²	2005	2007	Cer. ¹	2000 ²	2005	2007	Cer. ¹	2001 ²	2005	2007
	0-20 cm															
PC	0,17	0,80	1,29	1,30	0,28	1,27	1,08	1,60	0,16	0,45	0,65	0,73	0,20	1,45	1,50	0,94
CM	0,17	0,70	1,48	1,20	0,28	1,27	1,05	1,50	0,16	0,50	0,75	0,71	0,20	1,40	1,40	1,03
PD	0,17	0,70	1,57	1,40	0,28	1,27	1,04	1,50	0,16	0,50	0,63	0,91	0,20	1,20	1,35	1,06
	20-40 cm															
PC	0,13	-	0,47	-	0,17	0,60	0,37	-	0,14	0,15	0,17	-	0,10	0,65	0,50	-
CM	0,13	-	0,50	-	0,17	0,60	0,36	-	0,14	0,15	0,17	-	0,10	0,75	0,40	-
PD	0,13	-	0,52	-	0,17	0,80	0,34	-	0,14	0,15	0,17	-	0,10	0,40	0,37	-
	40-60 cm															
PC	0,13	-	0,36	-	0,13	-	0,35	-	0,10	-	0,11	-	0,10	-	0,32	-
CM	0,13	-	0,40	-	0,13	-	0,34	-	0,10	-	0,11	-	0,10	-	0,28	-
PD	0,13	-	0,44	-	0,13	-	0,33	-	0,10	-	0,10	-	0,10	-	0,23	-

¹ Cer.= Cerrado amostrado em 2005

² Ano de início do experimento

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Indicadores de correção da acidez do solo

Para obter máxima resposta das culturas às adubações se faz necessária a adequada correção da acidez do solo, especialmente na região do Cerrado onde os solos são naturalmente muito ácidos (Sousa et al., 1985). A correção do solo para o cultivo provoca alteração significativa nos indicadores de acidez do solo, como pode ser visto nos gráficos comparativos do solo de Cerrado e solos cultivados em PD e PC (Figuras 15 a 22). Quanto maior a profundidade de correção do solo, mais favorável serão as condições de nutrição para o desenvolvimento das culturas. Por isso existem recomendações técnicas para a utilização de gesso agrícola na região do Cerrado quando a acidez é elevada em profundidade, seja por apresentar baixo teor de Ca e/ou elevada saturação de Al^{+3} (Raij, 1988; Sousa et al., 1996). Como o movimento do calcário é muito lento no solo, a correção mais significativa aconteceu nas camadas superficiais até 20 cm, mas como em todos os locais estudados foram utilizadas adubações contendo SO_4^{2-} ou gesso agrícola, houve diminuição significativa da acidez do solo até a profundidade analisada de 60 cm, com exceção de Tasso Fragoso-MA, onde praticamente não houve correção das camadas mais profundas. O $pH(H_2O)$ se elevou da faixa de 4,5 a 5,0 nos solos sem correção para 5,0 a 6,5 nos solos corrigidos, variando com o manejo do solo e a profundidade analisada. A saturação de bases aumentou da faixa de 10% nos solos de Cerrado para a faixa de 40 a 70% nos solos corrigidos. A recomendação oficial, da EMBRAPA, de correção do solo para cultivo é elevar a saturação de bases para 50% para culturas anuais de sequeiro e para 60% para culturas irrigadas (Sousa & Lobato, 2002a). A experiência de campo mostra que as dosagens calculadas pelo método de saturação de bases não são suficientes para elevar a saturação de bases (V%) para o nível desejado. Os dados de pesquisa mostram que é necessário adicionar de 1,3 vezes (Altmann & Pavinato, 2002) a 1,5 vezes (Zancanaro, 2004) a dosagem calculada de calcário para atingir o V% desejado.

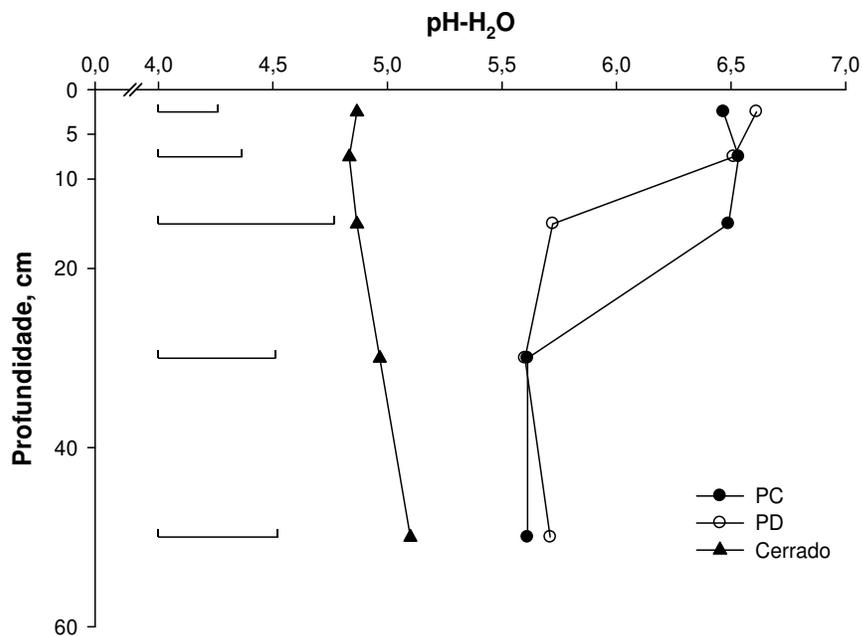


FIGURA 15. Valores de pH-H₂O no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa, em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

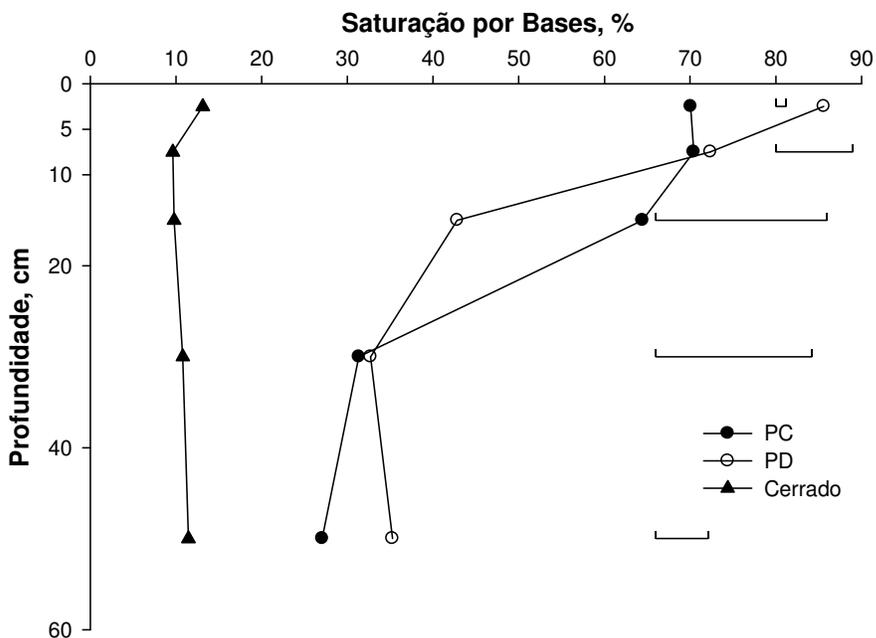


FIGURA 16. Saturação por bases no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa, em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

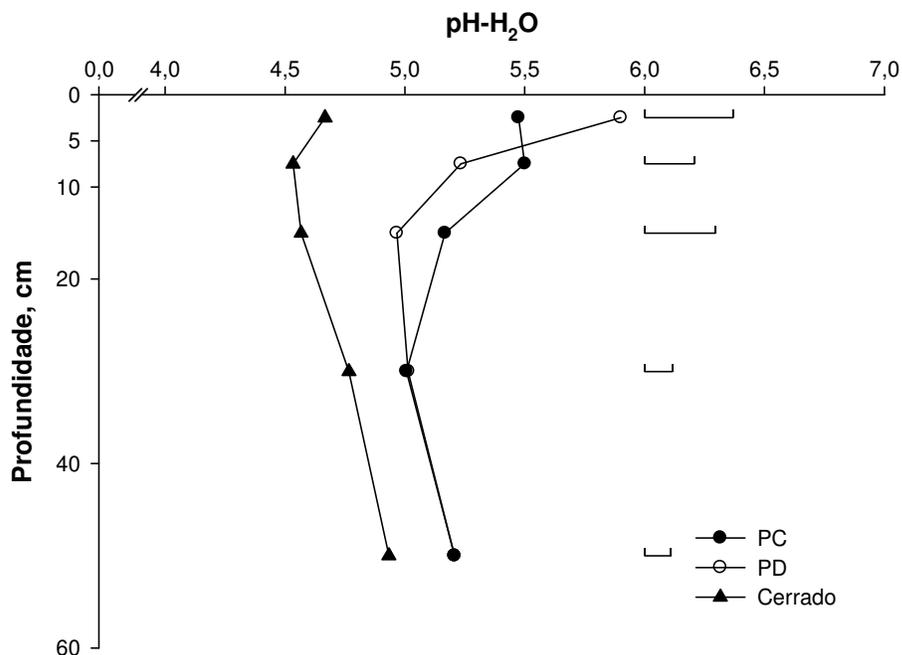


FIGURA 17. Valores de pH-H₂O no perfil do solo de Cerrado amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

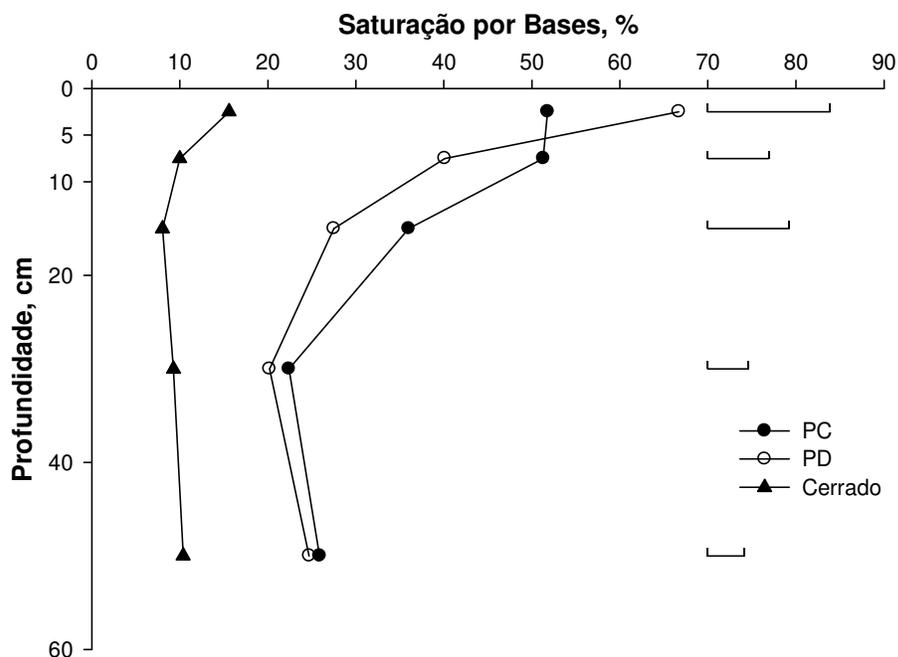


FIGURA 18. Saturação por bases no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

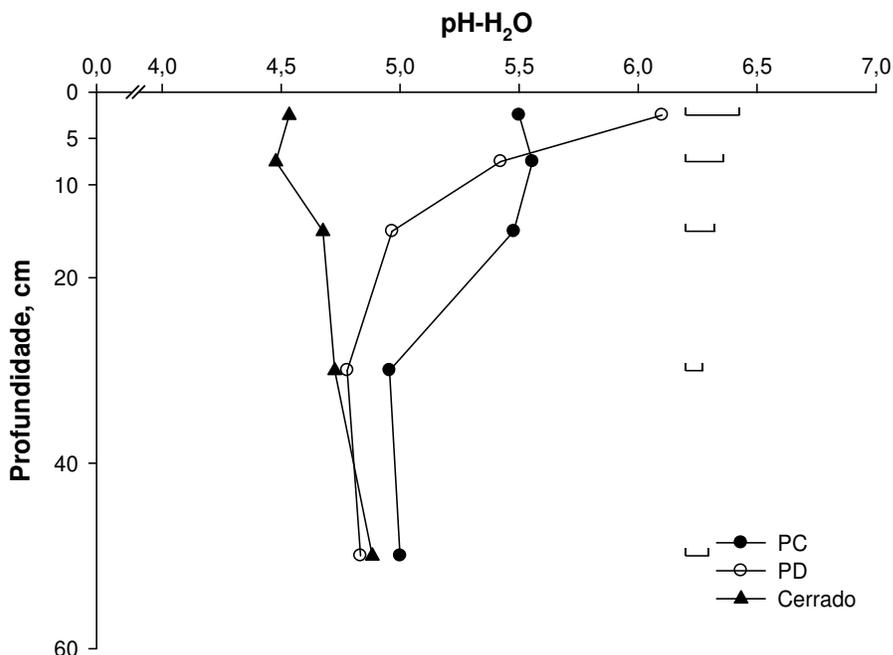


FIGURA 19. Valores de pH-H₂O no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

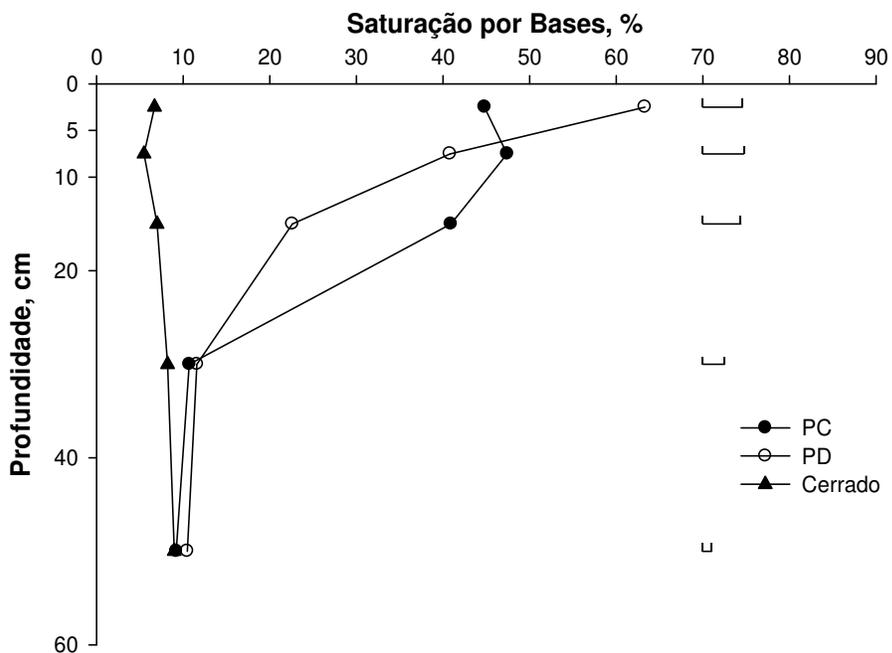


FIGURA 20. Saturação por bases no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

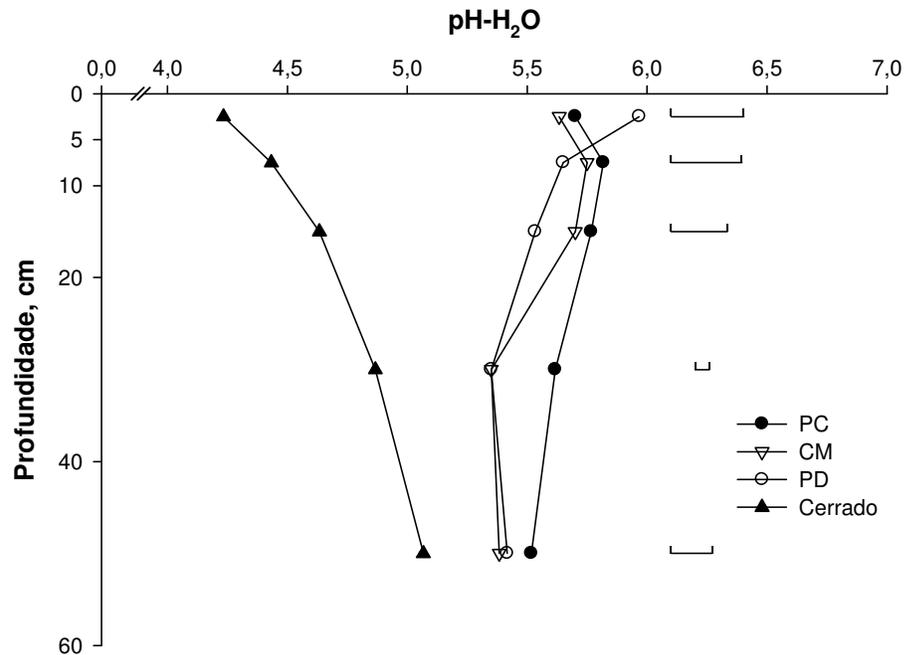


FIGURA 21. Valores de pH-H₂O no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

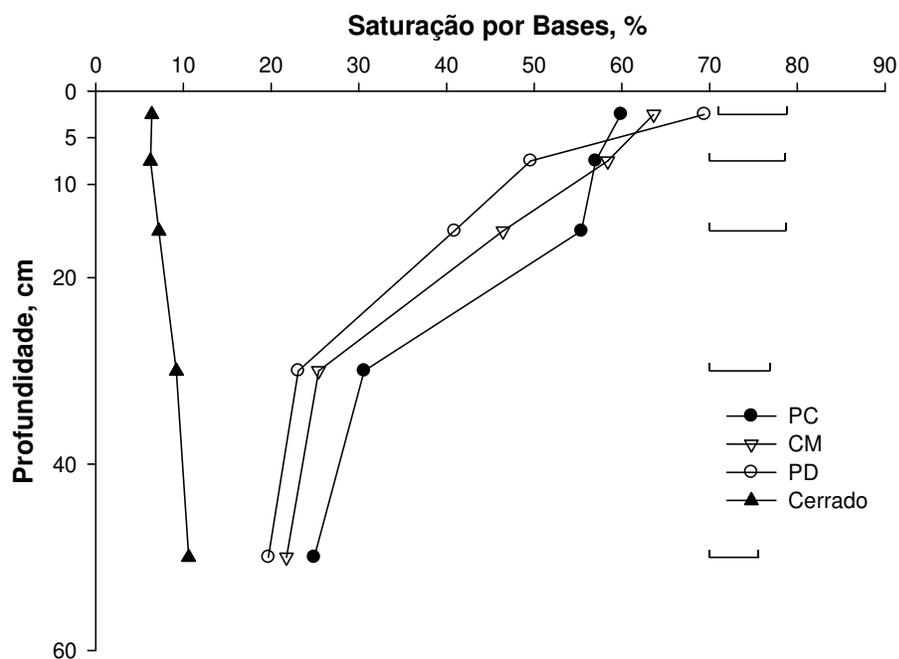


FIGURA 22. Saturação por bases no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

Na comparação dos manejos de solo (PD e PC), em todos os locais, houve tendência de maior pH e V% na camada 0-5 cm no PD em relação ao PC, valores similares ou menores para a camada 5-10 cm e tendência de valores menores para o PD na camada 10-20 cm. Já nas camadas mais profundas (20-40 e 40-60 cm), os dados tendem a ser similares nos dois sistemas de manejo do solo, pois somente houve diferença significativa em favor do PD na saturação de base 40-60 cm em Luziânia e no pH em água a favor do PC nas camadas 20-40 e 40-60 cm em Tasso Fragoso—MA. Pode-se destacar a grande diferença de pH e V% nas camadas 20-40 e 40-60 cm de profundidade entre o solo sem correção e o solo cultivado em Luziânia-GO, Costa Rica-MS e Sapezal-MT, provavelmente associado à histórico de uso de gesso agrícola em Luziânia-GO e Costa Rica-MS e super fosfato simples em Sapezal-MT, evidenciando a importância do sulfato no condicionamento químico do solo em profundidade (Sousa et al., 1996).

A saturação por alumínio é um fator limitante ao cultivo no solo nativo de Cerrado. Os valores variam de 30 a 50% nos solos de Luziânia-GO e Costa Rica-MS (Figuras 23 e 24) a 60 a 70% nos solos de Tasso Fragoso-MA e Sapezal-MT (Figuras 25 e 26). Na medida em que se corrige a acidez do solo e eleva-se o pH, ocorre a neutralização do alumínio tóxico, como pode ser visto em todos os locais. Seguindo a mesma lógica da saturação de bases, a redução mais significativa da saturação de Al em profundidade somente aconteceu em Luziânia-GO, Costa Rica-MS e Sapezal-MT, locais onde receberam maiores dosagens de SO_4^{-2} e a correção do perfil está acontecendo gradualmente pelo tempo de cultivo e uso de constante de fontes de fósforo e nitrogênio contendo SO_4^{-2} . Mas aparentemente estes fatores isoladamente não explicam o significativo menor movimento em profundidade de cátions e consequente menor redução na saturação de Al em Tasso Frogoso-MA. O menor volume de precipitação pluviométrica (Tabela 12) e a estrutura mais frágil do solo, devido ao maior conteúdo de areia (Tabela 14), aumentando o selamento superficial e o escoamento, reduzindo a percolação de água no solo, são fatores importantes que ajudam explicar a maior dificuldade para corrigir a fertilidade do solo em profundidade neste local.

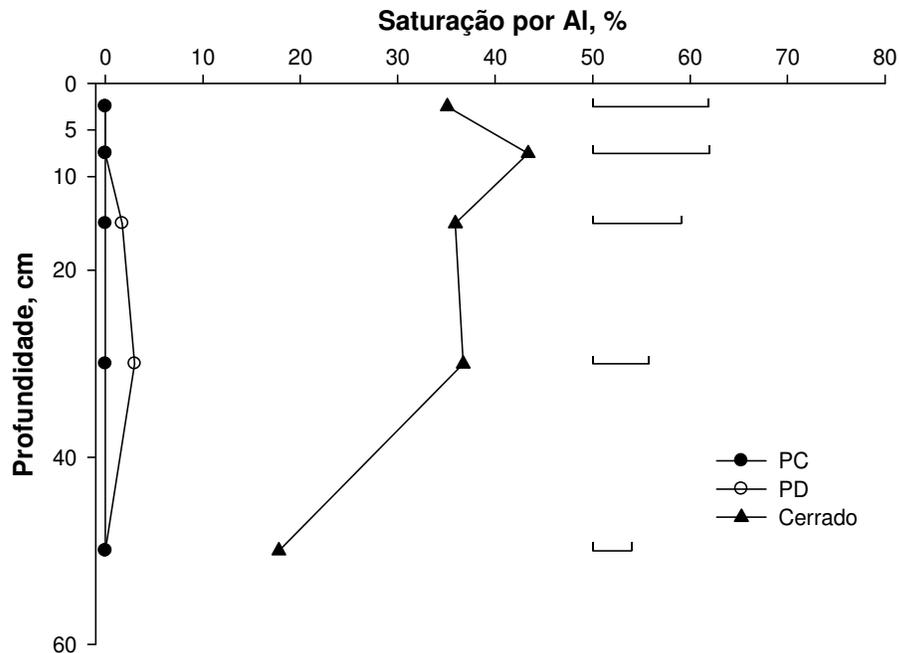


FIGURA 23. Saturação por alumínio no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

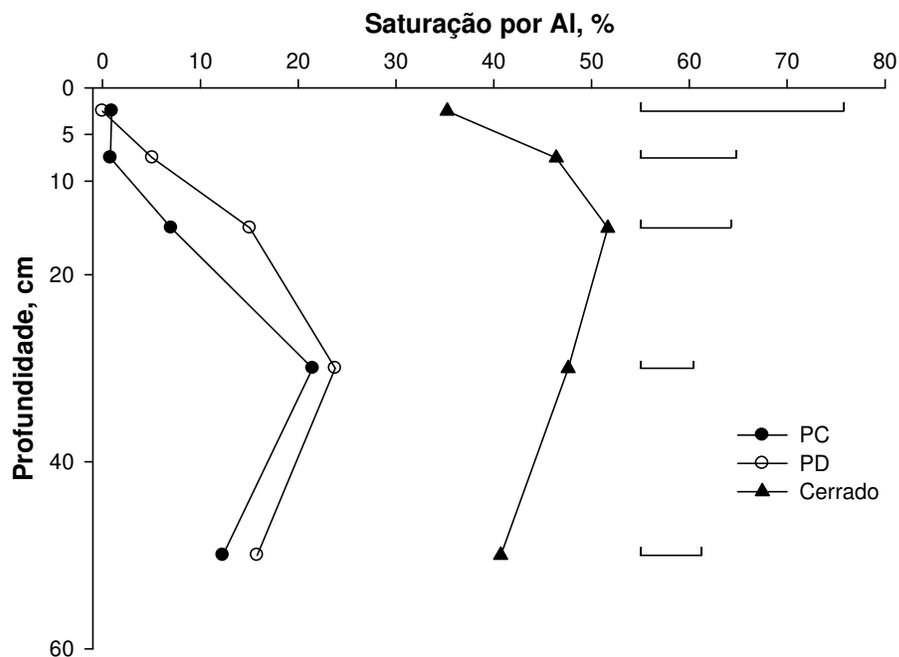


FIGURA 24. Saturação por alumínio no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

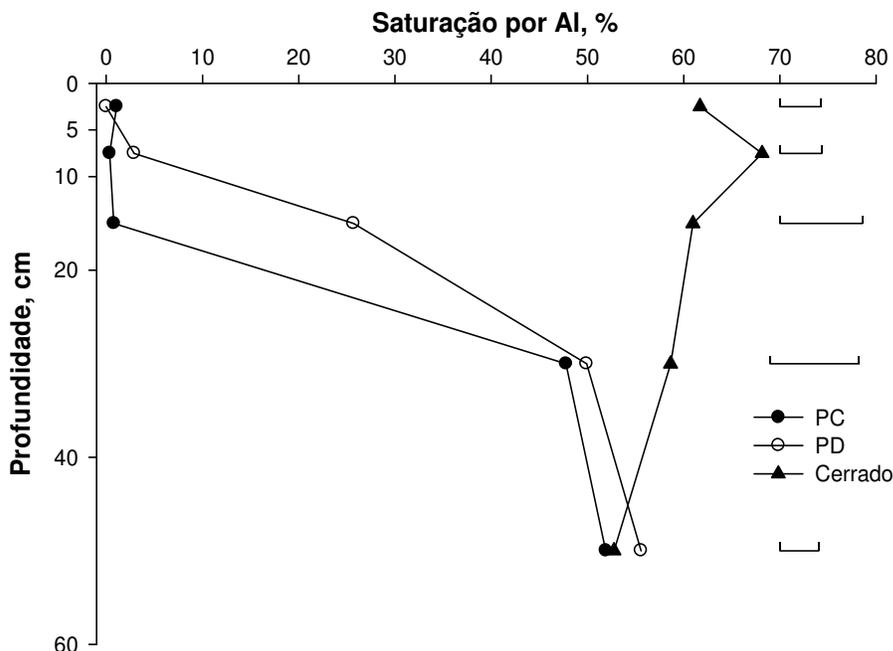


FIGURA 25. Saturação por alumínio no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Frágoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

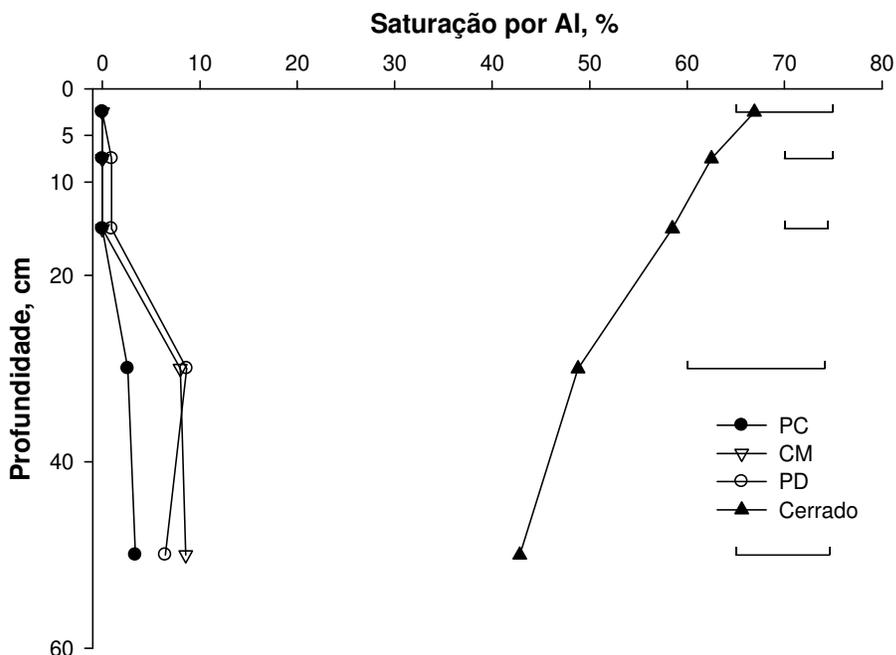


FIGURA 26. Saturação por alumínio no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

5.3.2. Balanço de P e K

Solos de cerrado nativo são muito pobres em fósforo e potássio. Para implantar sistemas de produção de culturas anuais são necessários elevados investimentos em correção do solo, seja através da aplicação de dosagens elevadas no primeiro ano de implantação das culturas ou através da correção gradual ao longo dos anos de cultivo. Devido ao alto teor de óxidos de ferro e alumínio e a alta fixação de fósforo pelo solo, para elevar $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$ o teor de P em solos argilosos (>60%), são necessários 70 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Sousa et al., 2006), podendo significar mais de 300 kg ha^{-1} de P_2O_5 para elevar o teor no solo da faixa de muito baixo para nível de suficiência. As dosagens de K para correção do solo são menores que as dosagens de P, mas mesmo assim, representam custos elevados. Os solos de Cerrado são altamente intemperizados e o K se encontra basicamente na forma trocável (Mielniczuk, 1977). Para elevar o teor de K trocável no solo de $0,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (nível baixo) para $0,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (nível alto) são necessários $141,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O .

O cultivo e as adubações proporcionaram elevação nos teores de P e K no perfil do solo em comparação com solo de Cerrado nativo, independente do manejo de solo utilizado (Figuras 27 a 34). Esta elevação é mais significativa na camada de 0-20 cm, mas na medida em que os solos são cultivados por mais tempo, ocorre aumento da fertilidade também em profundidade, como observado em Luziânia (Figuras 27 e 28), onde o solo foi cultivado a partir de 1974, em comparação com Sapezal (Figuras 33 e 34), cultivado a partir de 1997.

O fósforo é um nutriente muito pouco móvel no solo, por isso o aumento no teor no solo aconteceu basicamente na camada de 0-20 cm, camada de ação mecânica dos equipamentos na incorporação das adubações, com exceção de Tasso Frágoso-MA, onde houve aumento significativo no teor de P no solo na camada de 20-40 cm, provavelmente através do movimento em profundidade através da água devido ao fato do solo ser arenoso.

A comparação dos manejos de solo (PC e PD), mostra maior acúmulo de P no solo na camada 0-5 cm no PD em relação ao PC, com exceção do experimento de Sapezal-MT, onde não houve este mesmo

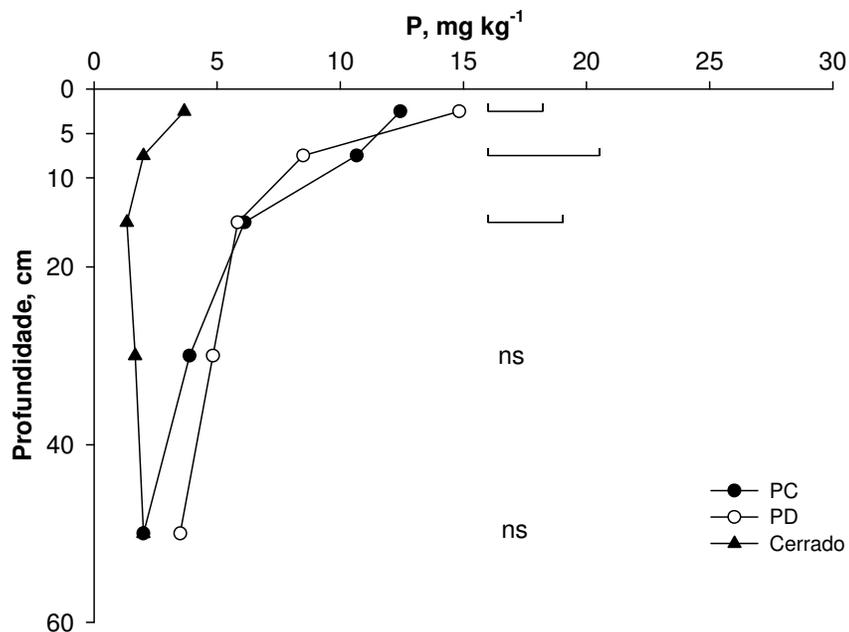


FIGURA 27. Teores de fósforo disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo.

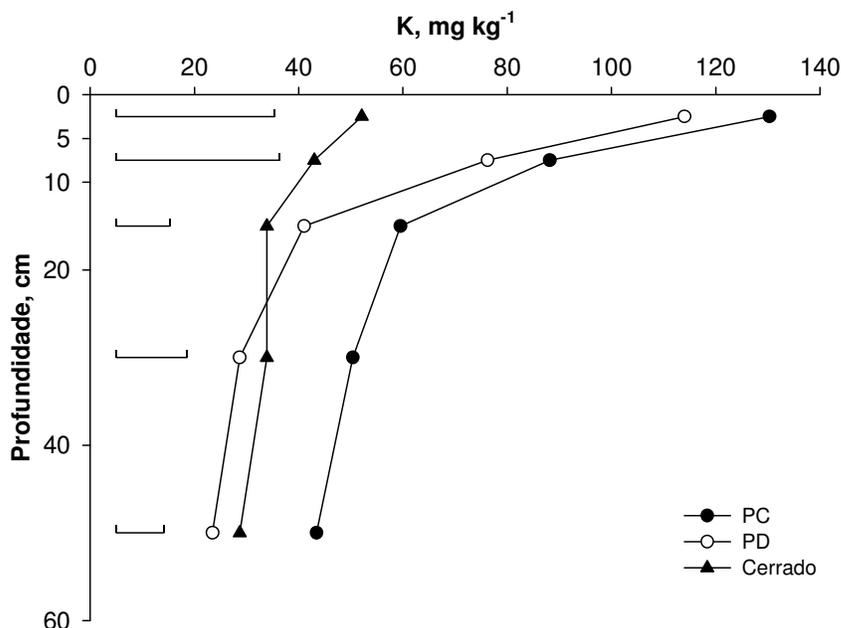


FIGURA 28. Teores de potássio disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

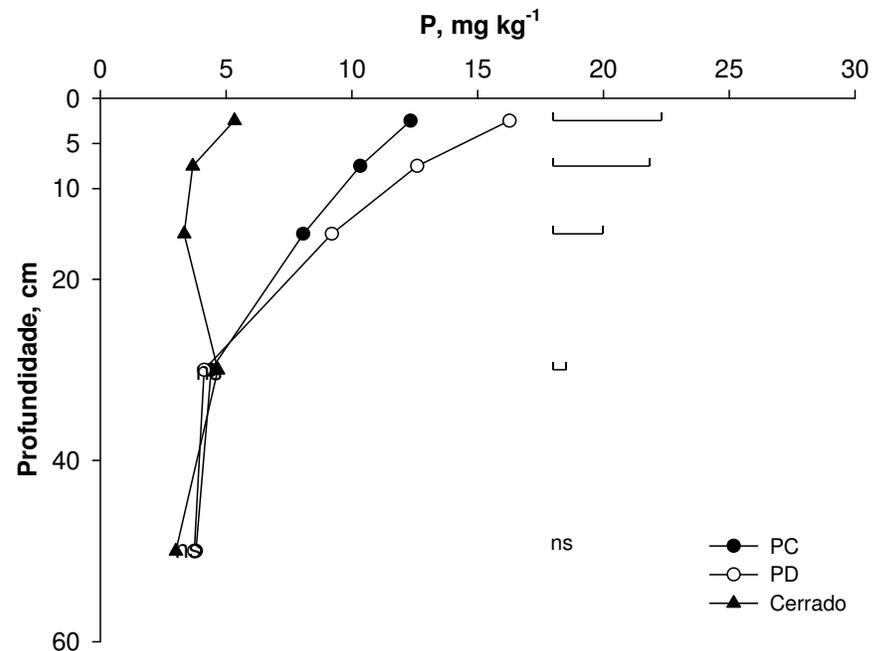


FIGURA 29. Teores de fósforo disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo.

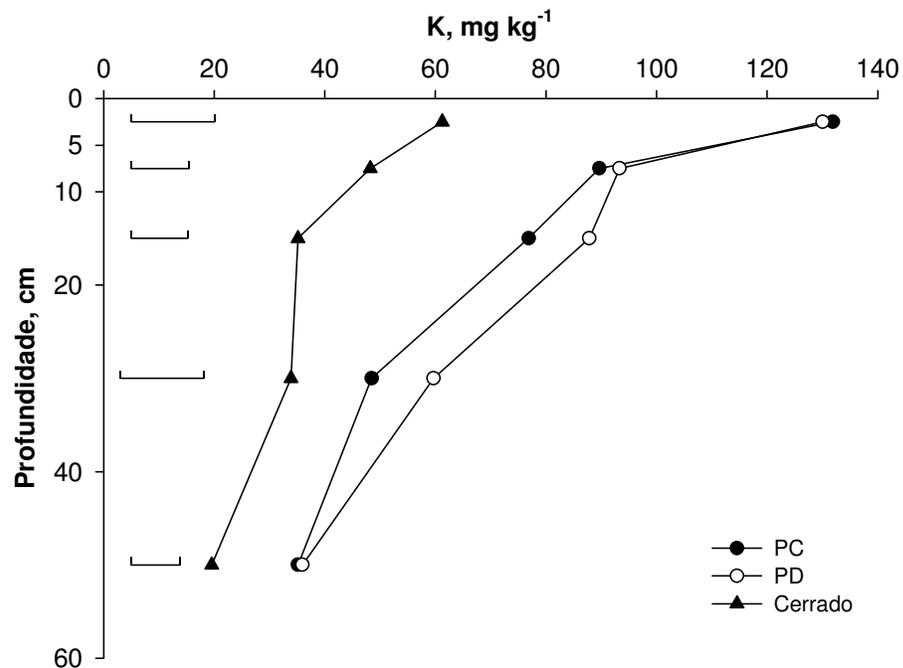


FIGURA 30. Teores de potássio disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

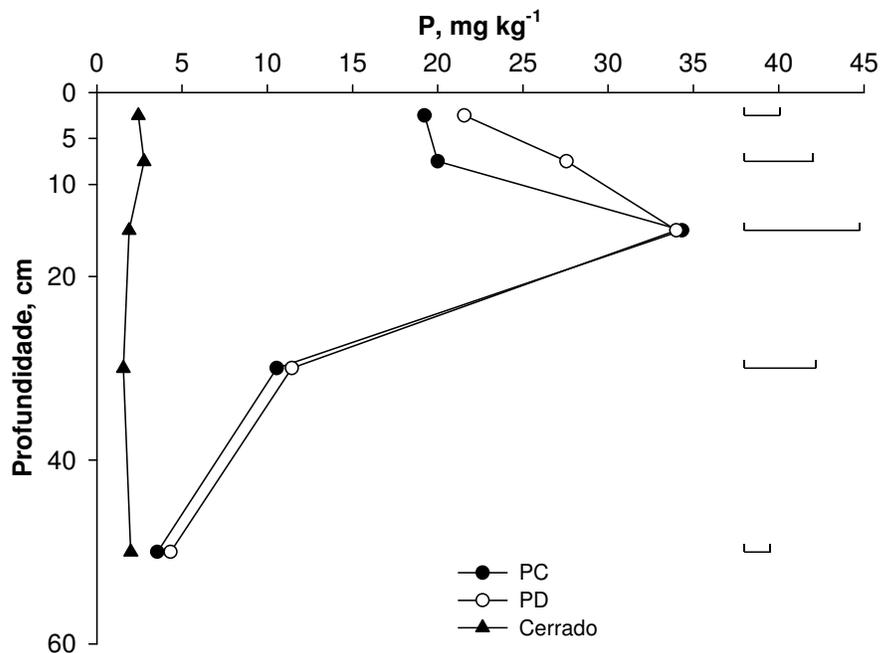


FIGURA 31. Teores de fósforo disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

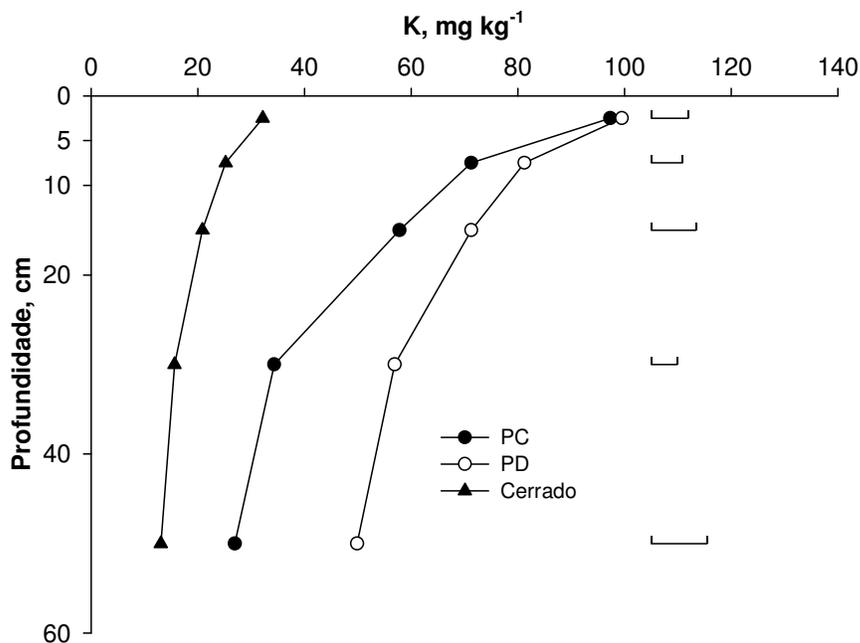


FIGURA 32. Teores de potássio disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

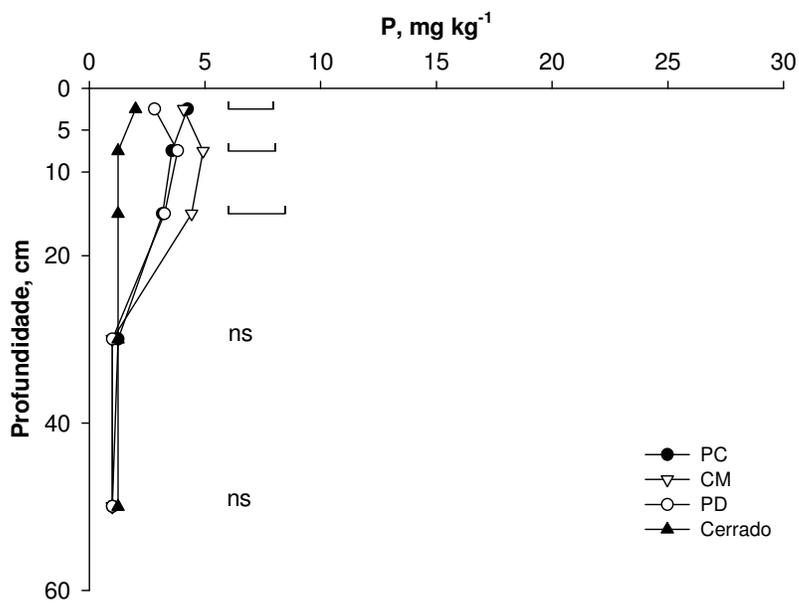


FIGURA 33. Teores de fósforo disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo.

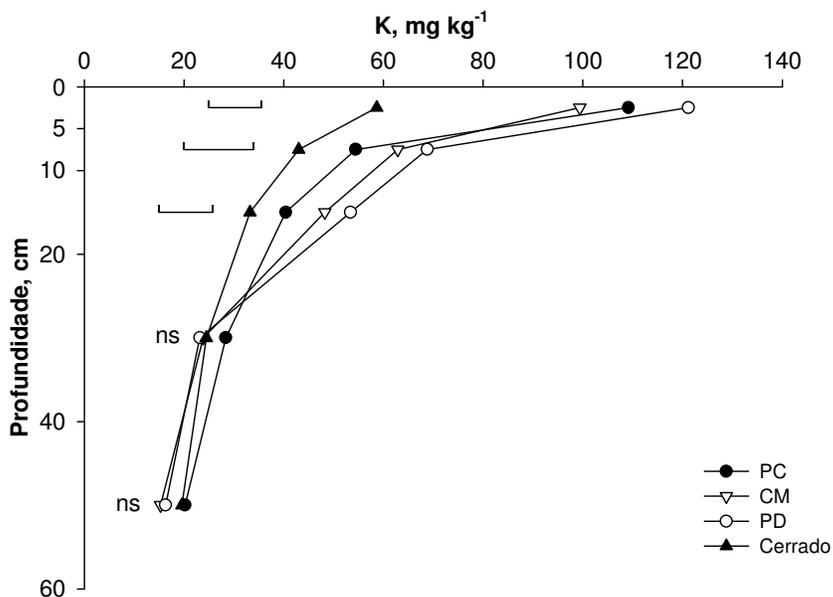


FIGURA 34. Teores de potássio disponível no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo.

comportamento, provavelmente devido ao pouco tempo de condução do experimento (quatro anos de plantio direto) e a possível subestimação dos teores de P no solo sob PD devido a amostragem na entrelinha da cultura anterior. Na camada 5-10 cm os teores de P foram similares, mas a tendência é acumular maior quantidade de P no PD em relação ao PC. Já na camada 10-20 cm os teores são muito similares nos dois manejos de solo. Em Sapezal-MT, foi amostrado o tratamento cultivo mínimo (CM), onde os teores nas três camadas superficiais foram levemente superiores aos teores do PD, provavelmente devido ao efeito do escarificador na homogeneização do P no solo em relação ao PD e a menor fixação do P no solo em relação ao PC (Figura 31).

Com base no balanço de P no solo (Tabela 34) e na evolução do teor no solo (Tabela 38), foi possível calcular a eficiência agrônômica das adubações fosfatadas para os quatro locais estudados e referidos períodos de estudo (Tabela 42). Considerando a camada de solo até 60 cm, foi possível estimar quanto do P aplicado foi exportado pelo grão ou está presente no solo na forma lábil. O solo arenoso de Tasso Fragoso-MA atingiu até 20% de eficiência agrônômica, mas os solos argilosos dos demais locais apresentaram no máximo 10% de eficiência agrônômica. Em Sapezal houve menor eficiência agrônômica da adubação fosfatada, não ultrapassando 4%, evidenciando o que na prática é percebido nas lavouras comerciais pelos produtores, quanto mais jovem é a lavoura após a abertura do cerrado, maior é a “fome” de P e maior é a taxa de fixação. A eficiência agrônômica do P determinada neste trabalho está de acordo com a síntese apresentada por Alcarde et al. (1989), onde mostra que apenas 5 a 20% do fósforo solúvel adicionado ao solo como adubo é aproveitado pela cultura que o recebeu e que 95 a 80% dele é fixado, sendo essa eficiência menor que aquela obtida em solos mais jovens de clima temperado, como demonstrado por Tang et al. (2008), no qual a eficiência agrônômica variou de 45 a 49%.

O K é um nutriente bastante móvel no solo e absorvido em grande quantidade pelas culturas, por isso bastante dinâmico no solo. Devido aos solos do Cerrado apresentar baixa CTC e baixo poder tampão de K, se acreditava que parte significativa do K nesse ambiente era perdido por lixiviação (Mielniczuk, 1977), mas estas perdas apresentam grande variação

TABELA 42. Eficiência agronômica de utilização de fósforo, potássio, cálcio e magnésio em quatro áreas experimentais do Cerrado submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto).

Camada de solo	Luziânia			Costa Rica			Tasso Fragoso			Sapezal		
	PC	CM	PD	PC	CM	PD	PC	CM	PD	PC	CM	PD
--- cm ---	Eficiência agronômica para o fósforo, %											
0-20	4	6	4	4	4	4	10	7	6	3	3	2
0-40	6	7	6	8	6	9	16	20	13	4	2	2
0-60	6	8	6	9	7	10	17	20	13	4	2	2
--- cm ---	Eficiência agronômica para o potássio, %											
0-20	103	104	101	85	87	86	76	77	70	69	71	70
0-40	105	105	101	89	97	94	76	84	78	73	72	74
0-60	107	106	102	93	100	97	76	86	81	72	70	72
--- cm ---	Eficiência agronômica para o cálcio, %											
0-20	50	61	50	38	43	49	43	46	44	52	48	58
0-40	58	70	62	57	64	72	56	54	52	49	47	59
0-60	63	80	75	69	74	81	63	60	57	49	47	60
--- cm ---	Eficiência agronômica para o magnésio, %											
0-20	59	59	69	57	51	51	27	30	30	34	30	41
0-40	68	69	80	78	72	71	41	44	45	35	31	42
0-60	75	76	89	91	85	83	47	49	48	35	31	42

em função do sistema de rotação de culturas e manejo do solo adotado pelo produtor. Como no PD não ocorre revolvimento do solo e há a presença permanente de plantas sobre o solo, é esperado maior eficiência de utilização do K e maior acúmulo no solo. Isso aconteceu em três dos quatro locais estudados, mas o comportamento foi oposto em Luziânia-GO, onde em todas as camadas do perfil de solo analisado apresentou tendência de menor teor de K no PD em relação ao PC. Analisando os dados históricos dos experimentos a partir de 1992, sempre o teor de K foi menor na camada 0-20 cm no PD em relação ao PC. Existem duas possibilidades de perdas que podem estar acontecendo no PD, por lixiviação para camadas além de 60 cm, mas é pouco provável porque o teor nas camadas 20-40 e 40-60 cm são similares aos teores do solo de Cerrado, ou por erosão superficial de água, por chuvas torrenciais sobre a palhada das culturas na superfície do solo, promovendo o deslocamento do K para fora da parcela experimental. O maior acúmulo de K em profundidade no PD em relação ao PC aconteceu de forma significativa em Tasso Fragoso-MA, condição de solo arenoso e realmente sujeito à lixiviação de K.

Como o potássio é um nutriente bastante móvel no solo e ocorreu variação significativa na determinação dos seus teores na análise de solo, em função da cultura anterior e do regime de precipitação pluviométrica pré-amostragem, após atingir o nível de suficiência no solo, a gestão das adubações do sistema de produção é facilitada se forem utilizadas dosagens de acordo com a exportação das culturas e índice de eficiência agrônômica da adubação potássica. Os dados da Tabela 42 mostram que em Luziânia, no balanço dos 15 anos, a eficiência agrônômica da adubação potássica ultrapassou 100%, demonstrando que não houve perda de K. Utilizando um sistema de rotação de culturas comerciais e coberturas de solo de acordo com a utilizada em Luziânia, com soja e milho, é possível obter 100% de eficiência agrônômica da adubação potássica. Em Costa Rica o índice obtido variou entre 93 e 100%, nos três sistemas de manejo do solo, ao longo de 13 anos de condução do experimento. Neste local a rotação de culturas foi composta por soja, milho e algodão, provavelmente o algodão contribuindo com a menor eficiência de utilização do K devido utilizar o solo por longo período e apresentar baixa capacidade de reciclagem. Em Tasso Fragoso era esperado

menor eficiência da adubação potássica devido ao solo ser arenoso, mas mesmo assim, o índice obtido ficou próximo de 80%. Em Sapezal a eficiência agronômica atingiu 70 a 72%, índice baixo considerando que o solo é argiloso e o terreno é plano, sem qualquer erosão, não sendo observado qualquer indício de lixiviação de K quando se observa a distribuição dos seus teores no perfil do solo (Figura 34). O balanço de K para Sapezal-MT considerou 10 anos (1997-2007) e foi o único local em que o estudo iniciou a partir do cerrado nativo, sugerindo a hipótese de que parte do potássio adicionado está sendo retido como não trocável ou formas menos disponíveis, de acordo com resultados encontrados por Rosolem (1988).

5.3.3. Balanço de Ca e Mg

A correção dos teores de Ca e Mg no perfil do solo de Cerrado é uma prática necessária para possibilitar o adequado desenvolvimento das culturas. Nos quatro locais estudados, os solos cultivados apresentam maiores teores de Ca e Mg nas camadas superficiais em relação ao Cerrado nativo e com aumentos significativos até a última camada avaliada (40-60 cm), com exceção de Tasso Fragoso, onde o aumento nos teores de Ca e Mg ficaram limitados até 20 cm de profundidade (Figuras 35 a 42).

A comparação dos teores de Ca e Mg nos quatro locais demonstra que as curvas de acúmulo de Ca e Mg foram muito similares, em ambos os manejos de solo, e o acúmulo de Ca em profundidade esteve associado ao acúmulo de Mg. Em todos os locais, o PD apresentou maiores teores de Ca e Mg na camada 0-5 cm. Já na camada de 5-10 cm houve variações entre os locais. Em Luziânia houve tendência de maiores teores no PD, apesar de ter sido significativo somente para o Mg, e nos demais locais os teores foram menores no PD em relação ao PC, tendo sido observadas diferenças significativas para o Ca e Mg em Costa Rica e para o Ca em Tasso Fragoso e Sapezal. Na camada de 10-20 cm em todos os locais os teores de Ca e Mg foram menores no PD em relação ao PC, as diferenças foram significativas somente em Tasso Fragoso e Sapezal. Nas camadas de 20-40 cm e 40-60 cm o acúmulo de Ca e Mg foi similar no PD e PC, apenas com uma tendência de

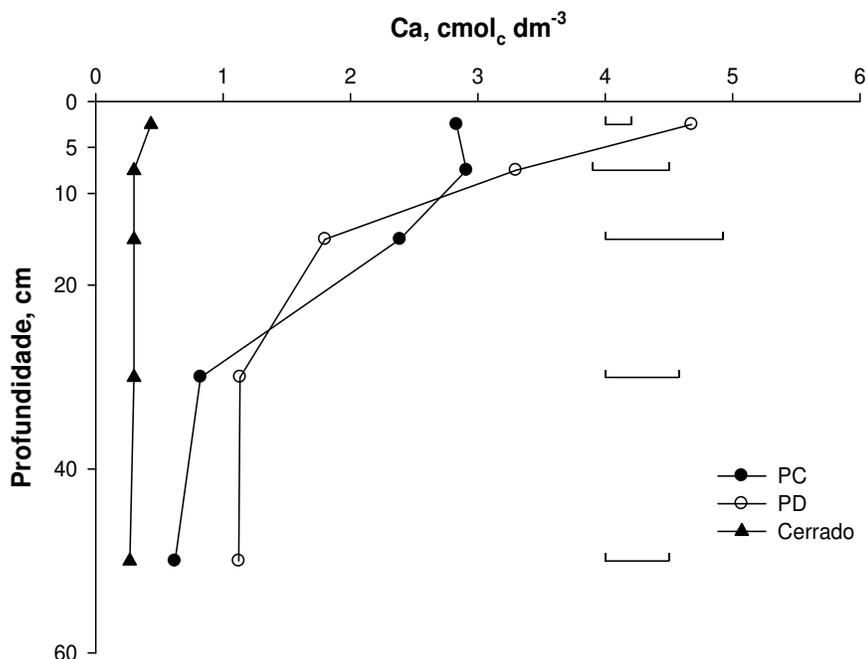


FIGURA 35. Teores de cálcio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plântio direto) e vegetação nativa em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

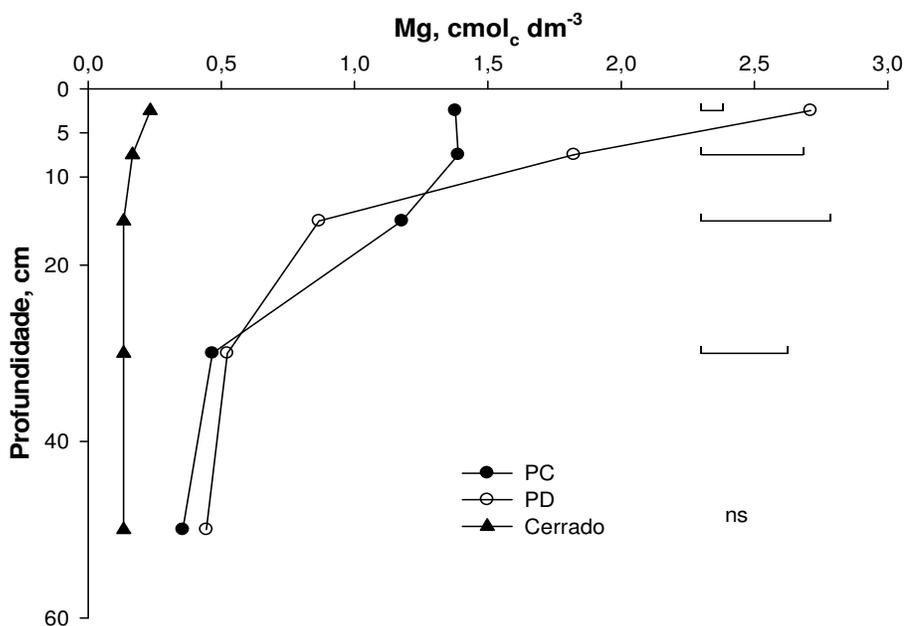


FIGURA 36. Teores de magnésio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plântio direto) e vegetação nativa em Luziânia-GO. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo.

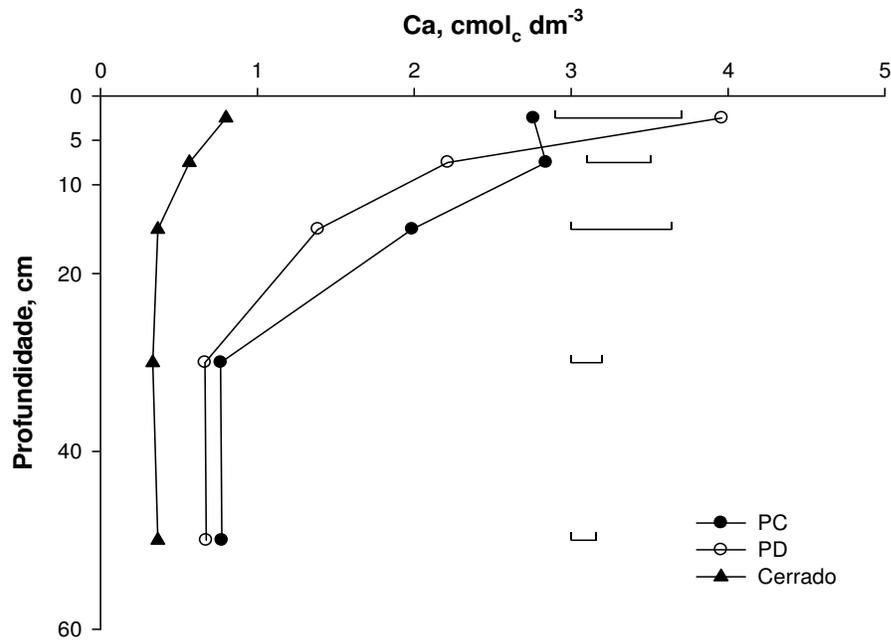


FIGURA 37. Teores de cálcio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

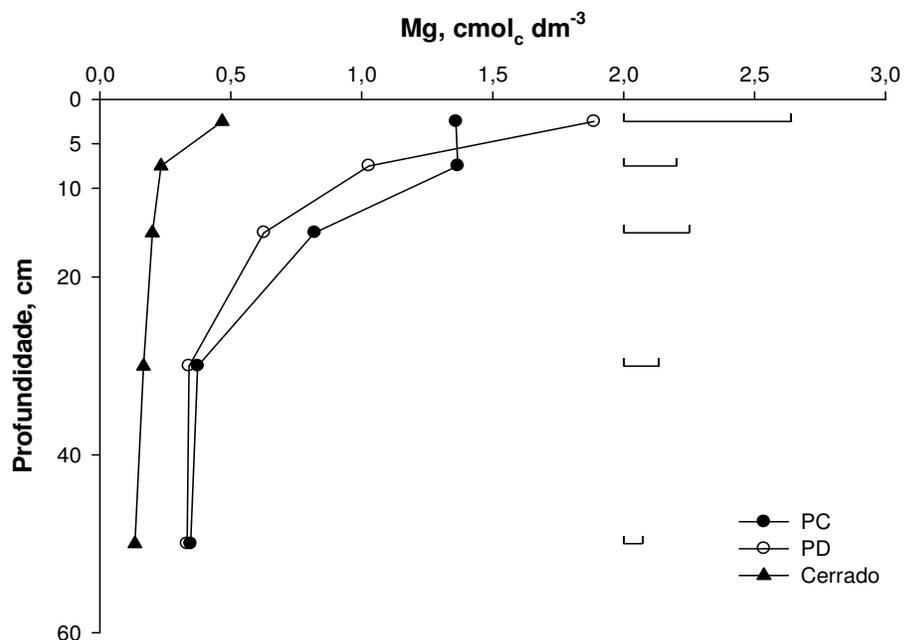


FIGURA 38. Teores de magnésio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Costa Rica-MS. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

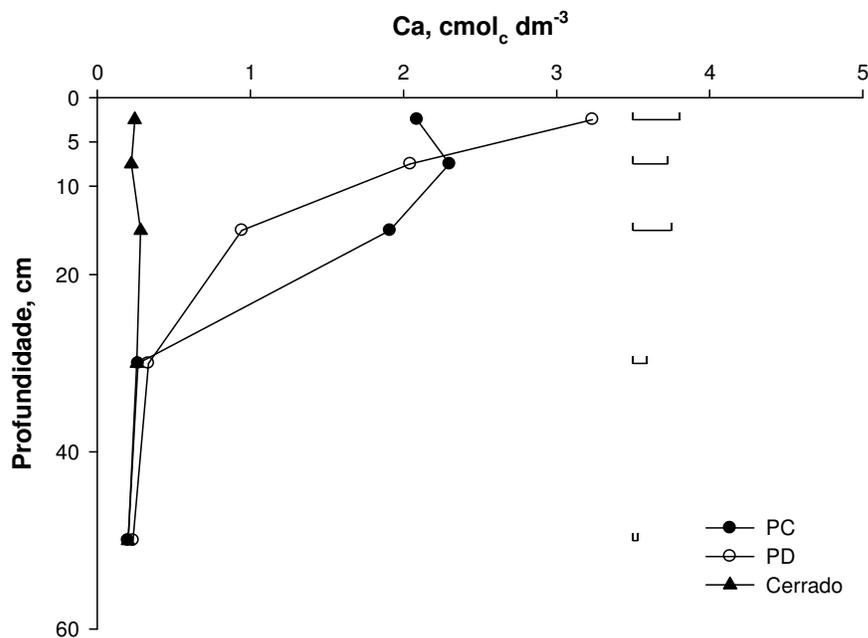


FIGURA 39. Teores de cálcio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

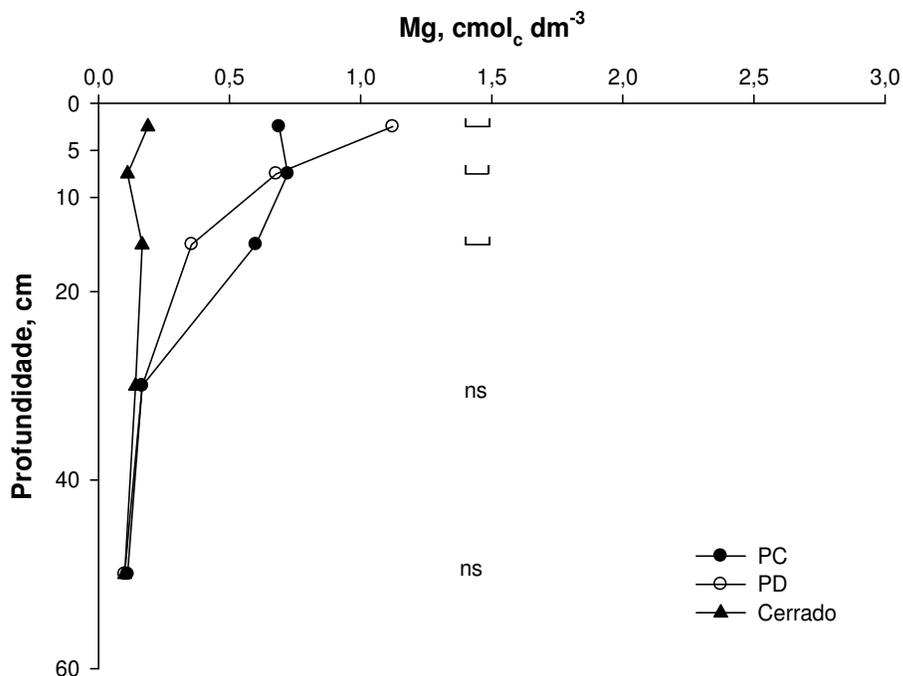


FIGURA 40. Teores de magnésio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Tasso Fragoso-MA. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%). ns= não significativo.

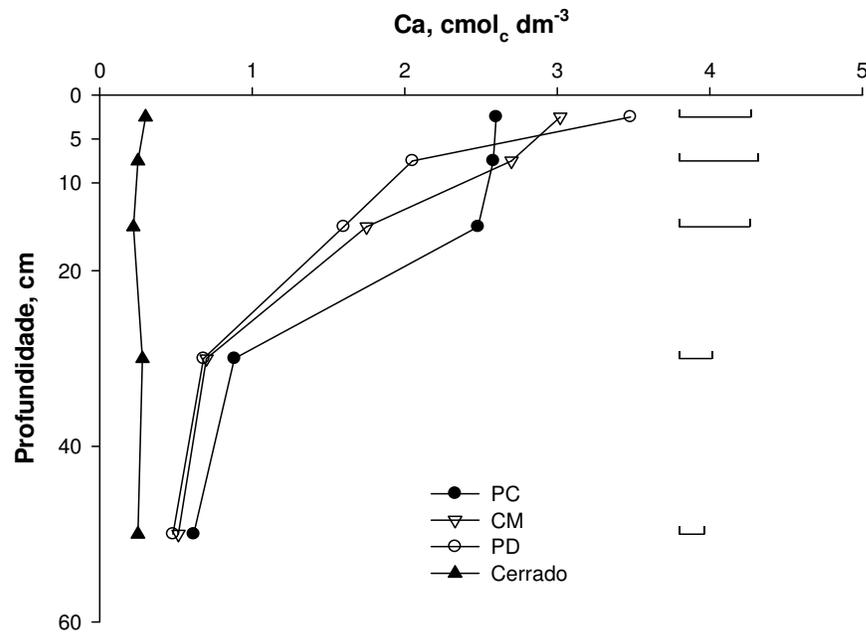


FIGURA 41. Teores de cálcio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

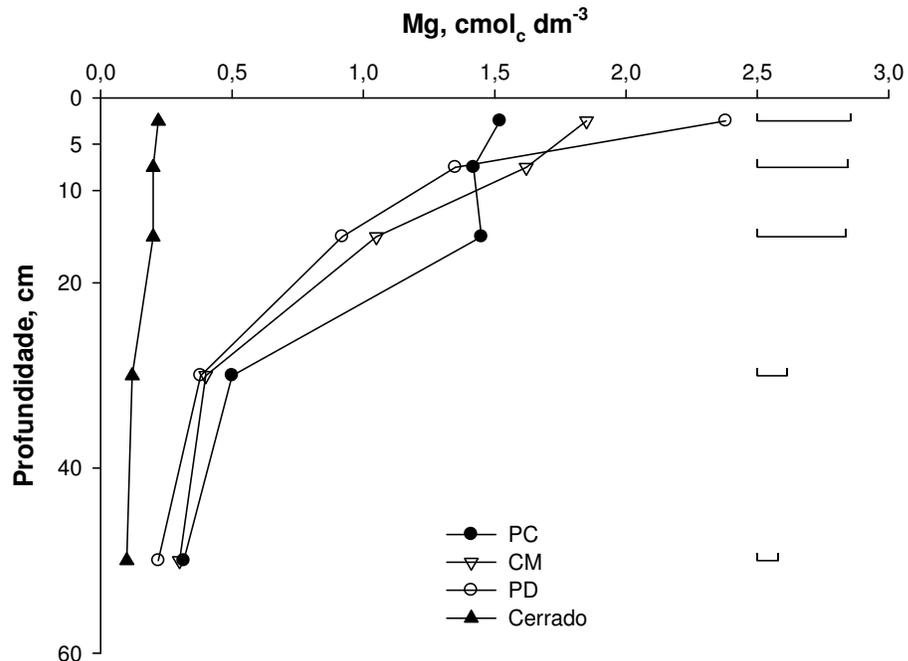


FIGURA 42. Teores de magnésio trocável no perfil do solo de Cerrado, amostrado em 2005, sob diferentes manejos (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto) e vegetação nativa em Sapezal-MT. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa (Teste DMS 5%).

maior acúmulo de Ca em Luziânia-MS. Em Sapezal foram amostradas as parcelas de manejo do solo em CM e, como seria esperado, as curvas de acúmulo de Ca e Mg apresentaram comportamento intermediário entre o PC e o PD (Figuras 41 e 42).

O teores de Ca e Mg, na camada 0-20 cm, considerados suficientes para a produção de culturas anuais na região do Cerrado são entre 1,8-2,5 e 0,8 a 1,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente (Sousa et al, 2004). Nas camadas 0-5 e 5-10 cm, em todos os locais e independente dos manejos do solo utilizados, os teores estão acima do nível de suficiência, com exceção do Mg em Tasso Fragoso. Mas na camada de 10-20 cm os teores são menores, especialmente sob PD em Costa Rica e Tasso Fragoso, e podem limitar o desenvolvimento das culturas, especialmente a cultura do algodão, extremamente exigente em Ca. Isso mostra que a aplicação do calcário em superfície no PD não está possibilitando adequada correção da camada 10-20 cm, mesmo com 13 e 15 anos de utilização do PD em Costa Rica e Luziânia, respectivamente, confirmando os dados obtidos por Miranda (2005) na região do Cerrado, que obteve correção da acidez do solo pela aplicação do calcário superficial somente até 5 cm de profundidade, e diferente dos dados obtidos por Caires et al. (2008) para a região Sul do Brasil, que encontrou efeito da calagem superficial até 60 cm de profundidade. Na camada 20-40 e 40-60 cm, para que tenha condições adequadas ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas é necessário teor de Ca acima de 0,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e saturação de Al inferior a 20%. Assim como aconteceu com a concentração de Al, o teor de Ca está abaixo deste nível em Tasso Fragoso, limitando a desenvolvimento das culturas.

A eficiência agronômica do Ca e Mg, na média geral da camada 0-60 cm, determinada para os quatro locais e três manejos de solo, foi de 65% e 63%, respectivamente (Tabela 42), mas ocorreram variações para o Ca desde 47% no CM em Sapezal até 81 % no PD em Costa Rica. Para o Mg as variações ficaram entre 31% no CM em Sapezal até 91% no PC em Costa Rica. Assim como aconteceu com a correção de P e de acordo com a experiência de muitos anos de correção do solo em lavouras comerciais, a eficiência agronômica das correções de Ca e Mg foram menores nos solos

cultivados recentemente, como foi o caso de Sapezal, em que as avaliações iniciaram a partir do primeiro ano de abertura do Cerrado, estando de acordo com os dados de pesquisa de Altmann & Pavinato (2001) e Fundação Mato Grosso (2004) demonstram a necessidade de multiplicar por 1,3 e 1,5, respectivamente, a dosagem de calcário calculada para elevar a saturação de bases e os níveis de Ca e Mg para os níveis desejados.

5.3.4. Produtividade das culturas

Um dos principais indicadores da sustentabilidade do sistema de produção é a evolução da produtividade das culturas, objetivo final de qualquer sistema de produção agrícola. O preparo convencional do solo no Brasil provocou erosão e degradação do sistema produtivo, com perdas de produtividade. A partir da década de 70, os produtores passaram a utilizar o plantio direto e os resultados foram extremamente animadores em termos de aumento de produtividade das culturas. Na década de 90 ocorreu a consolidação deste sistema de produção e os dados de pesquisa mostravam aumento de produtividade com a utilização desta tecnologia (Costa et al., 2003). Ao mesmo tempo, a tecnologia de preparo convencional do solo foi sendo readequada, principalmente para evitar erosão do solo e redução da fertilidade. Por isso, dados recentes mostram diferenças pequenas e muitas vezes não significativas entre os sistemas de manejo do solo (Secco et al., 2005).

Em Luziânia foram nove safras de soja, sendo obtida alta produtividade, atingindo mais de 4.500 kg ha⁻¹ na safra 04/05, e houve tendência de aumento de produtividade ao longo dos anos, independente do sistema de manejo de solo utilizado (Figura 43). Em Costa Rica os dados mostram estabilização da produtividade de soja ao longo dos anos em níveis elevados, entre 3.500 e 4.000 kg ha⁻¹, com exceção da safra 05/06, quando houve perda de produtividade devido à ferrugem da soja, fator sanitário controlável nas safras futuras (Figura 43). Em Tasso Fragoso e Sapezal os níveis de produtividade de soja também foram elevados e como foram poucos

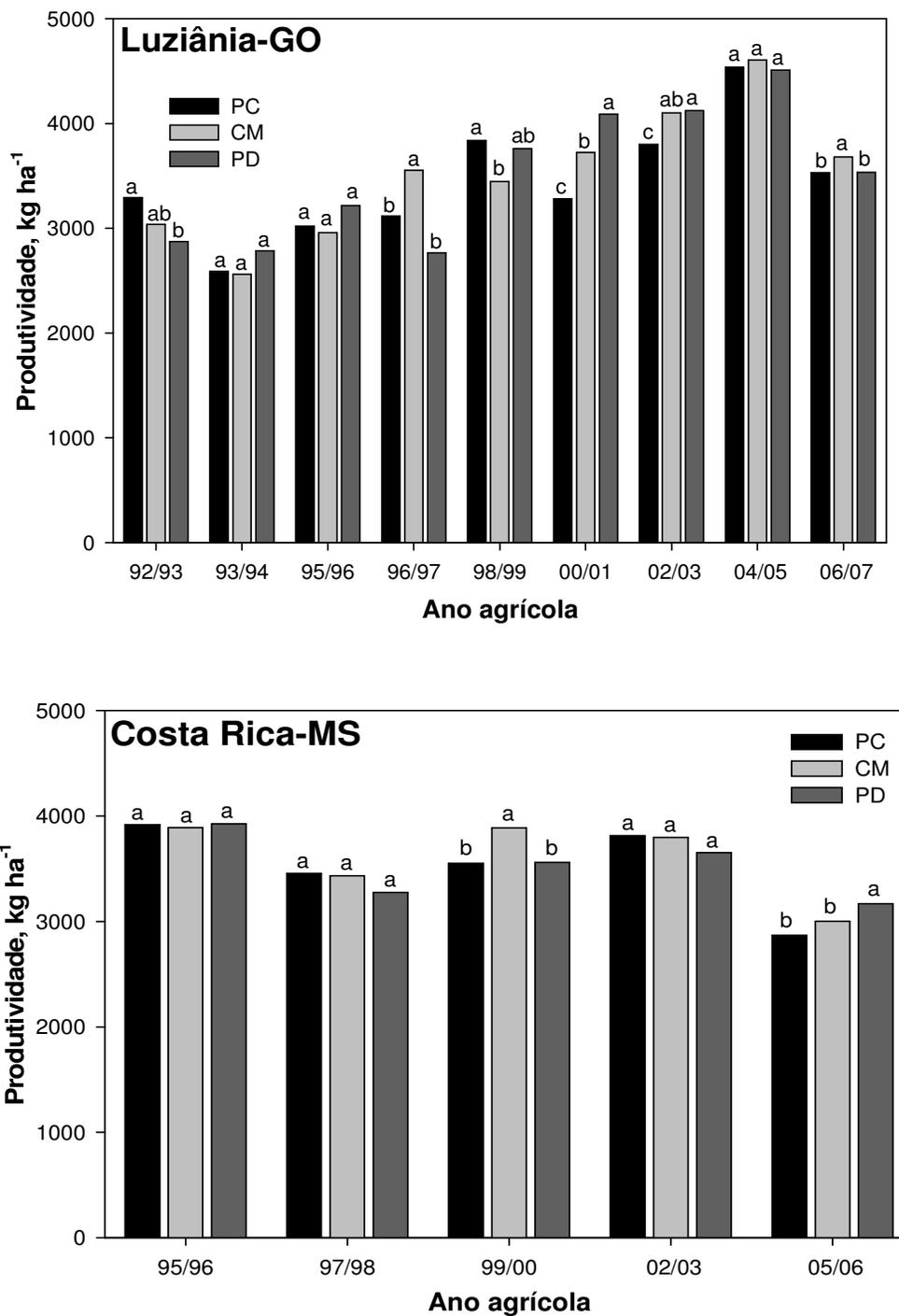


FIGURA 43. Rendimento de grãos de soja, em vários anos agrícolas, nas áreas experimentais de Luziânia-GO e Costa Rica-MS. Barras seguidas da mesma letra em cada ano agrícola não se diferenciam entre si pelo Teste de Duncan (5%).

anos de cultivo ainda não é possível definir com exatidão qual a tendência futura, mas a experiência de outros locais mostra que a produtividade da soja está associada à outros fatores, como potencial das variedades, época de plantio, manejo de doenças foliares, e não unicamente limitada por fatores associados ao solo, como fertilidade, desenvolvimento radicular, doenças de solo de difícil controle, etc. Analisando os dados de produtividade de soja nos quatro locais, na média dos anos, chama atenção a grande similaridade de produtividade de soja entre os três sistemas de manejo do solo (Figura 43 e 44), mas todos os indicadores apontam que o preparo convencional do solo é um sistema mais frágil e provavelmente aparecerão fatores limitantes à sustentabilidade do sistema de produção a médio prazo. O comportamento produtivo do preparo convencional seria completamente diferente se as condições de topografia da área experimental fosse favorável à erosão. A magnitude das perdas provocadas pela erosão são tão elevadas que mesmo em condições de altas adições de C, há intensa degradação do solo quando eventos dessa natureza acontecem.

Na cultura do milho o comportamento foi muito similar ao da soja, apenas com oscilações mais significativas entre os manejos de solo ao longo dos anos, especialmente em regiões onde há maior instabilidade de chuvas, como em Luziânia, mas na média dos anos a produtividade foi similar nos três sistemas de manejo do solo (Figura 45).

Na cultura do algodão os resultados seguiram a mesma tendência, as produtividades foram muito similares entre os sistemas de manejo do solo em todos os locais, mas houve tendência de maior produtividade no PD em Tasso Fragoso, no CM em Costa Rica e no PC em Sapezal (Figuras 46 e 47). Na condição de solo arenoso de Tasso Fragoso-MA, o manejo de solo assume menor importância em relação às demais práticas associadas ao estabelecimento e manejo da cultura, por isso houve a tendência de maior produtividade no PD. Já em Sapezal-MT, como o experimento foi estabelecido em 2001, em área de Cerrado preparada em 1997, a fertilidade do solo era um fator limitante para alta produtividade de algodão, e neste caso, o preparo convencional do solo com gradagens promove condições mais favoráveis para o crescimento da cultura, permitindo uma expressão maior do seu potencial produtivo no curto prazo. No longo prazo, Sapezal-MT deverá seguir a mesma

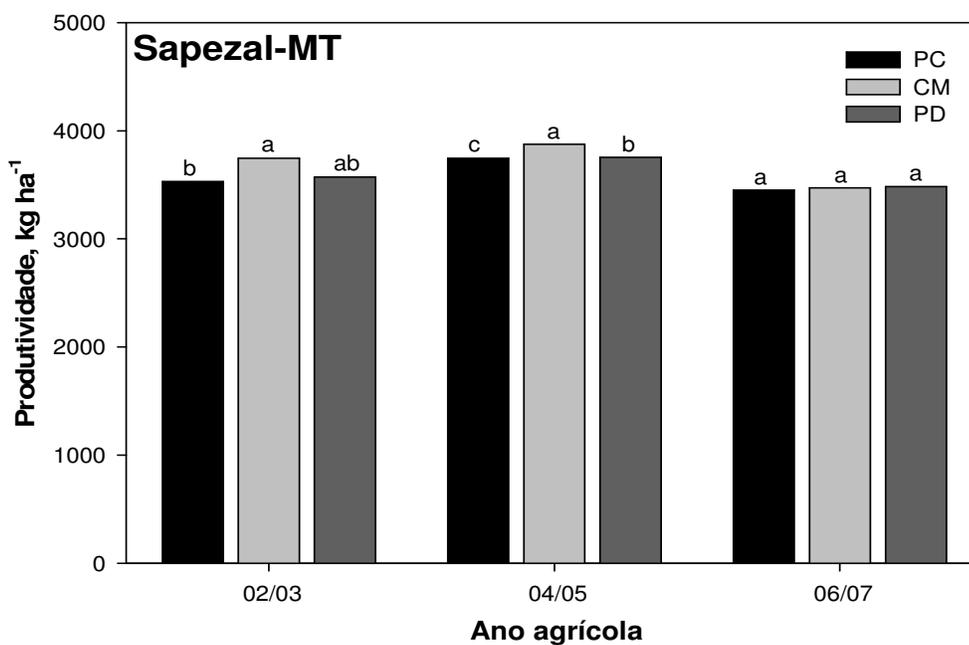
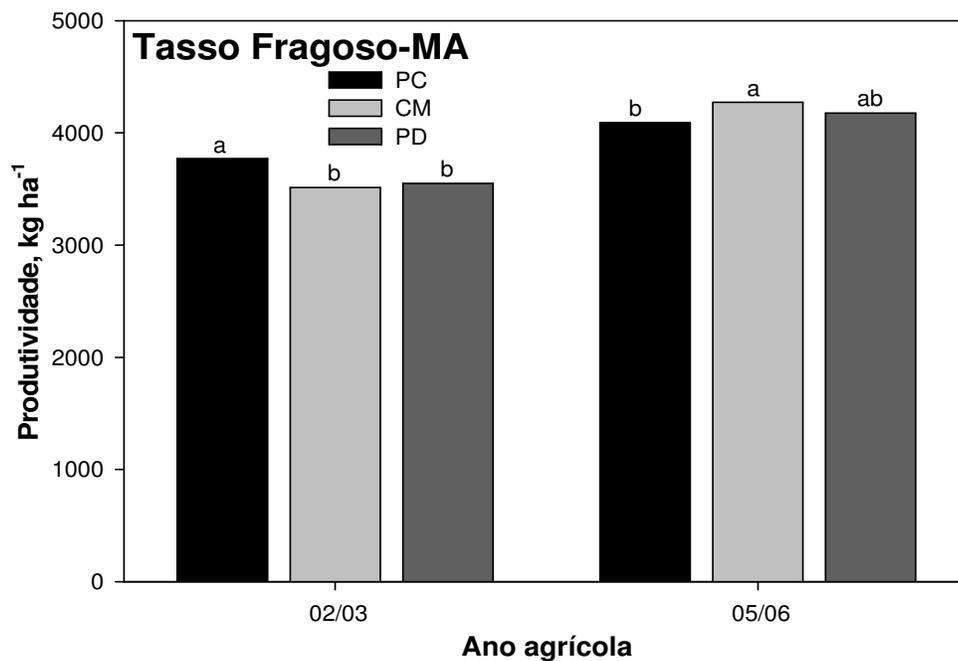


FIGURA 44. Rendimento de grãos de soja, em vários anos agrícolas, nas áreas experimentais de Tasso Fragoso-MA e Sapezal-MT. Barras seguidas da mesma letra em cada ano agrícola não se diferenciam entre si pelo Teste de Duncan (5%).

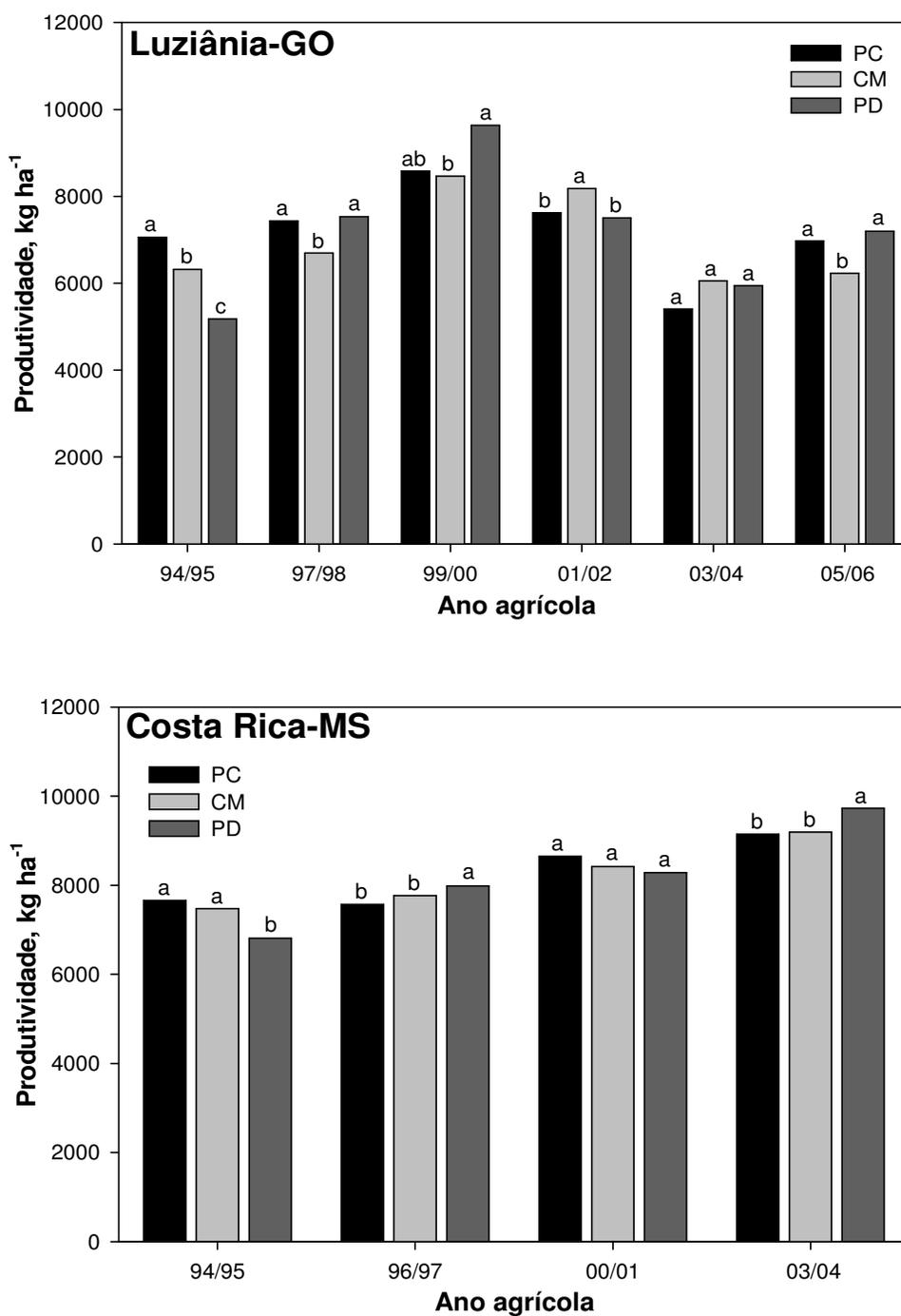


FIGURA 45. Rendimento de grãos de milho, em vários anos agrícolas, nas áreas experimentais de Luziânia-GO e Costa Rica-MS. Barras seguidas da mesma letra em cada ano agrícola não se diferenciam entre si pelo Teste de Duncan (5%).

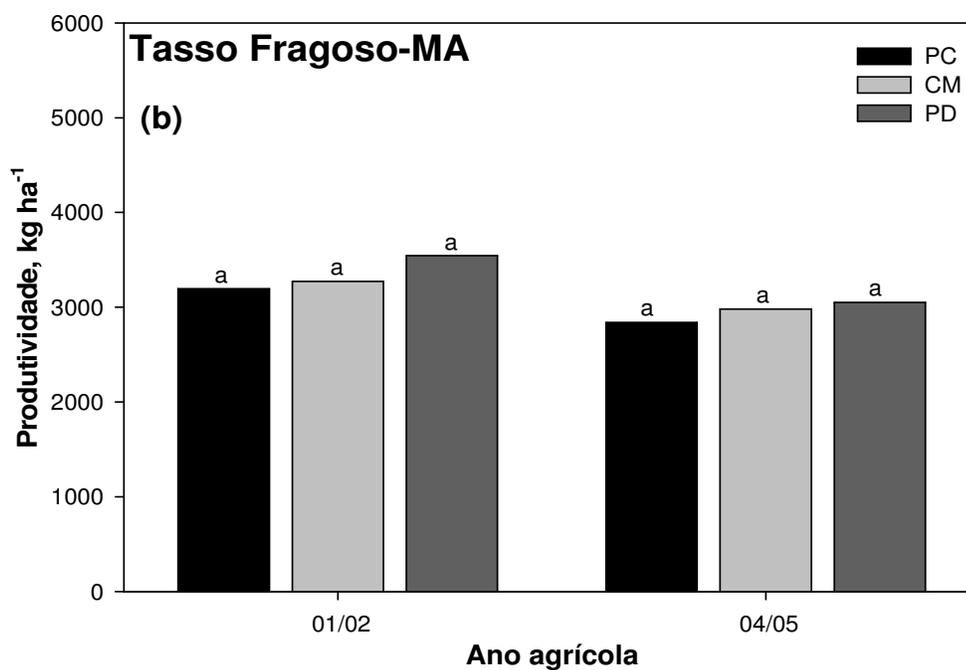
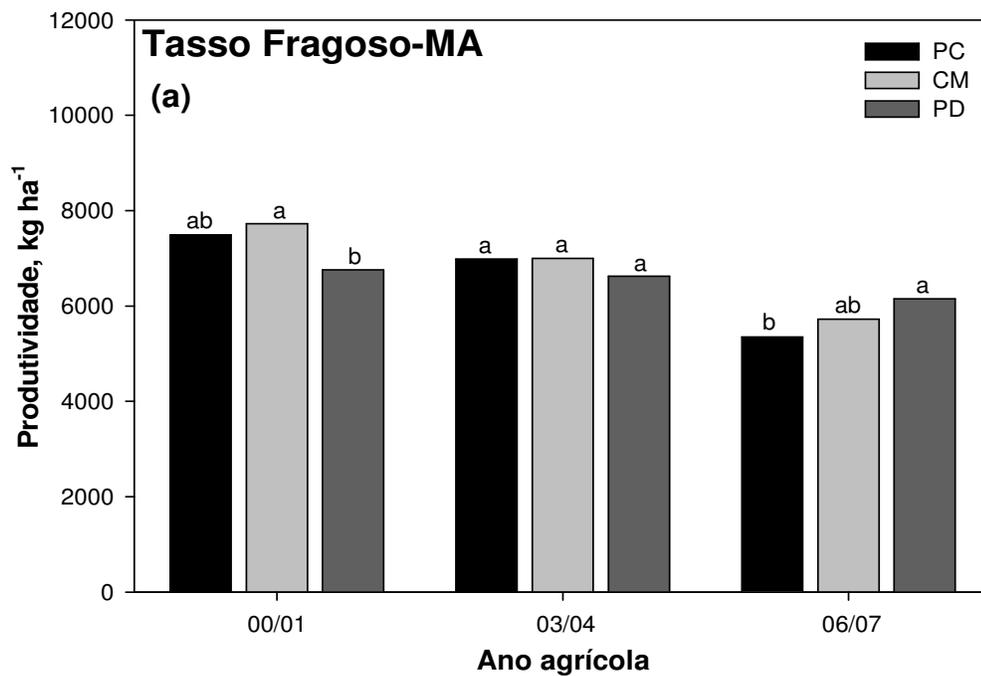


FIGURA 46. Rendimento de grãos de milho (a) e algodão em caroço (b) em vários anos agrícolas, na área experimental de Tasso Fragoso-MA. Barras seguidas da mesma letra em cada ano agrícola não se diferenciam entre si pelo Teste de Duncan (5%).

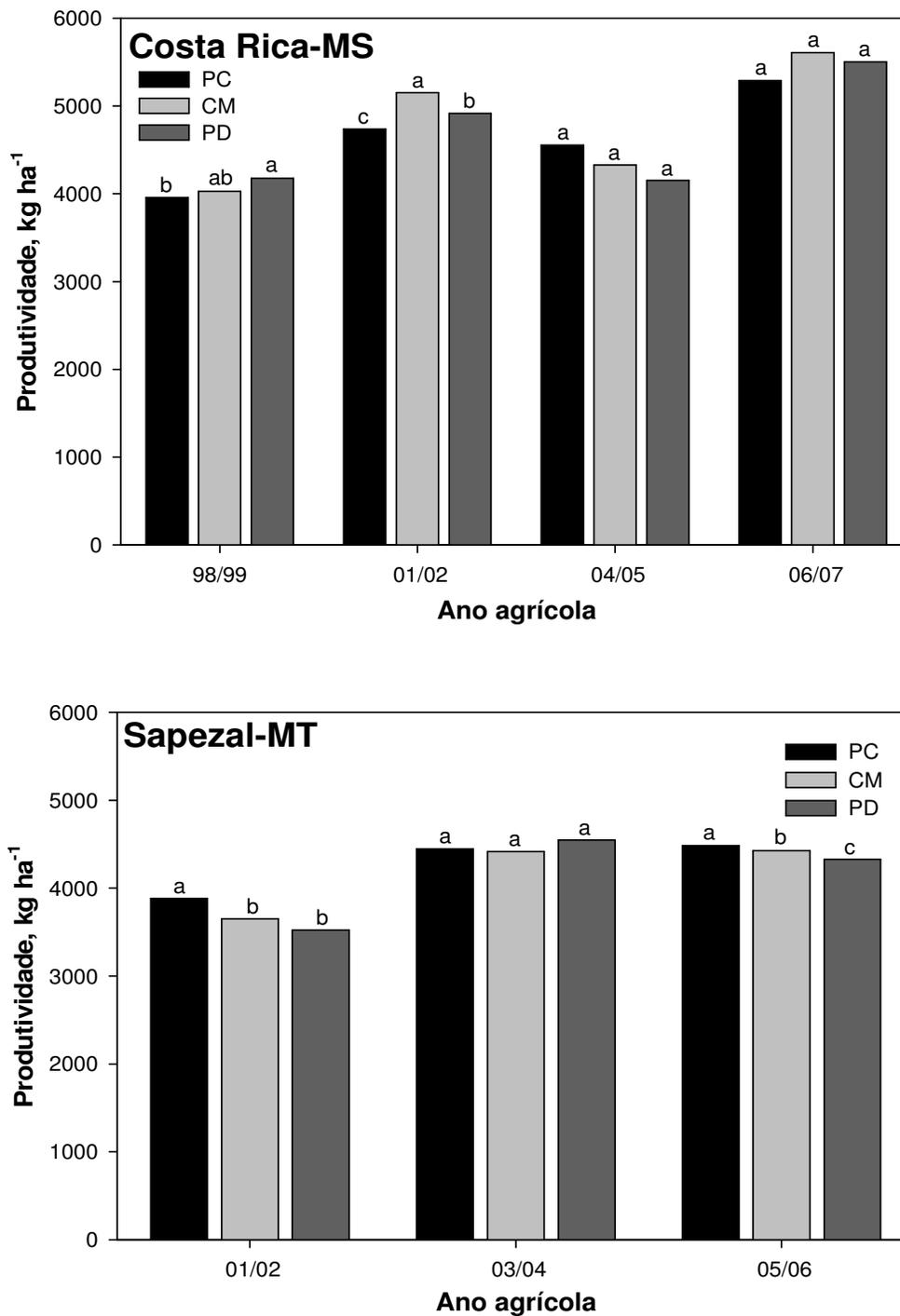


FIGURA 47. Rendimento de algodão em caroço, em vários anos agrícolas, nas áreas experimentais de Costa Rica-MS e Sapezal-MT. Barras seguidas da mesma letra em cada ano agrícola não se diferenciam entre si pelo Teste de Duncan (5%).

tendência de Costa Rica-MS, ou seja, o algodão apresentar maior produtividade em CM, devido aos benefícios da descompactação, mas sem as perdas de matéria orgânica e fertilidade associadas ao preparo convencional.

A experiência de produção em grande escala a nível comercial mostra que o fator manejo do solo é determinante para obter alta produtividade e baixo custo de produção. O conjunto de práticas utilizadas associadas ao manejo do solo, como balanço de fertilidade, manejo de pragas e doenças e manejo operacional, como qualidade de plantio, época de plantio, espaçamento entre linhas, entre outros, são influenciados diretamente pelo manejo de solo utilizado. Normalmente o preparo convencional do solo gera dificuldades operacionais relacionadas a operação com máquinas agrícolas e provoca atrasos no plantio e atrasos nas pulverizações necessários para o adequado manejo fitossanitário das culturas, além das dificuldades discutidas de manter nível adequado de C no solo para garantir a sustentabilidade técnica do sistema de produção e controle da erosão.

A totalização dos dados de produção de 15 safras em Luziânia, 13 safras em Costa Rica, sete safras em Tasso Fragoso e seis safras em Sapezal, demonstram grande similaridade de produtividade entre os três sistemas de manejo do solo (Figura 48), demonstrando suas eficiências em termos de produtividade das culturas, mas a sustentabilidade depende das condições do ambiente onde estão sendo utilizados, como tipo de solo, topografia, sistema de conservação do solo utilizado, e da tecnologia de rotação de culturas e fertilização empregada. O trabalho mais antigo existente no mundo de avaliação da rotação de cultura e adubação nitrogenada sobre a produtividade da cultura do algodão é o *Old Rotation*, instalado em 1896, em Auburn (Alabama-EUA) (Mitchell et al., 1996). O experimento está avaliando três sistemas de rotação de culturas (monocultivo de algodão, algodão-milho e algodão-soja-milho) e níveis de adição de N (sem N, com N e com leguminosa). Os dados dos primeiros 100 anos demonstram que em monocultivo e sem utilização de N ou leguminosa, a produtividade média de algodão em caroço foi 603 kg ha^{-1} . O simples fato de adicionar uma leguminosa na rotação aumentou para 1.468 kg ha^{-1} (+143%) e quando manteve a leguminosa e fez rotação com milho a produtividade média aumentou para 1.623 kg ha^{-1} (+169%). A rotação de cultura com soja, sem leguminosa de

cobertura de solo, proporcionou produtividade equivalente a 160%, indicando que a soja foi menos eficiente que a leguminosa no suprimento de N, mesmo com os benefícios da rotação de cultura com ciclo de três anos.

Na região do Cerrado brasileiro não existem trabalhos de longo prazo para avaliar o efeito da rotação de culturas sobre a produtividade do algodão. Corrêa & Sharma (2004) avaliaram o efeito de diferentes coberturas de solo cultivadas em sucessão à soja (milheto, nabo forrageiro, sorgo granífero e aveia preta) sobre a produtividade do algodão cultivado no ano seguinte (safra 2000/2001) em PD e a melhor produtividade foi obtida após o milheto. O milheto é a cobertura de solo mais utilizada na região do Cerrado, tanto pelos produtores de algodão, como pelos produtores de soja e milho. É uma cultura que apresenta rápido desenvolvimento e alta capacidade de

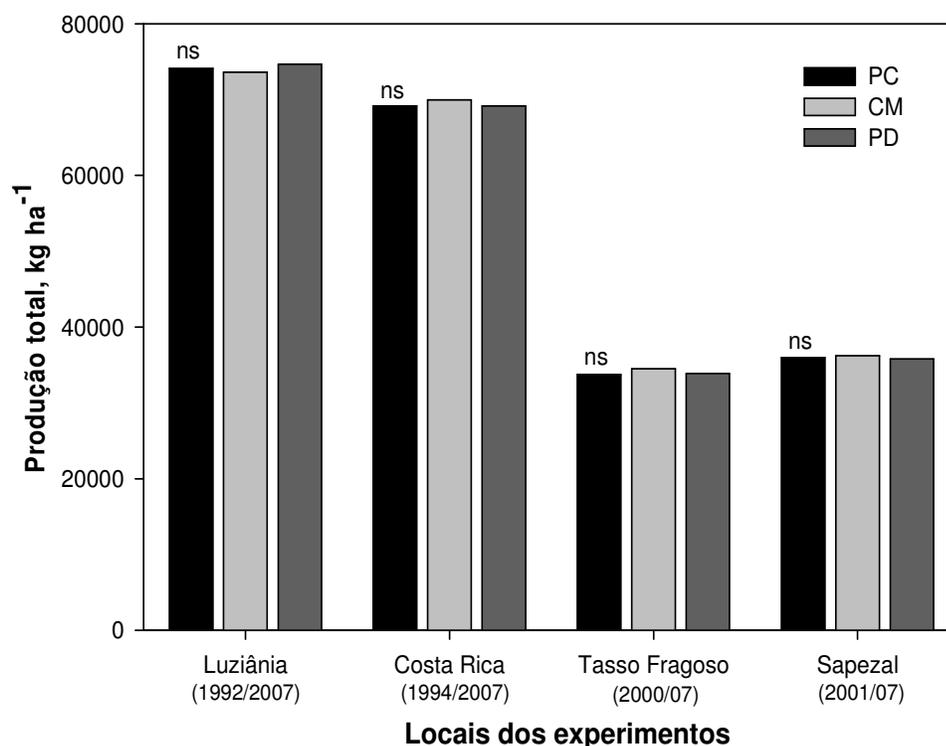


FIGURA 48. Produção total das culturas principais em vários anos agrícolas em quatro áreas experimentais do Cerrado: Luziânia (soja e milho), Costa Rica (soja, milho e algodão), Tasso Fragoso (soja, milho e algodão) e Sapezal (soja e algodão); submetidas a diferentes manejos de solo (PC= preparo convencional, CM= cultivo mínimo e PD= plantio direto). ns= diferenças não significativas (Teste de DMS 5%).

reciclagem de nutrientes e, sendo uma gramínea, apresenta decomposição mais lenta, devido a alta relação C/N nas condições de temperatura e umidade dos trópicos, contribuindo para a sustentabilidade do sistema de produção na região do Cerrado.

5.4. Conclusões

Em solo de Cerrado, é necessário a adição de altas dosagens de corretivos e fertilizantes para elevar a fertilidade do solo para o nível de suficiência.

Adubações balanceadas e adequado manejo do solo permitem manter o solo de Cerrado fértil e produtivo. A eficiência agronômica das adubações fosfatadas atingiram no máximo 20% e das adubações potássicas alcançaram 100%.

As produtividades acumuladas de soja, algodão e milho não diferiram entre o plantio direto, o cultivo mínimo e o preparo convencional. A produtividade será sustentável se forem satisfeitas as exigências de adição de C e nutrientes e ausência de erosão.

6. CONCLUSÕES GERAIS

Sistemas de produção com soja e algodão na região do Cerrado são tecnicamente sustentáveis. Adubações balanceadas e adequado manejo do solo permitem elevar a fertilidade e manter o solo de Cerrado fértil e produtivo.

O cultivo do solo de cerrado provoca redução dos estoques de carbono, mas é possível recuperá-los aos níveis originais através da utilização do plantio direto e de um sistema de rotação de culturas com alta adição de carbono ao solo. Para manter os níveis de estoque de carbono no solo, na média dos quatro locais estudados, estimou-se que é necessária a adição de resíduos vegetais em quantidades equivalentes a $5,0 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no plantio direto, $5,2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no cultivo mínimo e $6,4 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no preparo convencional.

A eficiência agrônômica das adubações fosfatadas variou de 2 a 20%, mas a eficiência agrônômica da adubação potássica pode atingir 100% quando é utilizado um sistema de rotação de culturas e coberturas de solo com alta reciclagem do nutriente.

As produtividades acumuladas de soja, algodão e milho não diferiram entre o plantio direto, o cultivo mínimo e o preparo convencional. A produtividade será sustentável se forem satisfeitas as exigências de adição de C e nutrientes e ausência de erosão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÁMOLI, J.; MACÊDO, J.; AZEVEDO, L. G.; MADEIRA NETTO, J. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT, W. J., (Ed.) **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo, Nobel: 1987. p.33-74.

ADDISCOTT, T. M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.46, n.2, p.161-168, 1995.

ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres - o caso do cerrado brasileiro**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003.

ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. **Os adubos e a eficiência das adubações**. São Paulo: ANDA, 1989. 35 p. (Boletim Técnico, 3).

ALTMANN, N.; PAVINATO, A. Experiências da SLC Agrícola no manejo da fertilidade do solo no cerrado. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 94, 2002, p.1-4.

ANDREUX, F. Humus in world soils. In: PICCOLO, A., (Ed.) **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, 1996. p.45-100.

BAYER, C.; LOVATO, T.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, Orlando, FL, v.91, n.1-2, p.217-226, 2006a.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, Orlando, FL, v.86, n.2, p.237-245, 2006b.

BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; LISE, L. Soil Carbon Fractions Based on Their Degree of Oxidation, and the Development of a Carbon Management Index for Agricultural Systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, VIC, v.46, n.7, p.1459-1466, 1995.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J. C. L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, Oxford, v.28, n.1, p.57-64, 2008.

CONAB. 2008. **Sexto levantamento de avaliação da safra 2007/08 - Março de 2008**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> Acesso em: 10 mar. 2008.

CONCEIÇÃO, P. C. **Indicadores de qualidade do solo visando a avaliação de sistemas de manejo do solo**. 2002. 125 f. (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2002.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.5, p.777-788, 2005.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.425-431, 1999.

CORRÊA, J. C.; SHARMA, R. D. Produtividade do algodoeiro herbáceo em plantio direto no Cerrado com rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.1, p.41-46, 2004.

CORREIA, J. R.; REATTO, A.; SPERA, S. T. Solos e suas relações com o uso e o manejo. In: EMBRAPA. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, Embrapa Cerrado: 2002. p.29-58.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Physical properties of a south Brazilian Oxisol as affected by no-tillage and conventional tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.3, p.527-535, 2003.

DALAL, R. C.; MAYER, R. J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, VIC, v.24, n.2, p.281-292, 1986.

DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. 2003. 164 f. (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

DORAN, J. W. Soil health and sustainability: translating science into practice. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.88, n.1, p.119-127, 2002.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. M. et al., (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**, Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.3-21.

DORAN, J. W.; JONES, A. J. **Methods for Assessing Soil Quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. 410 p.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Orlando, FL, v.15, n.1, p.3-11, 2000.

EDITAL-PROBIO. 2004. **Mapeamento de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado - Relatório Final**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/estruturas/chm/arquivos/edit404.pdf>> Acesso em: 05 dez. 2008.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

FAO. From the Green Revolution to the Gene Revolution. In: FAO. **The State of Food and Agriculture**. Vialle delle Terme di Caracalla: FAO, 2004. p.25-39.

FERREIRA, E. A. B.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C.; RAMOS, M. L. G. Dinâmica do carbono da biomassa microbiana em cinco épocas do ano em diferentes sistemas de manejo do solo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.1625-1635, 2007.

FORBES, M. S.; RAISON, R. J.; SKJEMSTAD, J. O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. **Science of the Total Environment**, Orlando, FL, v.370, n.1, p.190-206, 2006.

GOODLAND, R. The case that the world has reached limits. In: UNESCO. **Environmentally Sustainable Economic Development: Building on Brundtland**. Paris: UNESCO, 1991. p.15-28.

GREENLAND, D. J.; WILD, A.; ADAMS, D. Organic matter dynamics in soils of the tropics – From myth to complex reality. In: LAL, R.; SANCHEZ, A., (Eds.) **Myths and Science of Soils of the Tropics**. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p.17-34.

GREENWOOD, D. J. Nitrogen supply and crop yield: the global scene. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.67, n.1, p.45-59, 1982.

GUIMARÃES, G. L.; BUZZETTI, S.; SILVA, E. C.; LANZARINI, E.; SÁ, M. E. Culturas de inverno e pousio na sucessão da cultura da soja em plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.25, n.2, p.339-344, 2003.

HÉNIN, S.; DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique du sol. **Annales Agronomiques**, Paris, v.15, p.17-29, 1945.

IBGE. 2008. **Mapa dos biomas brasileiros**. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>>. Acesso em: 06 dez. 2008.

INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Avaliação de procedimentos de extração dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1139-1147, 2003.

INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Variabilidade da goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.6, p.851-866, 2005.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, IA, v.55, n.1, p.1-69, 2000.

ISMAIL, I.; BLEVINS, R. L.; FRYE, W. W. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. **Soil Science American Journal**, Madison, WI, v.58, n.1, p.193-198, 1994.

JANTALIA, C. P.; RESCK, D. V. S.; ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. **Soil and Tillage Research**, Orlando, FL, v.95, n.1-2, p.97-109, 2007.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. The 5M NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. **Clays and Clay Minerals**, Evergreen, v.30, n.6, p.401-408, 1982.

LAL, R. Thematic evolution of ISTRO: transition in scientific issues and research focus from 1955 to 2000. **Soil and Tillage Research**, Orlando, FL, v.61, n.1-2, p.3-12, 2001.

LAL, R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. **Environmental Pollution**, Orlando, FL, v.116, n.3, p.353-362, 2002.

LAL, R. Soil science in the era of hydrogen economy and 10 billion people. In: IUSS. (Ed.) **The Future of Soil Science**. Wageningen, [S.n.], 2006. p.76-79.

LAL, R.; PIERCE, F. J. The vanishing resource. In: LAL, R.; PIERCE, F. J., (Eds.) **Soil management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p.1-5.

LAMAS, F. M.; STAUT, L. A. Nitrogênio e cloreto de mepiquat na cultura do algodoeiro. **Revista Ceres**, Viçosa, v.51, n.298, p.755-764, 2005.

LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado**. 2001. 133 f. (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.1, p.175-187, 2004.

MACEDO, J. **Produção de Alimentos – O Potencial do Cerrado**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC. 1996. 33 p. (Documentos, 59)

MEIRELLES, M. L.; HENRIQUES, R. P. Produção primária líquida em área queimada e não queimada de campo sujo de cerrado (Planaltina, DF). **Acta Botanica Brasilica**, Rio de Janeiro, v.6, n.2, p.3-14, 1992.

MIELNICZUK, J. Formas de potássio em solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.1, n.2-3, p.55-61, 1977.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.1-8.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N. E. A. (Ed.) **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: 2003. p.209-248.

MIRANDA, L.N. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.40, n.6, p.563-572, 2005.

MITCHELL, C. C.; ARRIAGA, F. J.; ENTRY, J. A.; NOVAK, J. L.; GOODMAN, W. R.; REEVES, D. W.; RUNGE, M. W.; TRAXLER, G. J. **The Old Rotation 1986-1996: 100 Years of Sustainable Cropping Research**. Auburn: Alabama Agricultural Experimental Station, 1996. 27 p.

MONEGAT, C. **Plantas de cobertura do solo: características e manejo em pequenas propriedades**. Chapecó: Ed. do Autor, 1991. 337 p.

PETTIGREW, W.T.; MEREDITH JR, W.R.; BRUNS, H.A.; STETINA, S.R. Effects of a short-term corn rotation on cotton dry matter Partitioning, Lint Yield, and Fiber Quality Production. **The Journal of Cotton Science**, Cordova, TE, v.10, n.3, 244-251, 2006.

PICCOLO, A. Humus and soil conservation. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam, Elsevier: 1996. p.225-292.

RAIJ, B. V. **Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1988. 88p.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.

REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.43, n.1-2, p.131-167, 1997.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P. L.; VICTÓRIA, R. L.; VIEGAS, G. P. Dinâmica do nitrogênio num solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.3, n.1, p.17-20, 1979.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Orlando, FL, v.70, n.2, p.107-119, 2003.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; LAGEN, B. V.; VELTHORST, E. J. Transformations in occluded light fraction organic matter in a clay oxisol: evidence from ^{13}C -CPMAS-NMR and ^{d13}C signature. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5, p.811-818, 2004.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; RIBEIRO, D. B. O. Formas de potássio no solo e nutrição potássica da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.2, p.121-125, 1988.

SÁ, J. C. D.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; VENSKE, S. P.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v.65, n.5, p.1486-1499, 2001.

SALTON, J.; HERNANI, L. C. Cultivos de primavera: alternativa para produção de palha no Mato Grosso do Sul. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO, 10., Florianópolis, 1994. **Resumos**. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. p.248-249.

SALTON, J. C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. 2005. 158 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SANCHEZ, P. A. Soil organic matter. In: SANCHEZ, P. A. (Ed.) **Properties and management of soils in the tropics**. New York: J. Willey, 1976. p.162-183.

SANCHEZ, P. A.; LOGAN, T. J. Myths and Science about the Chemistry and Fertility of Soils in the Tropics. In: MYTHS and Science of Soils of the Tropics – SSSA. Madison: SSSA, 1992. p.35-46. (SSSA Special Publication Number, 29.)

SCHOLES, R. J.; HALL, D. O. The carbon budget of tropical savannas, woodlands and grasslands. In: BREYMEYER, A. L., et al. (Eds.) **Global Change: effects on coniferous forests and grasslands**. Chichester: Wiley, 1996. p.69-100. v.56.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. **Z Pflanzenernähr Düng Bodenk**, Berlin, v.105, p.194-202, 1964.

SCURLOCK, J. M. O.; HALL, D. O. The global carbon sink: a grassland perspective. **Global Change Biology**, Oxford, v.4, n.2, p.229-233, 1998.

SECCO, D.; DA ROS, C. O.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.3, p.407-414, 2005.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. **Soil Science**, Hagerstown, v.164, n.4, p.224-234, 1999.

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.18, n.3, p.542-544, 1994.

SISTI, C. P. J.; DOS SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.76, n.1, p.39-58, 2004.

SMYTH, A. J.; DUMANSKI, J. A frame work for evaluation sustainable land management. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.75, 1995.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002a. 416 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds.) **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, Embrapa Cerrados: 2002b. v.1, p.81-96.

SOUSA, D. M. G.; CARVALHO, L. J. C. B.; MIRANDA, L. N. Correção da acidez do solo. In: GOEDERT, W. J. (Ed.) **Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. Brasília: EMBRAPA Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, 1985. p.99-127.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso de gesso agrícola nos solos dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. 20 p. (EMBRAPA-CPAC. Circular Técnica, 32).

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Recomendação de adubação fosfatada com base na capacidade tampão de fósforo do solo para a Região do Cerrado. In: FERTBIO2006. Bonito, 2006. **Resumos...** Bonito, 2006. CD-ROM.

TANG, X.; LI, J.; MA, Y.; HAO, X.; LI, X. Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat-maize cropping systems with various soil and climate conditions. **Field Crops Research**, Corrected Proof, 2008. (In Press)

URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Dinâmica de N no solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE NITROGÊNIO EM PLANTAS, Itaguaí, 1990. **Anais...** Itaguaí: UFRRJ. Imprensa Universitária, 1990. p.181-251.

VEZZANI, F. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VIEIRA, F. C. B.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; HE, Z. L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil and Tillage Research**, Orlando, FL, v.96, n.1-2, p.195-204, 2007.

WOODRUFF, C. M. Estimating the nitrogen delivery of soil from the organic matter determination as reflected by Sanborn field. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, WI, v.14, n.1, p.208-212, 1949.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F. C. B.; MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil and Tillage Research**, Orlando, FL, v.94, n.2, p.510-519, 2007.

ZANCANARO, L. Nutrição e adubação. In: **BOLETIM Técnico de Soja 2004**. Rondonópolis: FUNDAÇÃO MT, 2004. p.178-216.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Orlando, FL, v.84, n.1, p.28-40, 2005a.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Orlando, FL, v.127, n.1-2, p.168-173, 2005b.

9. RESUMO BIOGRÁFICO

Aurélio Pavinato, filho de Gentil Ricardo Pavinato e Luiza Pierina Pavinato, nasceu em 22 de setembro de 1967, em Tenente Portela-RS, e residiu durante sua infância na localidade de Barreiro, atualmente pertencente ao município de Vista Gaúcha-RS, onde realizou seus estudos de 1º Grau. Entre 1983 e 1985 cursou o 2º Grau Técnico em Agropecuária, no Colégio Agrícola de Frederico Westphalen, extensão da Universidade Federal de Santa Maria. Em 1986 ingressou na Faculdade de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria, graduando-se em dezembro de 1990. Em março de 1991 iniciou o Mestrado em Ciência do Solo na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do prof. João Mielniczuk, e defendeu Dissertação em julho de 1993. Em 09 de agosto de 1993 foi contratado pela SLC Agrícola S.A. para o montar o Departamento de Planejamento Agrícola da empresa com o objetivo de promover o intercâmbio entre as Unidades de Produção (Fazendas) e o desenvolvimento tecnológico da empresa. Iniciou os trabalhos como Assessor Técnico, concomitante foi Gerente de Fazendas, e em 2002 assumiu a gerência do Departamento de Planejamento Agrícola e Pesquisa. Apartir de 29 de abril de 2008 assumiu a Diretoria de Produção da empresa. Concomitante com o trabalho, em agosto de 2004 iniciou o curso de Doutorado em Ciência do Solo, área de concentração Manejo e Conservação do Solo, sob orientação do prof. João Mielniczuk. É casado com Taciane Piccinini Pavinato e tem um filho, Pedro Ricardo Pavinato, nascido em 10 de julho de 2007, em Porto Alegre-RS. Durante estes 15 anos de atuação profissional tem contribuído de forma significativa com a evolução da produção agrícola brasileira, através de várias palestras em Seminários e Congressos nacionais, mostrando os resultados obtidos pela empresa e sendo exemplo de desenvolvimento tecnológico aos demais produtores.